Научная статья
УДК 681.5.08:621.36
ББК 31.252.4–051
М 52
DOI: 10.53598 / 2410-3225-2021-4-291-135-146

Некоторые вопросы изучения электрических характеристик термоэлектрических элементов с помощью аппаратно-программной платформы Arduino

(Рецензирована)

Шумаф Туркубиевич Меретуков[1], Светлана Владимировна Полякова[2], Сусана Касеевна Меретукова[3]

[1, 2] *Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия*
[1] *sh_meretukov@mail.ru*
[2] *szxd2009@yandex.ru*
[3] *Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Россия, postforsusana@yandex.ru*

Аннотация. *Рассмотрены вопросы автоматизации процесса измерения электрических характеристик термоэлектрического преобразователя, элемента Пельтье, на основе аппаратно-программной платформы Arduino. Описаны возникающие трудности, связанные с физическими особенностями элемента Пельтье и возможностями Arduino.*

Ключевые слова: *термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье, вольтметр, амперметр, Ардуино (Arduino), микроконтроллер, электрические характериктики, температура*

Original Research Paper

Some questions of studying electrical characteristics of thermoelectric elements using Arduino hardware and software platform

Shumaf T. Meretukov[1], Svetlana V. Polyakova[2], Susana K. Meretukova[3]

[1, 2] *Adyghe State University, Maikop, Russia*
[1] *sh_meretukov@mail.ru*
[2] *szxd2009@yandex.ru*
[3] *Maikop State University of Technology, Maikop, Russia, postforsusana@yandex.ru*

Abstract. *The paper discusses the automation of measuring the electrical characteristics of a thermoelectric converter, Peltier element, based on the Arduino hardware and software platform. The authors describe the emerging difficulties associated with the physical features of the Peltier element and the Arduino potentialities.*

Keywords: *thermoelectric converter, Peltier element, voltmeter, ammeter, Arduino, microcontroller, electrical characteristics, temperature*

Введение

Явление, обнаруженное в 1834 году французским физиком Жаном Шарлем Пельтье, не нашло применения в своем веке [1]. В настоящее время «эффект Пельтье» актуален и интересен из-за открывающихся новых возможностей применения. В современном мире полупроводников эффект Пельтье получил новую жизнь. Аналогами эф-

фекту Пельтье являются эффекты Зеебека и Томсона [2, 3]. Все эффекты можно классифицировать под термином «термоэлектрический эффект». Любой термоэлектрический эффект предполагает преобразование разности температур в разность напряжений. Эффекты Зеебека и Пельтье являются различными проявлениями одного и того же физического процесса. В некоторых случаях они связаны и известны как эффект Зеебека-Пельтье. Причина, по которой эти два эффекта разделены, связана с их независимыми открытиями, сделанными двумя разными людьми. Большой вклад в исследование данных физических эффектов внес российский (советский) ученый А.Ф. Иоффе [4, 5].

Благодаря термоэлектрическим явлениям можно сразу же осуществлять преобразование тепловой и электрической энергий. Такие преобразователи могут работать как в режиме генератора энергии, преобразуя тепло в электричество, так и в качестве холодильников, которые преобразуют электричество в холод.

Статистические данные показывают, что во всем мире более 60% энергетических трат – это потери энергии [6]. Причем большая доля – в виде отработанного тепла. Поэтому стоит задача по снижению таких потерь. И это возможно сделать с помощью новых высокоэффективных термоэлектрических материалов (ВТЭМ). Они позволяют непосредственно и обратимо преобразовывать тепло в электрическую энергию [7]. С другой стороны, технология ВТЭМ – это экологичная технология преобразования энергии с преимуществами высокой надежности, отсутствия загрязняющих веществ и возможностью работы в широком диапазоне температур. В настоящее время эффективность такой технологии еще не высока, она пока проигрывает технологии тепловых машин, работающих по циклу Карно.

Элементы Пельтье характеризуются быстрой тепловой реакцией, длительным сроком службы, высокой надежностью, бесшумной работой. Отсутствие жидкости, оказывающей воздействие на окружающую среду, легкий вес и компактная конструкция делают их привлекательными для использования в качестве мини-холодильника для хранения продуктов и лекарств в небольших помещениях, а также в качестве портативного холодильника. Кроме того, эффект Пельтье используется в термическом анализе, компенсации теплового потока, калориметрии и калибровке. Еще одна область применения – телескопы, спектрометры и цифровые камеры в астрономии, где необходимо охлаждение детекторов фотонов. Он обеспечивает снижение шума и, следовательно, позволяет получить более четкие результаты без лишних темных отсчетов.

Охлаждающие устройства на эффекте Пельтье используются для проектирования и изготовления изотермических микрокалориметров и процессоров для персональных компьютеров [8]. В дорожной карте [9], разработанной Термоэлектрической комиссией Великобритании, дан обзор ключевых проблем, связанных с разработкой новых материалов и устройств, обеспечивающих более высокую выходную мощность термоэлементов и перспектив их внедрения. При этом указано, что усовершенствованный сбор и утилизация отработанного тепла и более эффективное охлаждение открывают значительные возможности для снижения энергопотребления и выбросов CO_2.

В настоящее время технологии быстро развиваются, и в физических лабораториях появилась новая приборная база. Например, микропроцессоры, мобильные средства сбора данных, датчики и аналоговые приборы интегрируются в единую систему, тем самым обеспечивая значительное удобство в процессах сбора, обработки и визуализации данных. В этом контексте следует выделить платформу Arduino, которая начала использоваться в качестве недорогого и простого средства при обучении [10].

Так как термоэлектрические элементы имеют практические перспективы развития, то изучение студентами их физических свойств и характеристик имеет большие перспективы и представляет интерес. Например, практическому изучению термоэлектрических эффектов с помощью микроконтроллера ОВЕН уже посвящены лаборатор-

ные практикумы [11, 12].

В данной работе рассмотрены вопросы, возникающие при исследовании термоэлектрических элементов с помощью аппаратно-программной платформы Arduino. В частности, аналогичные проблемы описаны в работах [13, 14].

Основные результаты

Так как, как правило, эффект Пельтье используется в системах охлаждения, то вводится показатель эффективности работы термоэлектрического охладителя, называемый коэффициентом производительности. Эту величину можно получить следующим образом (см., например, [11, 15]). Считая, что тепловые и электрические свойства материалов не изменяются, количество теплоты Q_c на стороне охлаждения (на холодной стороне термоэлемента) и количество теплоты на горячей стороне Q_h могут быть представлены выражениями:

$$Q_c = [\alpha T_c I - (I^2 R)/2 - K(T_h - T_c)]t, \quad (1)$$

$$Q_h = [\alpha T_h I - (I^2 R)/2 - K(T_h - T_c)]t, \quad (2)$$

где в квадратных скобках первое слагаемое связано с теплом эффекта Пельтье, второе слагаемое – это джоулево тепло, третье слагаемое представляет закон Ньютона-Рихмана; R, K и α – полное сопротивление, коэффициент теплоотдачи (теплопоглощения) и коэффициент термо-ЭДС (коэффициент Зеебека, αT_c – коэффициент Пельтье) соответственно, t – время.

Из формул (1) и (2) получаем коэффициент производительности (эффективность) термоэлемента Пельтье:

$$(COP)_{c,\max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1+ZT_m} - T_c/T_h}{\sqrt{1+ZT_m}+1}, \quad (3)$$

где ZT_m – показатель качества термоэлектрического материала при средней температуре горячей и холодной стороны $T_m = \frac{T_h + T_c}{2}$. Отметим, что впервые разработал теорию термоэлектрического качества материала А.Ф. Иоффе [4, 5]. Он представил этот коэффициент в виде

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k}, \quad (4)$$

где α – коэффициент Зеебека, σ – электропроводность и k – теплопроводность. Формулу (4) представляют через безразмерную величину $ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T$.

Используя формулу (3), можно провести теоретическое исследование зависимости эффективности термоэлемента Пельтье как охлаждающей установки, которые можно сравнивать с опытными данными. На рисунке 1 построены графики зависимости эффективности (КПД охлаждающей системы) от качества материала ZT_m. Можно сделать вывод, что большее значение ZT_m приводит к повышению эффективности термоэлектрического охлаждения на основе эффекта Пельтье. Например, при ZT_m=3,0 и ΔT=20 К $(COP)_{c,\max}$ может достигать 5%.

Для автоматизации процесса измерения электрических характеристик термоэлектрического преобразователя – элемента Пельтье была выбрана аппаратно-программная платформа Arduino. При этом снимались характеристики широко представленного на рынке элемента Пельтье TEC1-12706. Характеристики, применение, условия эксплуатации этого прибора представлены на сайтах [16, 17]. (См. также таблицу 1.)

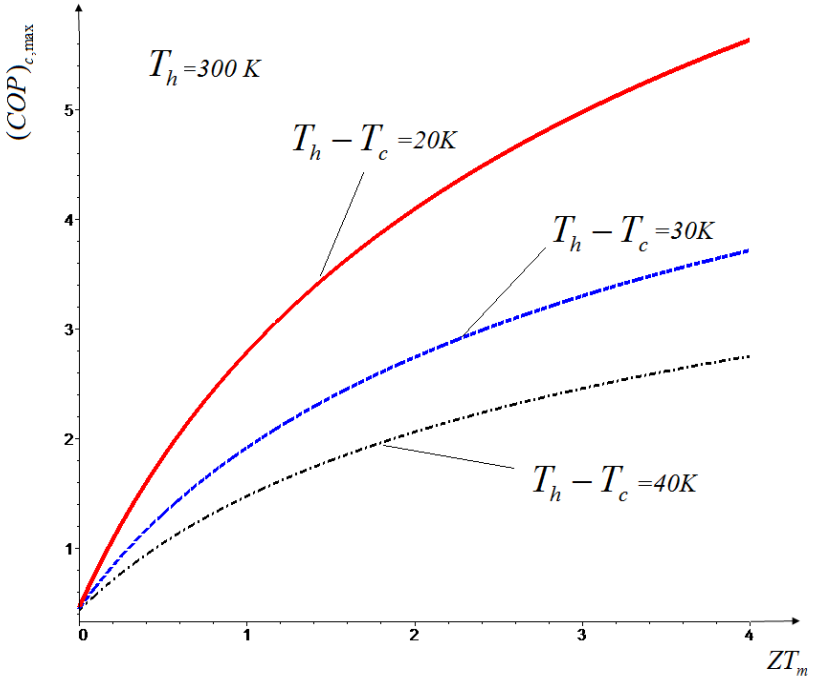

Рис. 1. Зависимости эффективности от показателя качества материала ZT_m, из которого сделан термоэлемент Пельтье (здесь K – Кельвин)
Fig. 1. Performance dependencies on material quality indicator ZT_m, from which the Peltier thermoelement is made (here K – Kelvin)

Таблица 1

Заявленные производителем технические параметры элемента Пельтье TEC1-12706
Table 1. Manufacturer declared technical parameters of Peltier element TEC1-12706

Обозначение	Параметр	Значение, при температуре горячей стороны	
		25°C	50°C
Q_{max}	Холодопроизводительность	50 Вт	57 Вт
ΔT_{max}	Разность температур	66°C	75°C
I_{max}	Максимальный ток	6,4 А	6,4 А
U_{max}	Максимальное напряжение	14,4 В	16,4 В
R	Сопротивление	1,98 Ом	2,3 Ом

Чтобы провести измерения, необходимо было подавать на элемент Пельтье определенное постоянное напряжение, которое изменялось бы дискретно, а возникающий ток измерялся бы амперметром. Первая проблема, которая возникла при организации и проведении эксперимента, заключалась в необходимости стабильного и высокоточного источника питания, который подавал бы на элемент Пельтье напряжение от –10 до +10 В. При этом ток не должен был быть весьма большим, до 5 А, чтобы не испортить элемент. Вторая проблема связана с методикой проведения эксперимента. Дело в том, что на элемент Пельтье нельзя подавать быстро меняющееся напряжение, так как это может разрушить *p-n* переходы полупроводника. Поэтому постепенное изменение подаваемого напряжение должно быть включено в методику выполнения работы.

Так как эта платформа Arduino позволяет довольно точно производить измерения в короткие промежутки времени и выводить данные на экран компьютера, то для измерения подаваемого напряжения и тока было решено использовать вольтметр и амперметр, выполненные на ее базе. Прекрасное описание вольтметра и амперметра на Arduino дано в [18–20]. К тому же изучение и применение платформы Arduino носит учебно-методический характер.

Изготовление вольтметра на базе Arduino. Так как в этой платформе уже есть встроенные аналого-цифровые преобразователи от 0 до 5 Вольт, нам оставалось только изготовить делитель напряжения, чтобы расширить диапазон измеряемого напряжения. Для запаса прочности мы изготовили делитель напряжения, который позволял измерять от 0 до 50 Вольт. Схема делителя представлена на рисунке 2.

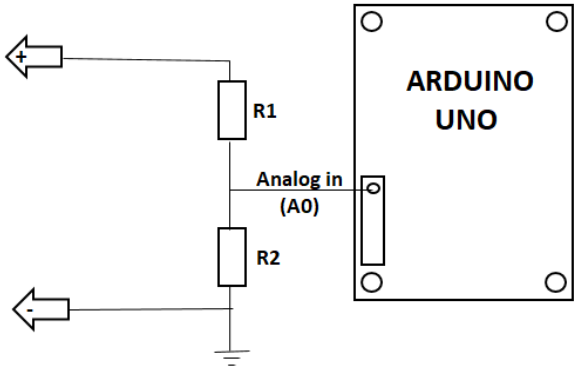

Рис. 2. Электрическая принципиальная схема делителя напряжения.
Здесь R_1=100 кОм, R_2=10 кОм
Fig. 2. Electrical circuit diagram of voltage divider.
Here R_1=100 kOhm, R_2=10 kOhm

Изготовление амперметра на базе Arduino. Для изготовления амперметра мы включили в цепь мощный (20 Ватт) резистор маленького номинала (1 Ом), чтобы не влиять на измеряемый ток. Затем изготовили еще два вольтметра по аналогии с основным. И измеряли напряжение на обоих концах этого резистора, чтобы узнать, какое напряжение падает на нем. Сопротивление этого малого участка цепи знаем, напряжение измеряем, а ток находим по закону Ома. Таким образом, был реализован амперметр.

Перед началом использования были определены погрешности изготовленных вольтметра и амперметра.

Выполненные на базе Arduino вольтметр и амперметр были подключены к источнику питания и элементу Пельтье по схеме, представленной на рисунке 3.

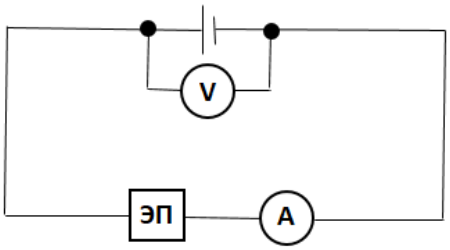

Рис. 3. Общая электрическая схема по изучению характеристик элемента Пельтье
Fig. 3. General electrical diagram of Peltier element characteristics

На первом этапе была рассмотрена вольт-амперная характеристика элемента Пельтье. На втором этапе – взаимосвязь между подаваемой мощностью и температурой на обкладках.

Измерение температуры на пластинах элемента Пельтье производилось двумя датчиками температуры DS18B20. Они имеют высокую точность измерения, широкий диапазон измеряемых температур и компактность. Единственный их недостаток – это сложность реализации процесса получения (снятия) данных.

Для автоматизации процесса измерения был использован адаптированный текст программы, написанный на языке C Wiring, использующийся Arduino:

```
#include <OneWire.h>
#define POWER_MODE  0 // определение режима питания датчиков, 0 - внешнее
OneWire sensDs (13); // функция библиотеки OneWire для подключения датчика к т. 13
OneWire sensDs2 (12); // функция библиотеки OneWire для подключения датчика к т. 12

byte bufData[9];  // буфер данных
float temperature;  // измеренная температура

int analogInput=14;// вольтметр
float vout=0.0;
float vin=0.0;
float R1=100000.0;
float R2=10040.0;
int value=0;
// амперметр 1 половина
int analogInput1=15;// амперметр 1
float vout1=0.0;
float vin1=0.0;
float Rr1=100100.0;
float Rr2=10000.0;
int value1=0;
// амперметр 2 половина
int analogInput2=16;// амперметр 2
float vout2=0.0;
float vin2=0.0;
float Rrr1=100100.0;
float Rrr2=9980.0;
int value2=0;

float I=0.0;//ток

void setup() {
pinMode(analogInput, INPUT);
pinMode(analogInput1, INPUT);
pinMode(analogInput2, INPUT);
Serial.begin(9600); //Открываем монитор порта
Serial.println("t1,  t2,     V,      vin1,   vin2,   I");
}

void loop() {
//termometr1
  sensDs.reset();  // выполнение сброса шины  до связи с устройством
  sensDs.write(0xCC, POWER_MODE); // пропуск ROM
  sensDs.write(0x44, POWER_MODE); // инициализация измерения
  delay(900);  // пауза 0,9 сек
  sensDs.reset();  // сброс шины
  sensDs.write(0xCC, POWER_MODE); // пропуск ROM
  sensDs.write(0xBE, POWER_MODE); // команда чтения памяти датчика
  sensDs.read_bytes(bufData, 9);  // чтение памяти датчика, 9 байтов
  if ( OneWire::crc8(bufData, 8) == bufData[8] ) {  // проверка кода CRC
    // данные правильные
    temperature=  (float)((int)bufData[0] | (((int)bufData[1]) << 8)) * 0.0625 + 0.03125;
 // передача температуры на компьютер
```

```
    Serial.print(temperature);
    Serial.print(" ");
  }

   //termometr2
  sensDs2.reset();  // сброс шины
  sensDs2.write(0xCC, POWER_MODE); // пропуск ROM
  sensDs2.write(0x44, POWER_MODE); // инициализация измерения
  delay(900);  // пауза 0,9 сек
  sensDs2.reset();  // сброс шины
  sensDs2.write(0xCC, POWER_MODE); // пропуск ROM
  sensDs2.write(0xBE, POWER_MODE); // команда чтения памяти датчика
  sensDs2.read_bytes(bufData, 9);  // чтение памяти датчика, 9 байтов
  if ( OneWire::crc8(bufData, 8) == bufData[8] ) {  // проверка CRC
    // данные правильные
    temperature=  (float)((int)bufData[0] | (((int)bufData[1]) << 8)) * 0.0625 + 0.03125;
 // передача температуры на компьютер
    Serial.print(temperature);
    Serial.print(" ");
  }

  // volbtmetr
value=analogRead(analogInput);
vout=(value*5.01)/1024.0;
vin=vout/(R2/(R1+R2));
if (vin<0.09){
  vin=0.0;
}
//ampermetr 1 polovina
value1=analogRead(analogInput1);
vout1=(value1*5.01)/1024.0;
vin1=vout1/(Rr2/(Rr1+Rr2));
if (vin1<0.09){vin1=0.0;}

//ampermetr 2 polovina
value2=analogRead(analogInput2);
vout2=(value2*5.01)/1024.0;
vin2=vout2/(Rrr2/(Rrr1+Rrr2));
if (vin2<0.09){vin2=0.0;}
I=(vin1-vin2)/10.0;//nahodim tok
Serial.print(vin,3);
Serial.print(" ");
Serial.print(vin1,3);
Serial.print(" ");
Serial.print(vin2,3);
Serial.print(" ");
Serial.println(I,3);
delay(500);
}
```

При определении вольт-амперных характеристик было проведено сравнение данных, выдаваемых программой микроконтроллера Ардуино, с данными высокоточного источника питания. Погрешность показаний Ардуино составила менее одного процента – 0,35%. Поэтому калибровочный коэффициент не понадобился. При более

высокой погрешности калибровочный коэффиент необходимо выбрать равным 0,02.

Полученные данные показали, что вольт-амперные характеристики практически линейны (см. рис. 4). Но при повышении напряжения сопротивление элемента немного повышается. Это можно объяснить нагревом элемента.

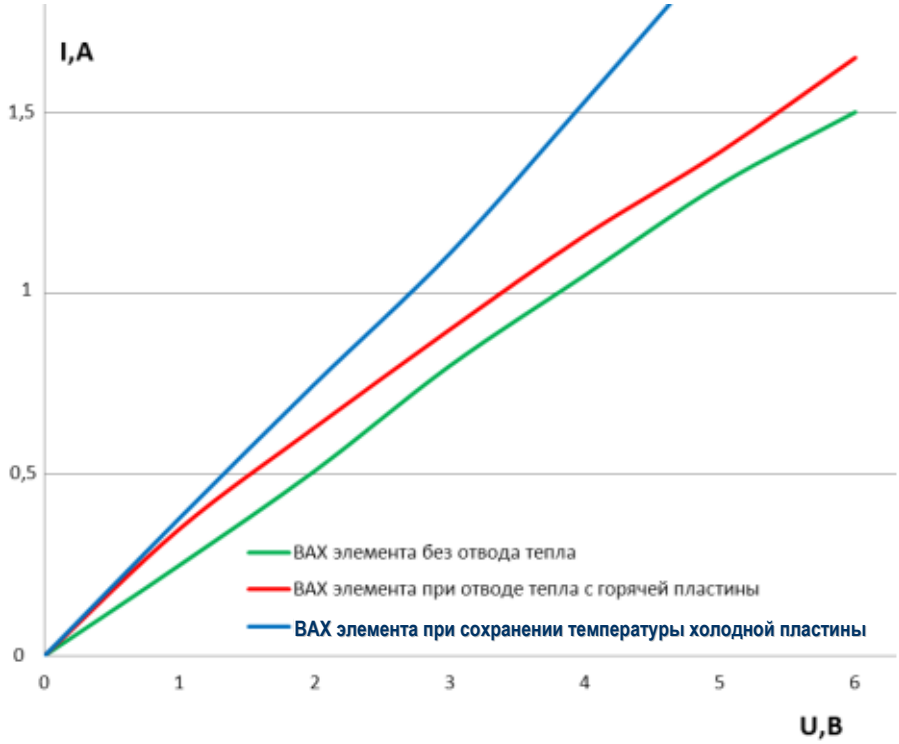

Рис. 4. Вольт-амперные характеристики элемента Пельтье TEC1-12706
Fig. 4. Volt-ampere characteristics of the Peltier element TEC1-12706

В силу определенных неудобств и режима работы датчики температуры DALLAS DS18B20 были заменены на датчики LM35 ZD. Для систематизации и проверки получаемых данных были использованы резисторы различного наминала сопротивления и допустимой максимальной мощности. При измерении температуры обеих сторон элемента Пельтье использовался резистор для внутреннего сопротивления амперметра 0,1 Ом и 10 Вт. Элемент Пельтье был присоединен с помощью термопасты к радиатору нагревающейся стороной. Измерение одной ступени для продолжительности получения данных и наблюдения работы элемента Пельтье продолжалось 63 секунды.

Перед отключением элемента Пельтье от питания разность температур составляла 33°С. После отключения питания от элемента Пельтье уже через одну минуту разность температур между горячей и холодной стороной составила около 6°С. Через три минуты после отключения – около 3°С.

Также для тестирования разницы температур сторон элемента Пельтье использовался температурный пистолет. Но при измерении температуры режимом «поверхность» большой угол захвата поверхности давал большую погрешность и неточность измерений, а при точечном измерении режимом «тело» было ограничение диапазона измерений от 35°С до 40°С. В результате была получена графическая зависимость разности температур на «горячей» и «холодной» поверхностях термоэлемента от напряжения, предтавленная на рисунке 5.

Из графиков следует, что преимущество использования элемента Пельтье заключается в возможности охлаждения существенно ниже температуры окружающего воздуха. Однако для этого необходимо обеспечить интенсивный отвод тепла от его горячей пластины.

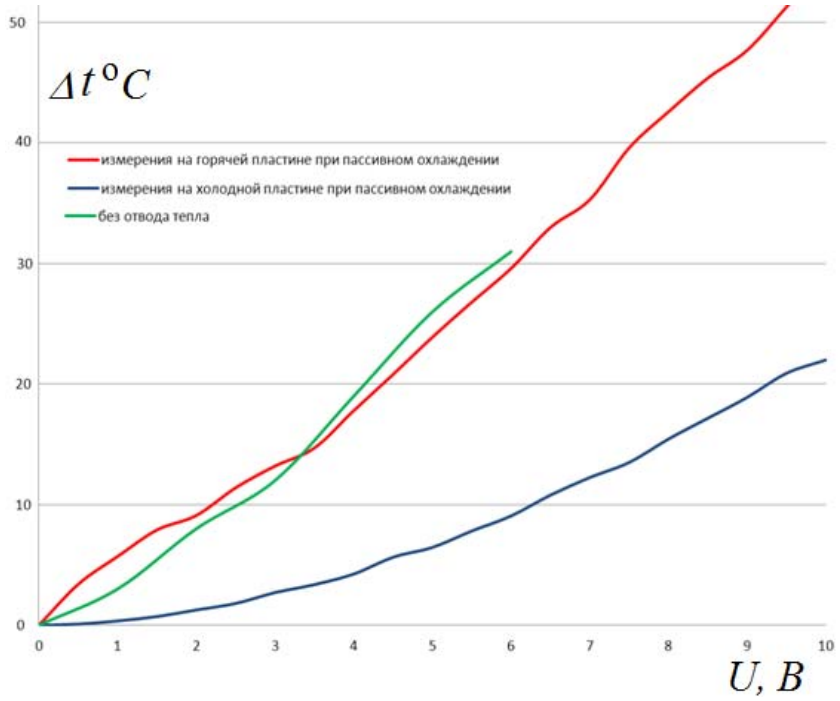

Рис. 5. Зависимость разности температур на «горячей» и «холодной» поверхностях термоэлемента от напряжения

Fig. 5. Temperature difference dependence at “hot” and “cold” surfaces of thermoelement on voltage

Также была определена зависимость разности температур между «горячей» и «холодной» поверхностями элемента Пельтье от электрической мощности (см. рис. 6.).

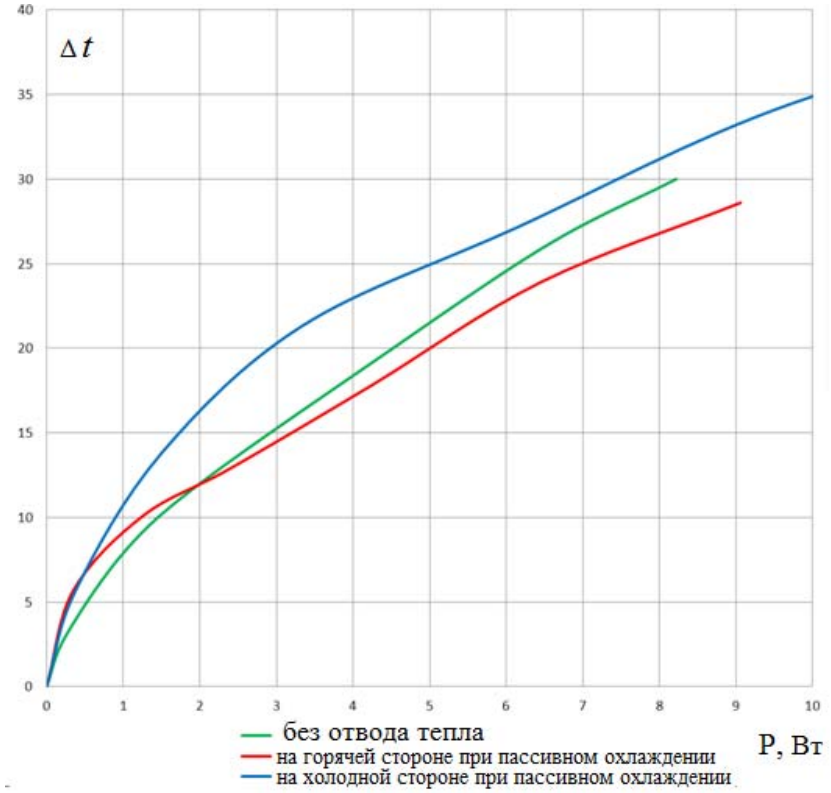

Рис. 6. Зависимость разности температур между «горячей» и «холодной» поверхностями элемента Пельтье от электрической мощности

Fig. 6. Temperature difference dependence between “hot” and “cold” surfaces of Peltier element on electric power

На основе анализа представленных графиков рисунка 6 можно сделать вывод о снижении эффективности термоэлемента с ростом потребляемой мощности.

Кроме этого, были определены КПД элемента и проверена зависимость эффективности термоэлемента от показателя качества материала ZT_m, из которого сделан термоэлемент Пельтье для 4-х случаев. В общем, картина соответствовала рисунку 1.

Заключение

В этом исследовании представлен простой и экономичный физический эксперимент на базе Arduino, в котором исследуются зависимости разности температур на сторонах конкретного элемента Пельтье TEC1-12706 от напряжения и мощности, вольт-амперные характеристики, КПД. Для измерения зависимостей использовались плата Arduino, датчики температуры DALLAS DS18B20 и LM35 ZD, вольтметр и амперметр Arduino.

Полученные экспериментальные данные подтвердили известные закономерности и характеристики, заявленные производителем. Проведенное исследование позволяет разработать полностью автоматизированную лабораторную работу для студентов. С помощью этой работы студент может легко наблюдать зависимости температур на платинах элемента Пельтье от напряжения, мощности, проводить необходимые вычисления. Устройство на базе Arduino представляет собой простую и недорогую альтернативу имеющимся на рынке физическим лабораторным комплексам.

Примечания

1. Peltier J. Nouvelles expériences sur la caloricité des courants électrique [New experiments on the heat effects of electric currents] // Annales de Chimie et de Physique (in French). 1834. Vol. 56. P. 371–386.

2. Seebeck T.I. Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz // Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (in German). 1822. S. 265–373.

3. Thomson W. On a mechanical theory of thermo-electric currents // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. 1851. Vol. 3 (42). P. 91–98.

4. Термоэлектрическое охлаждение / А.Ф. Иоффе [и др.]. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1956. 114 с.

5. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1960. 189 с.

6. Yu Xiao, Li-Dong Zhao. Seeking new, highly effective thermoelectrics // Science. 2020. Vol. 367 (6483). P. 1196–1197.

7. Afshari F. Experimental and numerical investigation on thermoelectric coolers for comparing air to water to air to air refrigerators // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Vol. 144. P. 855–868.

8. Охрем В.Г. Расчетная модель холодильного элемента Пельтье // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. С. 299–304.

9. Freer R., Powell A.V. Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap // J. Mater. Chem. C. 2020. Vol. 8. P. 441–463.

10. Пономаренко В.И., Караваев А.С. Использование платформы ARDUINO в измерениях и физическом эксперименте // Известия вузов «ПНД». 2014. Т. 22, № 4. С. 77–90.

11. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора: лаб. практикум / В.Н. Белозерцев, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шиманов. Самара: Изд-во СГАУ, 2015. 76 с.

12. Рогожников Г.С. Прикладные физико-технические и компьютерные методы исследований. Онлайн практикум по программированию устройств управления физическим экспериментом: пособие для высш. учеб. заведений. Саров, 2021. 15 с.

13. Андреев А.Н., Андреева О.Н., Лазаренко А.Г. Автоматизированный комплекс для градуировки терморезисторов и измерений их параметров // Радиотехника. 2018. Вып. 194. С. 133–137.

14. Sarı U., Kırındı T. Using arduino in physics teaching: arduino-based physics experiment to

study temperature dependence of electrical resistance // Journal of Computer and Education Research. 2019. No. 7 (14). P. 698–710.

15. Terasaki I. Introduction to thermoelectricity in book Materials for Energy Conversion Devices. A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials / edited by: Charles C. Sorrell, Sunao Sugihara, Janusz Nowotny. Abington (England), 2005. P. 339–344.

16. Элемент Пельтье TEC1-12706. Характеристики, применение, условия эксплуатации. URL: http://mypractic.ru/element-pelte-tec1-12706-xarakteristiki-primenenie-usloviya-ekspluatacii.html

17. Элемент Пельтье. URL: https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/element-pelte/; http://mypractic.ru/urok-13-analogovye-vxody-platy-arduino-chtenie-analogovyx-signalov-izmerenie-srednego-znacheniya-signala.html

18. Простой вольтметр на Arduino Uno. URL: https://microkontroller.ru/arduino-projects/prostoj-voltmetr-na-arduino-uno/

19. Цифровой амперметр на основе Arduino Uno. URL: https://microkontroller.ru/arduino-projects/czifrovoj-ampermetr-na-osnove-arduino-uno/

20. Делаем амперметр с использованием Ардуино. URL: https://arduinoplus.ru/delaem-ampermetr-arduino/

References

1. Peltier J. Nouvelles expériences sur la caloricité des courants électrique [New experiments on the heat effects of electric currents] // Annales de Chimie et de Physique (in French). 1834. Vol. 56. P. 371–386.

2. Seebeck T.I. Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz // Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (in German). 1822. S. 265–373.

3. Thomson W. On a mechanical theory of thermo-electric currents // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. 1851. Vol. 3 (42). P. 91–98.

4. Thermoelectric cooling / A.F. Ioffe [et al.]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956. 114 p.

5. Ioffe A.F. Semiconductor thermoelements. Moscow; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960. 189 p.

6. Yu Xiao, Li-Dong Zhao. Seeking new, highly effective thermoelectrics // Science. 2020. Vol. 367 (6483). P. 1196–1197.

7. Afshari F. Experimental and numerical investigation on thermoelectric coolers for comparing air to water to air to air refrigerators // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Vol. 144. P. 855–868.

8. Okhrem V.G. The design model of the Peltier refrigeration element // Advances in Applied Physics. 2017. Vol. 5. P. 299–304.

9. Freer R., Powell A.V. Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap // J. Mater. Chem. C. 2020. Vol. 8. P. 441–463.

10. Ponomarenko V.I., Karavaev A.S. Using the ARDUINO platform in measurements and physical experiment // News of Higher Schools “PND”. 2014. Vol. 22, No. 4. P. 77–90.

11. Study of the main characteristics of the thermoelectric cooler and generator: lab. workshop / V.N. Belozertsev, S.O. Nekrasova, D.V. Sarmin, D.A. Uglanov, A.A. Shimanov. Samara: SSAU Publishing House, 2015. 76 p.

12. Rogozhnikov G.S. Applied physical-technical and computer research methods. Online workshop on programming control devices for a physical experiment: a manual for higher schools. Sarov, 2021. 15 p.

13. Andreev A.N., Andreeva O.N., Lazarenko A.G. Automated complex for thermistors calibration and measurement of their parameters // Radio Engineering. 2018. Iss. 194. P. 133–137.

14. Sarı U., Kırındı T. Using arduino in physics teaching: arduino-based physics experiment to study temperature dependence of electrical resistance // Journal of Computer and Education Research. 2019. No. 7 (14). P. 698–710.

15. Terasaki I. Introduction to thermoelectricity in book Materials for Energy Conversion Devices. A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials / edited by: Charles C. Sorrell, Sunao Sugihara, Janusz Nowotny. Abington (England), 2005. P. 339–344.

16. Peltier element TEC1-12706. Characteristics, application, operating conditions. URL: http://mypractic.ru/element-pelte-tec1-12706-xarakteristiki-primenenie-usloviya-ekspluatacii.html

17. Peltier element. URL: https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/element-pelte/; http://mypractic.ru/urok-13-analogovye-vxody-platy-arduino-chtenie-analogovyx-signalov-izmerenie-

srednego-znacheniya-signala.html
18. A simple voltmeter on the Arduino Uno. URL: https://microkontroller.ru/arduino-projects/prostoj-voltmetr-na-arduino-uno/
19. Digital ampermeter based on Arduino Uno. URL: https://microkontroller.ru/arduino-projects/czifrovoj-ampermetr-na-osnove-arduino-uno/
20. We make an ampermeter using Arduino. URL: https://arduinoplus.ru/delaem-ampermetr-arduino/

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 11.12.2021.

The article was submitted 11.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 11.12.2021.

© Ш.Т. Меретуков, С.В. Полякова, С.К. Меретукова, 2021