

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 537.322.15

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-33-41

Оригинальная статья /Original Paper

Оптимизация термоэлектрических систем контроля температуры

А.И. Семиляк, Т.Э. Саркаров, Д.В. Евдулов, К.К. Назаров

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методов регулирования температуры с помощью элемента Пельтье в заданном диапазоне температур. **Метод.** Применен способ нагрева с использованием элемента Пельтье в устройстве контроля температуры небольшой пластины путем регулирования тока и с применением охлаждающего вентилятора для уменьшения инерционности. **Результат.** Получена методика управления элементом Пельтье для поддержания необходимой температуры, которая осуществляется с помощью метода ШИМ, генерируемым процессором ATmega2560. Н-мост на интегральной микросхеме L6203 переключает направление тока и может управлять током до 5А на элементе Пельтье с использованием сигнала ШИМ. **Вывод.** Полученный алгоритм управления обеспечивает увеличение тока нагрева на Пельтье до тех пор, пока температура не повысится до заданного высокого значения температуры, а затем, путем изменения направления тока создается ток охлаждения на элементе Пельтье пока температура медной пластины не снизится до заданной низкой температуры. При многократном повторении этой последовательности, отслеживается закономерность изменения температуры для исследования процесса нагрева и охлаждения пластины с помощью элемента Пельтье.

Ключевые слова: элемент Пельтье, эффект Зеебека, термоэлектрический элемент, термо-ЭДС, широтно-импульсная модуляция (PWM).

Для цитирования: А.И. Семиляк, Т.Э. Саркаров, Д.В. Евдулов, К.К. Назаров. Оптимизация термоэлектрических систем контроля температуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):33-41. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-33-41

Optimization of thermoelectric temperature control systems

A.I. Semilyak, T.E. Sarkarov, D.V. Evdulov, K.K. Nazarov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to study the methods of temperature control using the Peltier element in a given temperature range. **Method.** A heating method is applied using a Peltier element in a temperature control device of a small plate by regulating the current and using a cooling fan to reduce inertia. **Result.** A technique for controlling the Peltier element to maintain the required temperature is obtained, which is carried out using the PWM method generated by the ATmega2560 processor. The H-bridge on the L6203 integrated circuit switches the current direction and can control the current up to 5A on the Peltier element using a PWM signal. **Conclusion.** The resulting control algorithm provides an increase in the heating current on the Peltier until the temperature rises to a predetermined high temperature value, and then by changing the direction of the current, a cooling current is created on the Peltier element until the temperature of the copper plate drops to a predetermined low temperature. With repeated repetition of this sequence, the regularity of temperature changes is monitored to study the process of heating and cooling the plate using the Peltier element.

Keywords: Peltier element, Seebeck effect, thermoelectric element, thermo-EMF, pulse width modulation (PWM).

For citation: A.I. Semilyak, T.E. Sarkarov, D.V. Evdulov, K.K. Nazarov. Optimization of thermoelectric temperature control systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 33-41. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-33-41

Введение. Развитие современных технологий тесно связано с поиском новых источников электрической энергии. Если раньше главным требованием являлось увеличение объема выработки электрической энергии, то в настоящее время на передний план выходит требование выработки возобновляемой энергии экологически чистым путем. В настоящее время усилия ученых и технологов направлены на развитие возобновляемой энергетики, в которой остро нуждаются все страны [1].

Явление термоэлектрического эффекта заключается в генерировании термоэлектродвижущей силы, которая возникает из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов, образующих часть одной и той же цепи. В таких устройствах генерации электрической энергии тепловая энергия непосредственно преобразуется в электрическую энергию, промежуточное звено в виде механической энергии в них отсутствует, что выгодно отличает их от обычных электроэнергетических систем. Большое количество отработавшей тепловой энергии в виде тепловых потоков в промышленности и сфере ЖКХ просто выбрасывается в окружающую среду без ее дальнейшего использования.

Элемент Пельтье является простейшим термоэлектрическим преобразователем тепловой энергии в электрическую, и наиболее эффективным инструментом для создания установок использования тепловой энергии. Использование модулей Пельтье дает возможность прямого преобразования энергии теплового потока в электрическую энергию (твердотельные генераторы электрической энергии) и наоборот (термоэлектрические холодильники), при этом их работа в режиме генерации электрической энергии зависит только от наличия перепада температур [2].

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) являются экологически чистым источником электрической энергии и позволяют получить с одного генераторного модуля электрическую энергию мощностью до 40 Вт. Использование термоэлектрических модулей позволяет получить ряд преимуществ, таких как экологическая чистота, отсутствие движущихся частей, бесшумность работы, небольшой размер и вес, высокая надежность, устойчивость к механическим воздействиям, возможность работы в любом пространственном положении. Кроме того, твердотельные герметичные конструкции на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ) позволяют отводить тепло из герметично закрытых объемов радиоэлектронной аппаратуры.

Применение модулей Пельтье в приводах на основе гидридов металлов является весьма актуальным, так как материалы на основе гидридов металлов хранят большое количество водорода и могут реализовывать преобразование энергии за счет изменения энтальпии посредством гидридной реакции. Приводные системы, использующие это особое физико-химическое свойство, называются металлгидридными приводами. Эти приводы используют механическую энергию, образованную из равновесного давления водорода, через тепловую энергию, передаваемую сплавам гидридов металлов в качестве выхода. Металлогидридные приводы обладают простой конструкцией и имеют ряд особенностей, которые делают их весьма перспективными для применения в реабилитационной технике и других вспомогательных технологиях. Они являются экологически безопасными и обеспечивают высокое отношение мощности к весу, высокое усилие срабатывания, совместимую с человеком мягкость и бесшумность. Использование металлгидридных приводов весьма полезно для общих приложений человеко-машинного интерфейса. Применение искусственных мышечных приводов на основе металлгидридов, с использованием микро-

контроллерных систем управления, для их применения в технологиях повышения качества жизни также является весьма перспективным [1,3,5].

Во многих странах проводятся исследования в области применения термоэлектрического охлаждения и выработки электроэнергии с использованием элемента Пельтье.

Постановка задачи. В данной работе исследуется регулирование температуры медной пластины с помощью элемента Пельтье в заданном диапазоне температур. Текущее управление элементом Пельтье достигается с помощью метода ШИМ с управлением параметрами с помощью обратной связи. Управление объектом с помощью ШИМ можно реализовать различными способами, например с помощью таймеров микроконтроллера или с использованием ПИД-регулятора. Система, выполняющая пропорциональное, интегрирующее и дифференциальное управление носит название системы пропорционально-интегрально-дифференциального управления, или сокращенно системы ПИД управления. Система ПИД управления добавляет в систему дополнительный вход, несущий информацию о предыдущем состоянии системы.

На рис.1 показана структурная схема системы ПИД-управления. Разница между заданной и измеряемой величинами усиливается. Производная и интеграл усиленной разности суммируются с усиленным сигналом ошибки, формируя сигнал на выходе. [2,4]

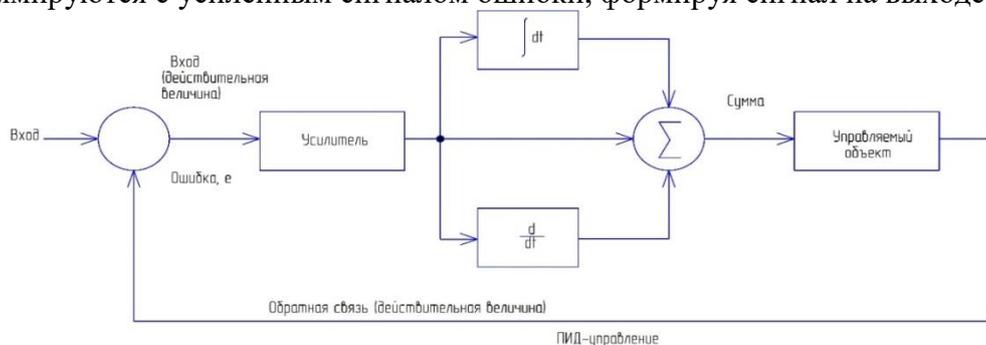


Рис.1. Система ПИД-управления
Fig.1. PID control system

Общая формула для ПИД-систем выглядит следующим образом:

$$Output = G \cdot (e + I \cdot \int edt + D \cdot \frac{de}{dt}), \quad (1)$$

где G – это усиление (Gain),

e – ошибка управления, то есть разность между требуемой и действительной величиной (error),

I – прибавляемая величина интеграла ошибки (Integral),

D – прибавляемая величина производной ошибки (Derivative).

Если I и D равны нулю, то получаем: $G \times e$, формулу пропорционального управления. Если I и D равны нулю, а G настолько велико, что выходной сигнал доходит до насыщения, получаем релейную систему управления. Как и в системах с пропорциональным регулированием, в ПИД-системах иногда требуется знать некоторое смещение, которое может в данном случае как прибавляться, так и вычитаться.

От системы с пропорционального управления, система ПИД-управления отличается дополнительными вычислениями интеграла и производной. Это уже зависимые от времени параметры: интеграл вычисляется за некоторый период времени, а производная – разность между состояниями в соседних временных интервалах [6,7].

Для управления нагревом и охлаждением пластины с применением модулей Пельтье будут использоваться элементы, управление которыми осуществляется с помощью метода широтно-импульсной модуляции цифровых выходов микроконтроллера. Использование ПИД-регулятора позволяет генерировать ШИМ сигналы в соответствии с обратной связью по входному сигналу датчика температуры. Хотя ПИД-регулирование может быть эффективно реализовано с помощью нескольких операционных усилителей, резисторов и конденсаторов, цифровое управление предлагает много преимуществ по сравне-

нию с аналоговым управлением. Микропроцессоры нечувствительны к изменениям температуры и позволяют избежать проблем, связанных со старением и дрейфом. Цифровое управление также позволяет легко и точно настраивать контроллер в программном обеспечении, в отличие от более трудоемкой и менее воспроизводимой настройки аналогового управления. Это также означает, что один контроллер можно спроектировать и использовать на нескольких платформах без необходимости значительных изменений компонентов и перепроектирования. Низкие требования к пропускной способности контроллера означают, что можно использовать микроконтроллер с низкой производительностью [8,9,10].

Алгоритм ПИД обеспечивает быструю реакцию с обратной связью на ступенчатые изменения температуры и гарантирует, что конечная температура пластины будет соответствовать заданному значению температуры, а также снижает переходные выбросы и колебания температуры при изменении заданного значения с одного значения на другое.

Элемент Пельтье используется в устройстве контроля температуры небольшой пластины путем регулирования тока и с использованием охлаждающего вентилятора для уменьшения инерционности. Устройство должно обеспечивать в течение 1 минуты увеличение температуры от 25 °С до 73 °С и затем уменьшать ее от 73 °С до 43 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С [11,15,16]. Если между двумя металлами возникает разность электрических потенциалов, то электроны в металлах начинают двигаться и кинетическая энергия электрона преобразуется в тепловую в элементе Пельтье. Элемент Пельтье может передавать тепло между двумя металлами при протекании тока и наоборот, (эффект Зеебека) если есть разница температур, то ток течет между двумя металлами. Если полупроводник n-типа подключен к плюсу, а полупроводник p-типа, подключен к минусу, то течет ток от полупроводника n-типа к полупроводнику p-типа, и это приводит к поглощению тепла от нижнего бокового электрода и отводу тепла к верхнему боковому электроду.

Величина тепловой передачи элемента Пельтье пропорциональна зарядному току и определяется уравнением (2).

$$Q = \pi I \quad (2)$$

где π – коэффициент Пельтье, связанный с охлаждением и теплоемкостью на стыке металла.

Если температура горячей стороны равна T_h , а температура холодной стороны равна T_c , то теплота, выделяемая на горячей стороне, равна $\alpha_e I T_h$, а теплота, поглощаемая на холодной стороне – это $\alpha_e I T_c$, где α_e – итоговый коэффициент Зеебека, то есть сумма коэффициентов p, n полупроводника $\alpha_e = (\alpha_p + |\alpha_n|)$. Если ток I поступает на элемент Пельтье, то тепло, выделяемое в связи с эффектом Джоуля, равно $I^2 r_e$, где r_e – сумма омических сопротивлений p-n полупроводника $r_e = (r_p + r_n)$.

Предполагается, что половина тепла Джоуля течет на горячую сторону и холодную сторону соответственно. Если суммирование теплопроводности p-n полупроводника равно $k_e = (k_p - k_n)$, то тепло передается от горячей стороны к холодной стороне как количество $k_e(T_h - T_c)$. Если n - количество модулей термоэлектрического охладителя в Элемент Пельтье, то поглощение тепла на низкотемпературной стороне определяется уравнением (3), а тепловыделение на горячей стороне определяется уравнением (4).

$$|Q_c| = n \left\{ \alpha_e I T_c - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e (T_h - T_c) \right\}, \quad (3)$$

$$|Q_h| = n \left\{ \alpha_e I T_h - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e (T_h - T_c) \right\}, \quad (4)$$

Коэффициент производительности (COP) элемента Пельтье определяется по уравнению (5)

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{\alpha_e I T_c - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e \Delta T_{hc}}{I^2 r_e + \alpha_e I T_{hc}} \quad (5)$$

Методы исследования. Управление элементом Пельтье осуществляется с помощью метода ШИМ, которая генерируется процессором ATmega2560, а Н-мост на интегральной микросхеме L6203 или L298 переключает направление тока и может управлять током от 4А до 5А на элементе Пельтье с использованием сигнала ШИМ. Шунт с сопротивлением 0,1 Ом последовательно подключен к мосту L6203 и снятое с него напряжение усиливается ОУ К140УД22 с коэффициентом усиления 20...30 и затем выпрямляется LC-фильтром.

Таким образом, измеренный ток поступает в аналоговый входной порт микропроцессора, который сравнивает его значение с эталонным значением. Резонансная частота LC-фильтра равна $f=1/2\pi(LC)^{1/2} = 91,8$ Гц и примерно в десять раз меньше, чем частота ШИМ 0,976 кГц, что позволяет преобразовывать импульс ШИМ в постоянное напряжение при значении сопротивления демпфирования $R=180$ Ом.

Цифровой датчик температуры DS18B20 используется для измерения температуры медной пластины, измеренное значение температуры в качестве сигнала обратной связи подается по цифровому входу на порт ATmega2560. Технические характеристики датчика температуры и модуля Пельтье приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики датчика температуры и модуля Пельтье
Table 1. Specifications of temperature sensor and Peltier module

Элемент Пельтье Peltier element		Датчик температуры Temperature sensor	
TEC1-12705		DS18B20	
Размер (мм) Size (mm)	40×40×3,6	Диапазон Range	-55°C÷125°C
Максимальное напряжение питания Maximum supply voltage	15,4 В	Точность Accuracy	±0,5 °C (в пределах -10... +85 °C)
Номинальная сила тока Rated current	5 А	Интерфейс Interface	1-Wire
Максимальная разность температур Maximum temperature difference	60°C	Разрешение Permission	9/10/11/12 бит

ATmega2560 получает сигналы измеренных значений температуры и тока и генерирует ШИМ сигнал для управления током элемента Пельтье, а также генерирует сигналы для контроля направления тока и для управления вентилятором ВКЛ/ВЫКЛ с запрограммированной схемой и временем выборки 0,1 сек. Блок-схема экспериментальной установки устройства приведена на рис.2.

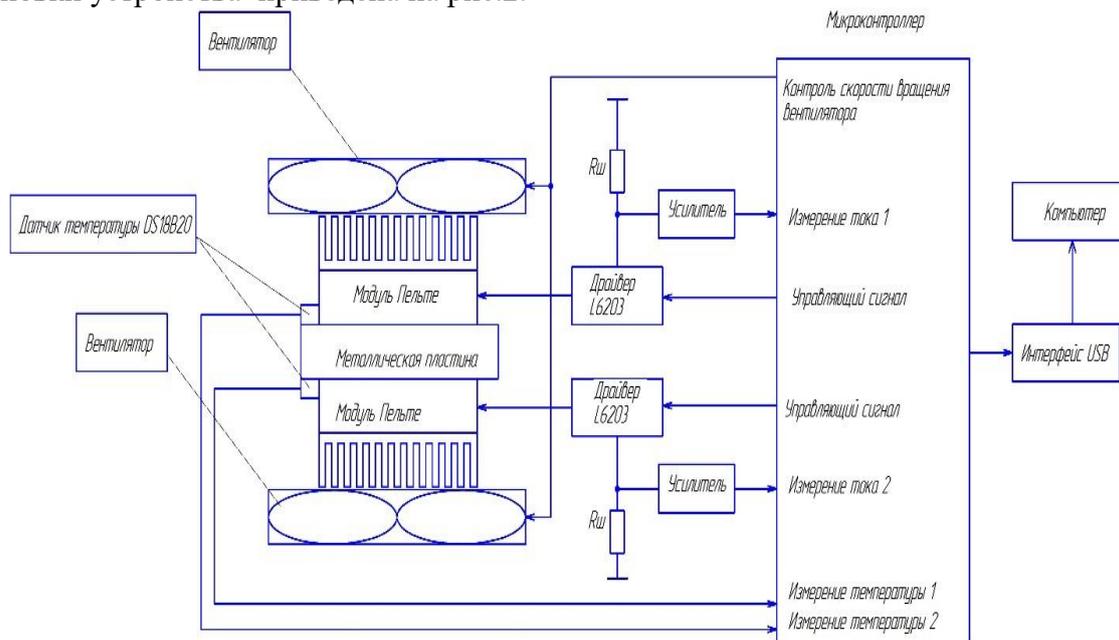


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки
Fig. 2. Block diagram of the experimental setup

Схема контроля и управления устройством для управления двумя элементами Пельтье приведена на рис. 3 и содержит два одинаковых функциональных узла.

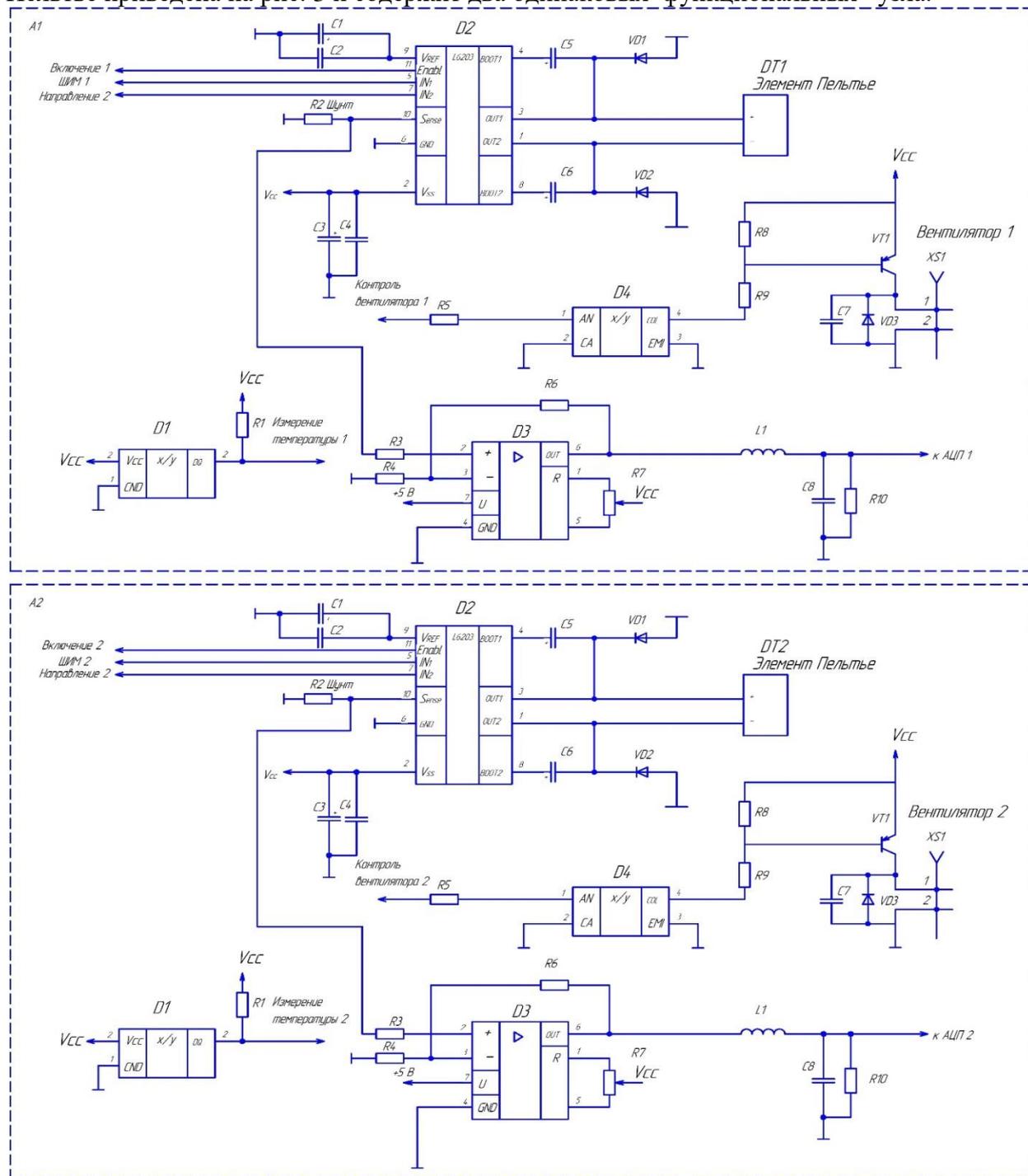


Рис.3. Схема системы управления
Fig.3. Control System Diagram

Каждый функциональный узел содержит H-мост, усилитель сигнала, LC-фильтр для выпрямления считываемого импульсного тока ШИМ и схему управления вентилятором. Схема управления обеспечивает увеличение тока нагрева на Пельтье до тех пор, пока температура медной пластины не повысится до заданного высокого значения температуры, а затем путем изменения направления тока создается ток охлаждения на элементе Пельтье (при работающем охлаждающем вентиляторе) пока температура медной пластины не снизится до заданной низкой температуры. При многократном повторении этой последовательности, отслеживается закономерность изменения температуры для исследования процесса нагрева и охлаждения медной пластины с помощью элемента Пельтье.

Полученные экспериментальные данные отправляются в ПК через интерфейс последовательной связи USB и персональный компьютер сохраняет экспериментальные данные на жестком диске [12-14].

Обсуждение результатов. Результаты контроля температуры от 43 °С до 73 °С показаны на рис. 4 с током нагрева 3,0 А и током охлаждения 0,0 А при этом охлаждающий вентилятор работает только во время охлаждения. Повторяющийся период с температурой в диапазоне от 43 °С до 73 °С составляет около 85 секунд. Когда температура медной пластины достигает заданной высокой температуры, ток переключается в противоположном направлении, а ток охлаждения протекает через элемент Пельтье при работающем охлаждающем вентиляторе, пока температура медной пластины не уменьшится до заданной низкой температуры.

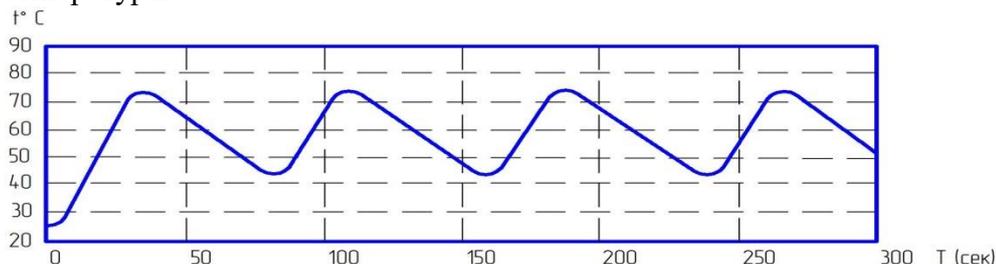


Рис. 4. Контроль температуры от 43°C до 73°C

Fig. 4. Temperature control from 43°C to 73°C

Вывод. В схеме устройства применяется широтно-импульсная модуляция с использованием обратной связи для управления длительностью импульса в соответствии с заданным алгоритмом. Контроль температуры медной пластины с помощью элемента Пельтье осуществляется при заданной высокой и низкой температуре. Повторяющиеся периоды зависят от величины тока, а период составляет от 80 сек до 90 сек.

При реализации более быстрого периода контроля температуры этот метод контроля температуры можно применять в специальных металлгидридных приводах, которые действуют в низкочастотном диапазоне с использованием элемента Пельтье для нагрева и охлаждения. Металлогидридные приводы характеризуются меньшими размерами, меньшим весом, бесшумной работой и податливостью, аналогичной податливости человеческого тела.

Такой привод состоит из порошкообразных сплавов, поглощающих водород, в качестве источника механической энергии, элементов Пельтье в качестве источника тепла и цилиндра с металлическим сильфоном в качестве механического элемента. Узел медных труб, обладающий хорошей теплопроводностью, содержит сплавы, поглощающие водород.

Поглощающие водород сплавы могут обратимо поглощать и десорбировать большой объем водорода, более чем в тысячу раз превышающий их собственный объем. Привод использует обратимые реакции между тепловой энергией и механической энергией сплавов, поглощающих водород. Изучение характеристик привода для различных температур, давлений и внешних нагрузок позволит использовать такой тип привода в медицинских и реабилитационных целях.

Библиографический список:

1. Медведев Д.М. Структуры и алгоритмы обработки данных в системах автоматизации и управления : учебное пособие / Медведев Д.М.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 120 с.- ISBN 978-5-4497-1873-0. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127572.html>.
2. Жмудь В.А. Системы автоматического управления. Новые концепции и структуры регуляторов : учебник / Жмудь В.А., Димитров Л.В., Носек Я.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 158 с. - ISBN 978-5-4497-1876-1. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127571.html>.
3. Ким К.К. Электрические измерения неэлектрических величин : учебное пособие / Ким К.К., Анисимов Г.Н., Ткачук А.А.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 144 с.— ISBN 978-5-4497-1881-5. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127578.html>.

4. Лепявко А.П. Контактные средства измерений температуры : учебное пособие / Лепявко А.П.. - Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2022. - 88 с. - ISBN 978-5-93088-216-2. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/126032.html>.
5. Лысенко, В. Г. Микропроцессорные информационно-управляющие системы : учебное пособие / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина. - Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. - 70 с. - ISBN 978-5-907494-05-3. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/261956>.
6. Трофименко, В. Н. Микропроцессорные информационно-управляющие системы связи : учебное пособие / В. Н. Трофименко. - Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. - 120 с. - ISBN 978-5-88814-904-1. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/134040>.
7. Кузнецов, Е. Н. Элементная база и функциональные узлы информационно-измерительных и управляющих систем : учебное пособие / Е. Н. Кузнецов. - Пенза : ПГУ, 2019. - 348 с. - ISBN 978-5-907102-89-7. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/162234>.
8. Деулин, Б. И. Элементная база электроники : учебное пособие / Б. И. Деулин. - Орел : ОрелГАУ, 2013. - 131 с. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/71395>.
9. Мирина, Т. В. Функциональные электронные узлы измерительных и диагностических систем : учебное пособие / Т. В. Мирина, Н. В. Мирин. - 3-е изд. - Москва : ФЛИНТА, 2012. - 271 с. - ISBN 978-5-9765-1518-5. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/60734>.
10. Бусурин, В. И. Основы получения информации в измерительных и управляющих системах : учебное пособие / В. И. Бусурин, Н. А. Макаренкова, Л. А. Шлеенкин. - Москва : МАИ, 2022. - 102 с. - ISBN 978-5-4316-0890-2. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/298583>.
11. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature control of aluminum plate using Peltier element," Proceedings of KSPE 2004, pp.764-767, October, 2004.(in Korean).
12. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature-pressure characteristics of SMH actuator using Peltier module," Journal of Control and Systems Engineering, Vol.7, No.1, pp.191-194, December, 2004.(in Korean).
13. Gao, Min., and Rowe, D. M., "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," Energy conversion & Management, Vol.41, pp.163-171, 2000.
14. Chein, Reiyu., and Huang, Guanming., "Thermo- electric cooler application in electronic cooling," Applied Thermal Engineering, Vol.24, pp. 2207- 2217, 2004.
15. Dilhaire, Stefan, Salhi, Amine, Grauby, Stephane, and Claeys, Wilfrid, "Laser Seebeck Effect Imaging(SEI) and Peltier Effect Imaging(PEI): complementary investigation methods," Microelectronics Reliability, Vol.43, pp.1609-1613, 2003.
16. Kang, B. H., Chang, H. J., Kim, S. Y., and Kim, S., "Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner," Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No.3, pp.482-488, 2002.

References:

1. Medvedev D.M. Structures and algorithms of data processing in automation and control systems : textbook / Medvedev D.M.. - Moscow : AI Pi Ar Media, 2023; 120.- ISBN 978-5-4497-1873-0. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127572.html>. [In Russ].
2. Zhmud V.A. Automatic control systems. New concepts and structures of regulators : textbook / Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek Ya.. - Moscow : AI Pi Er Media, 2023;158. - ISBN 978-5-4497-1876-1. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127571.html>. [In Russ].
3. Kim K.K. Electrical measurements of non-electrical quantities : textbook / Kim K.K., Anisimov G.N., Tkachuk A.A.. - Moscow : AI Pi Er Media, 2023; 144.- ISBN 978-5-4497-1881-5. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127578.html>. [In Russ].
4. Lepyavko A.P. Contact temperature measuring instruments : textbook / Lepyavko A.P.- Moscow : Academy of Standardization, Metrology and Certification, 2022; 88. - ISBN 978-5-93088-216-2. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/126032.html>. [In Russ].
5. Lysenko, V. G. Microprocessor information and control systems : textbook / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina. - Rostov-on-Don : RSUPS, 2019; 70 - ISBN 978-5-907494-05-3. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/261956>. [In Russ].
6. Trofimenko, V. N. Microprocessor information and control communication systems : textbook / V. N. Trofimenko. - Rostov-on-Don : RSUPS, 2019; 120. - ISBN 978-5-88814-904-1. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/134040>. [In Russ].

7. Kuznetsov, E. N. Element base and functional nodes of information-measuring and control systems : textbook / E. N. Kuznetsov. - Penza : PSU, 2019; 348 - ISBN 978-5-907102-89-7. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: [https:// e.lanbook.com/book/162234](https://e.lanbook.com/book/162234). [In Russ].
8. Deulin, B. I. The element base of electronics: a textbook / B. I. Deulin. - Orel : OrelGAU, 2013; 131 - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/71395>. [In Russ].
9. Mirina, T. V. Functional electronic components of measuring and diagnostic systems: textbook / T. V. Mirina, N. V. Mirin. - 3rd ed. - Moscow: FLINT, 2012; 271. - ISBN 978-5-9765-1518-5. - Text: electronic // Lan: electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/60734>. [In Russ].
10. Busurin, V. I. Fundamentals of obtaining information in measuring and control systems: textbook / V. I. Busurin, N. A. Makarenkova, L. A. Shleenkin. Moscow : MAI, 2022; 102 - ISBN 978-5-4316-0890-2. - Text : electronic. Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/298583>. [In Russ].
11. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature control of aluminum plate using Peltier element," Proceedings of KSPE 2004, pp.764-767, October, 2004 [In Korean]
12. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature-pressure characteristics of SMH actuator using Peltier module," *Journal of Control and Systems Engineering*, 2004; 7(1): 191-194 [In Korean]
13. Gao, Min., and Rowe, D. M., "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," *Energy conversion & Management*, 2000;41:163-171.
14. Chein, Reiyu., and Huang, Guanming., "Thermo- electric cooler application in electronic cooling," *Applied Thermal Engineering*, 2004; 24: 2207- 2217
15. Dilhaire, Stefan, Salhi, Amine, Grauby, Stephane, and Claeys, Wilfrid, "Laser Seebeck Effect Imaging(SEI) and Peltier Effect Imaging(PEI): complementary investigation methods," *Microelectronics Reliability*, 2003; 43:1609-1613
16. Kang, B. H., Chang, H. J., Kim, S. Y., and Kim, S., "Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner," *Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2002; 14(3):482-488

Сведения об авторах:

Семиляк Александр Иванович, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; asemilyak@mail.ru

Саркаров Таджидин ЭКберович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и общей электротехники; sarkarovta@mail.ru.

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; evdulovdenis@yandex.ru

Назаров Кадыр Курбанович, аспирант кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники nazarov.kadi@yandex.ru

Information about authors:

Alexander I. Semilyak, Senior Lecturer of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; asemilyak@mail.ru

Tadzhidin E.Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; sarkarovta@mail.ru.

Denis V.Evdulov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Kadyr K. Nazarov, Postgraduate student of the Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering nazarov.kadi@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revided 19.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.01.2023.