УДК 621.362, 537.322

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-128-136

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТУРИСТИЧЕСКОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Шишов К. А., Чэнь Х.

Российский университет дружбы народов

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

Аннотация.

Целью работы является разработка модели экспериментального образца туристического термоэлектрического генератора.

Процедура и методы исследования. Проведено описание принципа работы туристического термоэлектрического генератора. Проведён анализ конструкций устройств-аналогов. Исследована зависимость максимальной выходной мощности от различных факторов в реальных условиях эксплуатации.

Результаты исследования. Определены эксплуатационные условия, ключевые особенности и преимущества разрабатываемого устройства. Разработана модель конструкции туристического термоэлектрического генератора. Разработан блок управления электрической нагрузкой на основе ОТММ контроллера.

Теоретическая и практическая значимость. Разработана и описана модель туристического термоэлектрического генератора. Данное устройство позволит эффективно решать задачи по приготовлению пищи и зарядки аккумуляторов мобильных устройств в походных условиях.

Ключевые слова: туристическое оборудование; термоэлектрический генератор; преобразование тепловой энергии; отслеживание точки максимальной мощности; зарядное устройство

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL MODEL OF A TOURIST THERMOELECTRIC GENERATOR AND EXAMINATION OF THE WAYS TO INCREASE ITS EFFICIENCY

K. Shishov, H. Chen

Peoples' Friendship University of Russia

ul. Miklukho-Maklaya 6, 117198 Moscow, Russian Federation

Abstract.

Purpose. The aim is to develop an experimental model of a tourist thermoelectric generator.

Methodology and Approach. The principle of the operation of a tourist thermoelectric generator is described. The analysis of the designs of similar devices is carried out. The dependence of the maximum output power on various factors in real operating conditions is investigated.

Results. The operating conditions, key features and advantages of the developed device are determined. A design model of a tourist thermoelectric generator is developed. An electric load control unit based on the OTMM controller is elaborated.

Theoretical and Practical implications. A model of a tourist thermoelectric generator is developed and described. This device will allow one to effectively solve the problems of cooking and charging the batteries of mobile devices in camping conditions.

Keywords: tourist equipment, thermoelectric generator, thermal energy conversion, maximum power point tracking, battery charger

Введение

Ежегодно всё больше людей стремится проводить время на природе, заниматься активным туризмом. Оказываясь в походных условиях, многие туристы не хотят ограничивать себя в использовании электронной аппаратуры. Для этого необходимо обеспечить возможность подзарядки аккумуляторных устройств, используемых туристами. Существующие на рынке варианты по решению вопроса зарядки устройств в походных условиях: солнечные батареи, внешние аккумуляторы, динамо-машины. Однако солнечные батареи имеют низкую эффективность, а в тёмное время суток и пасмурную погоду не используются. Внешние аккумуляторы после своей разрядки также бесполезны. Использование динамо-машины заставит пользователя расходовать своё личное время и силы. Одновременно с этим происходит модернизация походной посуды. На смену тяжёлым походным канам, всё чаще приходит лёгкая, прочная, удобная туристическая посуда. Высокотехнологическое и многофункциональное туристическое снаряжение нацелено сделать пребывание на природе более комфортным. Предлагаемое в данной статье решение: разработка туристического термоэлектрического генератора (ТТЭГ). Данное устройство должно решать одновременно две задачи: приготовление пищи и зарядка аккумуляторов мобильных устройств в походных условиях.

Принцип работы ТТЭГ

Туристический термоэлектрический генератор (ТТЭГ) является термоэлектрическим устройством, обеспечивающим преобразование тепловой энергии в электричество. Принцип работы данного устройства основан на эффекте Зеебека, заключающемся в возникновении электродвижущей силы в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных полупроводников, контакты которых находятся при разных температурах [1]. В походных условиях разница температуры может обеспечиваться за счёт пламени костра или газовой горелки для горячей стороны и за счёт воды, нагреваемой для приготовления пищи, для холодной стороны.

Ключевым элементом ТТЭГ является термоэлектрический модуль (ТЭМ) Термоэлектрическим генераторным модулем (рис. 1) называют устройство,

преобразующее тепловую энергию в электрическую [2]. Главной особенностью ТЭМ является прямое преобразование энергии, то есть без дополнительных механических и других промежуточных преобразований.

Рис. 1. Внешний вид ТЭМ.

Fig. 1. The appearance of the thermoelectric module.

Источник: [3, с. 198].

Анализ и разработка конструкции ТТЭГ

При разработке ТТЭГ был проведён анализ различных конструкций туристического оборудования, в том числе прямых аналогов ТТЭГ, представленных на рынке¹ [3]. По итогам проведённого анализа и экспериментальных исследований был сделан вывод, что концепция котелка-зарядки (рис. 2) с расположением термоэлектрического модуля на дне чаши является наиболее энергоэффективной относительно печей-зарядок², у которых модули расположены сбоку, за счёт того, что большее количество тепла проходит через ТЭМ, позволяя тем самым генерировать больше электрической энергии. Также данная концепция многофункциональна – она позволяет одновременно кипятить воду для приготовления пищи и генерировать электроэнергию. Возможность работать от пламени газовой горелки делает разрабатываемый генератор применимым при многих погодных и климатических условиях, в местности с отсутствующей растительностью, на заснеженной территории. Наличие радиатора увеличит количество тепла, поглощаемого теплообменником, уменьшит расход газа.

Структурная блок схема описанной концепции представлена на рис. 3.

На данной схеме изображены основные части разрабатываемого устройства и взаимосвязи параметров.

¹ См.: Biolite [Электронный ресурс]. URL: www.biolitestove.com/BioLite.html (дата обращения: 10.02.2020); Powerpot [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thepowerpot.com/> (дата обращения: 10.02.2020).

² Biolite [Электронный ресурс]. URL: www.biolitestove.com/BioLite.html (дата обращения: 10.02.2020).

Рис. 2. Модель конструкции ТТЭГ.

Fig. 2. Model of tourist thermoelectric generator's design.

Источник: данные авторов.

Рис. 3. Структурная блок схема концепции ТТЭГ.

Fig. 3. Structural block diagram of tourist thermoelectric generator's concept.

Источник: данные авторов.

Разработка блока управления мощностью

Максимальная выходная мощность, вырабатываемая ТТЭГ, зависит от согласованности многих внешних и внутренних факторов, таких как: разница температур между горячей и холодной стороной ТЭМ, внутреннее сопротивление модуля, величина внешней нагрузки. Постоянство перечисленных факторов невозможно соблюсти при реальных условиях эксплуатации устройства. По этой причине в существующих моделях-аналогах данного устройства снятие электрической мощности ТЭМ происходит неэффективно.

Для эффективной передачи генерируемой электроэнергии потребителю необходимо обеспечить постоянную работу ТЭМ в точке максимальной мощности. Для решения данной задачи предлагается использование блока управления электрической нагрузкой (БУН) с функцией отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ). Функциональная блок-схема БУН представлена на рис. 4. В работе [4] экспериментально подтверждается эффективность использования ОТММ контроллера для более мощного термоэлектрического генератора. В работах [5; 6] описывается ОТММ технология и проблемы разработки и проектирования подобных устройств.

Рис. 4. Функциональная блок-схема БУН.

Fig. 4. Functional block diagram of the electrical load control unit.

Источник: данные авторов.

Также БУН будет содержать встроенную аккумуляторную батарею, что позволит постоянно накапливать получаемую электрическую энергию в процессе функционирования ТТЭГ. Для решения поставленных задач будет спроектирован и собран прототип устройства для проведения экспериментальных исследований.

ОТММ контроллер

В основе работы МРРТ контроллера лежит алгоритм отслеживания точки максимальной мощности – алгоритм работы электрического преобразователя, используемый для повышения энергетической эффективности фотоэлектрических и термоэлектрических модулей. Его задача – это непрерывная подстройка и согласование эквивалентного сопротивления системы для обеспечения работы модулей в режиме максимальной выходной мощности в условиях изменения внутренних и внешних параметров системы, таких, как: градиент температуры, внутреннее сопротивление модулей, сопротивление нагрузки. Существует мно-

жество ОТММ алгоритмов, и их применение на сегодняшний день описывается исследователями. Наиболее широко используемыми из них являются: метод постоянного напряжения [7], алгоритм возмущения и наблюдения [8], алгоритм инкрементной проводимости [9], метод нечёткого управления [10] и т. д. Внутреннее строение БУН с функцией ОТММ и его подключение к ТЭМ и нагрузке показано на рис. 5.

Термоэлектрический модуль и нагрузка соединены через DC-DC преобразователь. Устройство отслеживания точки максимальной мощности непрерывно обнаруживает изменение тока и напряжения термоэлектрического модуля и регулирует рабочий цикл ШИМ преобразователя для согласования сопротивления модуля и нагрузки.

Рис. 5. Внутреннее устройство БУН с функцией ОТММ.

Fig. 5. The internal device of the electric load control unit with the function of tracking the maximum power point.

Источник: данные авторов.

Модуль управления батареями и зарядом аккумулятора

Блок управления нагрузкой может реализовывать управление зарядкой и разрядкой литий-ионного аккумулятора, реализовывать многоступенчатый способ зарядки, а также защищать и продлевать срок службы литий-ионного аккумулятора. Модуль управления батареями предназначен для управления зарядом батареи. Трёхступенчатая зарядка выполняется в соответствии с различными значениями напряжения в литий-ионной батарее. Трёхступенчатый способ зарядки может точно контролировать процесс зарядки для достижения наилучшего состояния зарядки [11]. Данный способ зарядки защищает и продлевает срок службы литий-ионных аккумуляторов. Принципиальная схема процесса зарядки показана на рис. 6.

Литий-ионный аккумулятор представляет собой силовой элемент 26650. Он имеет стандартное напряжение 3,7 В и ёмкость 5000 мАч, что позволяет заряжать большинство цифровых продуктов.

Рис. 6. Внешний вид ТЭМ.

Fig. 6. The appearance of the thermoelectric module.

Источник: DSC-CN3065 Datasheet: USB-Compatible Lithium-Ion Battery Charger with Thermal Regulation¹.

Заключение

Для определения основных путей оптимизации конструкции ТТЭГ был проведён анализ различных конструкций туристического оборудования. По результатам экспериментальных тестов образцов аналогов ТТЭГ определены эксплуатационные условия, характерные температуры и выходные характеристики испытуемых устройств. Были выявлены основные требования к разрабатываемой конструкции ТТЭГ с целью увеличения эффективности устройства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Программе повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2016–2020 гг.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the program aimed at improving the competitiveness of the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University) among the world's leading research and education centers in the 2016–2020.

Статья поступила в редакцию 02.06.2020

¹ См.: USB-Compatible Lithium-Ion Battery Charger with Thermal Regulation [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/DFRobot/Wiki/raw/master/Solar%20Power%20Manager%20Series/DFR0559/res/V1.1/DSC-CN3065.pdf> (дата обращения: 15.01.2020).

ЛИТЕРАТУРА

1. Enescu D. Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications // Enescu D. *Green Energy Advances*. London: IntechOpen, 2019. pp. 1–38.
2. Термоэлектрические генераторы / Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С. М.: Атомиздат, 1976. 320 с.
3. Jetter, J. J., Kariher P. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions // *Biomass and Bioenergy*. 2009. Vol. 33. Iss. 2. P. 294–305.
4. Development of the Automotive Thermoelectric Generator Electrical Network / Shiriaev P., Shishov K., Osipkov A., Tishchenko L. // *Journal of Electronic Materials*. 2019. Vol. 48. Iss. 4. P. 1998–2009.
5. Development of 100-W high-efficiency MPPT power conditioner and evaluation of TEG system with battery load / Nagayoshi H., Nakabayashi T., Maiwa H., Kajikawa T. // *Journal of electronic materials*. 2011. Vol. 40. Iss. 5. P. 657–661.
6. A high efficiency cascaded thermoelectric generation system with power balancing mechanism / Qiu Z., Sun K., Wu H., Huang J., Xing Y. // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2015. P. 647–653.
7. Xiong Y., Yu L., Xu J. M. MPPT control of photovoltaic generation system combining constant voltage method with perturb observe method // *Electric Power Automation Equipment*. 2009. Vol. 29. Iss. 6. P. 85–88.
8. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control / Brunton S. L., Rowley C. W., Kulkarni S. R., Clarkson C. // *IEEE transactions on power electronics*. 2010. Vol. 25. Iss. 10. P. 2531–2540.
9. Safari A., Mekhilef S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2011. Vol. 58. Iss. 4. P. 1154–1161.
10. Li J., Wang H. Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method // *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. SUPERGEN'09. USA: IEEE*, 2009. P. 1–6.
11. Shu B., Qiao P. Novel design of photovoltaic intelligent fast charging system // *Foreign Electronic Measurement Technology*. Vol. 2009. Iss. 7. P. 49–51.

REFERENCES

1. Enescu D. Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications. In: Enescu D. *Green Energy Advances*. London, IntechOpen Publ., 2019, pp. 1–38.
2. Okhotin A. S., Efremov A. A., Okhotin V. S., Pushkarskii A. S. *Termoelektricheskie generatory* [Thermoelectric generators]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 320 p.
3. Jetter, J. J., Kariher P. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. In: *Biomass and Bioenergy*, 2009, vol. 33, iss. 2, pp. 294–305.
4. Shiriaev P., Shishov K., Osipkov A., Tishchenko L. Development of the Automotive Thermoelectric Generator Electrical Network. In: *Journal of Electronic Materials*, 2019, vol. 48, iss. 4, pp. 1998–2009.
5. Nagayoshi H., Nakabayashi T., Maiwa H., Kajikawa T. Development of 100-W high-efficiency MPPT power conditioner and evaluation of TEG system with battery load. In: *Journal of electronic materials*, 2011, vol. 40, iss. 5, pp. 657–661.
6. Qiu Z., Sun K., Wu H., Huang J., Xing Y. A high efficiency cascaded thermoelectric generation system with power balancing mechanism. In: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 647–653.
7. Xiong Y., Yu L., Xu J. M. MPPT control of photovoltaic generation system combining

- constant voltage method with perturb observe method. In: *Electric Power Automation Equipment*, 2009, vol. 29, iss. 6, pp. 85–88.
8. Brunton S. L., Rowley C. W., Kulkarni S. R., Clarkson C. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control. In: *IEEE transactions on power electronics*, 2010, vol. 25, iss. 10, pp. 2531–2540.
 9. Safari A., Mekhilef S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. In: *IEEE transactions on industrial electronics*, 2011, vol. 58, iss. 4, pp. 1154–1161.
 10. Li J., Wang H. Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. SUPERGEN'09. USA: IEEE Publ.*, 2009, pp. 1–6.
 11. Shu B., Qiao P. Novel design of photovoltaic intelligent fast charging system. In: *Foreign Electronic Measurement Technology*, vol. 2009, iss. 7, pp. 49–51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишов Константин Александрович – аспирант департамента Механики и мехатроники Российского университета дружбы народов;
e-mail: shishov.k.a@yandex.ru;

Хэ Чэнь – студент департамента Механики и мехатроники Российского университета дружбы народов;
e-mail: entervectoring@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin A. Shishov – postgraduate student at the Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: shishov.k.a@yandex.ru;

He Chen – student of the Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: entervectoring@gmail.com.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шишов К. А., Чэнь Х. Разработка экспериментального образца туристического термо-электрического генератора и исследование путей по увеличению его энергоэффективности // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. №2. С. 128–136.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-128-136

FOR CITATION

Shishov K. A., Chen H. Development of an experimental model of a tourist thermoelectric generator and examination of the ways to increase its efficiency. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 128–136.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-128-136