

Научная статья

УДК 621.362+ 004.942

Код ВАК: 4.3.2

doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-151-159

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS WORKBENCH

Ф.Ф. Хабиров¹, В.С. Вохмин¹ ✉

¹Башкирский государственный аграрный университет,
г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

✉ v_vohmin@mail.ru

Реферат. Применение автономных систем электроснабжения в технологических процессах является одним из приоритетных направлений в инновационных разработках. Поэтому исследования в области альтернативной энергетики посвящены перспективным способам получения, передачи и использования энергии. Одним из перспективных направлений в альтернативной энергетике среди автономных источников энергии является преобразование тепловой энергии в электрическую в специальных устройствах, таких как термоэлектрический генератор (ТЭГ). Принцип работы этого устройства основан на применении потерь теплоты от теплоэнергетического оборудования, в том числе утилизации сбросной тепловой энергии. Для анализа возможности применения термоэлектрических модулей (ТЭМ) различных конструкций можно применять программные комплексы имитационного математического моделирования. Поэтому разработка математической модели термоэлектрического генератора в программном комплексе ANSYS Workbench позволит имитировать работу термоэлектрического генератора в качестве автономного источника энергоснабжения слаботочных систем. На первом этапе в программном комплексе ANSYS Workbench была создана геометрическая модель ТЭМ, в которую были введены параметры технических характеристик термоэлектрического модуля завода-изготовителя, для равномерного распределения нагрузки при моделировании была нанесена сетка. Далее была исследована визуализационная модель термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 при изменении температуры с нагреваемой стороны ТЭГ от 30 до 100 °С, температура ТЭГ с охлаждаемой стороны оставалась неизменной –27 °С. Были получены значения напряжения, силы тока и мощности, на основании значений которых можно обеспечивать электропитанием слаботочную систему электрооборудования. Моделирование работы термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 в программном комплексе ANSYS Workbench позволило получить экспериментальные характеристики, которые в дальнейшем можно использовать для сравнения данных, полученных на физической модели ТЭГ.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, термоэлектрический генератор, термоэлектричество, слаботочные системы, математическое моделирование

Цитирование. Хабиров Ф.Ф., Вохмин В.С. Моделирование работы термоэлектрического генератора в программном комплексе Ansys Workbench // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – 1(75). – С. 151–159, doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-151-159.

SIMULATION OF THERMOELECTRIC GENERATOR OPERATION
IN ANSYS WORKBENCH SOFTWARE COMPLEXF.F. Khabirov¹, V.S. Vokhmin¹ ✉¹Bashkir State Agrarian University,
Ufa, The Republic of Bashkortostan, Russia
✉ v_vohmin@mail.ru

Abstract. Application of autonomous power supply systems in technological processes is one of the priority directions in innovative developments. Therefore, research in the field of alternative energy is devoted to promising ways of obtaining, transmitting and utilising energy. One of the promising directions in alternative energy among autonomous energy sources is the conversion of thermal energy into electrical energy in special devices such as thermoelectric generator (TEG). The principle of operation of this device is based on the use of heat losses from thermal power equipment, including the utilisation of waste heat energy. To analyse the feasibility of thermoelectric modules (TEMs) of different designs, simulation mathematical modelling software packages can be applied. Therefore, the development of a mathematical model of a thermoelectric generator in the ANSYS Workbench software package will allow simulating the operation of a thermoelectric generator as an autonomous power supply source for low-current systems. At the first stage in the software complex ANSYS Workbench was created geometric model of TEM, in which parameters of technical characteristics of thermoelectric module of the manufacturer were entered, for uniform distribution of load in modelling was applied grid. Next, the visualisation model of the TGM-127-1.4-2.0 thermoelectric module was investigated when the temperature on the heated side of the TEG changed from 30 to 100 °C, the temperature of the TEG on the cooled side remained constant at -27 °C. The values of voltage, current and power were obtained, based on the values of which it is possible to provide power supply for low-current electrical equipment system. The simulation of the thermoelectric module TGM-127-1,4-2,0 in the software complex ANSYS Workbench, allowed to obtain experimental characteristics, which can be used in the future to compare the obtained data from the physical model TEG.

Keywords: thermoelectric module, thermoelectric generator, thermoelectricity, low-voltage systems, mathematical modeling

Citation. Khabirov F.F., Vokhmin V.S. (2024) "Simulation of thermoelectric generator operation in Ansys Workbench software complex", *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 75, no. 1, pp. 151-159. (In Russ.), doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-151-159.

Введение. Одной из главных экологических задач во всем мире является снижение выбросов парниковых газов и уменьшение их воздействия на окружающую среду. Решению данной задачи помогают разработки по совершенствованию альтернативных источников энергии с возможностью трансформации тепловой энергии сжигаемого топлива в электрическую. Данное направление всегда актуально для исследователей как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. К одним из перспективных устройств по преобразованию тепловой энергии в электрическую энергию можно отнести термоэлектрический генератор, работающий на эффекте Зеебека.

Термоэлектрический генератор (ТЭГ) создает напряжение, когда с каждой стороны имеется разная температура (эффект Зеебека). И наоборот, когда к нему прикладывается напряжение, тепло передается с одной стороны на другую, создавая разницу температур (эффект Пельтье).

Конструкция ТЭГ выполнена таким образом, что каждая из сторон модуля контактирует либо р-п, либо п-р переходами (в зависимости от полярности). Контакты р-п нагреваются, п-р – охлаждаются. Соответственно, возникает разность температур (ΔT) на сторонах элемента. Примечательно, что изменение полярности питания приводит к смене горячей и холодной поверхностей [1–3; 5]. Ток возбуждения замкнутой цепи представляет собой разность потенциалов между горячими и холодными спаями, вызывающую создание температурных градиентов, называемых «эффектом Зеебека».

Основным элементом в термоэлектрическом генераторе является термоэлектрический модуль (ТЭМ), который может характеризоваться различными габаритными размерами, выходными электрическими характеристиками, диапазонами рабочих температур.

Цель исследования – разработка математической модели в программном комплексе ANSYS Workbench для моделирования рабочих характеристик термоэлектрического генератора при использовании в слаботочных системах сельскохозяйственных предприятий.

В задачи исследования входит разработка геометрической модели термоэлектрического модуля в среде визуализированного моделирования ANSYS Workbench, а также анализ изменения термо-ЭДС от термоэлектрического генератора в зависимости от смены температуры его рабочей поверхности.

Материалы, методы и объекты исследования. Совершенствование программ математического моделирования технологических процессов для теоретических исследований приобретает все больший практический интерес.

В нашей работе использовался программный пакет ANSYS Workbench для компьютерного инженерного анализа проектов методом конечных элементов, который применяется во многих направлениях для расчетного обоснования инженерных проектов (в механике, гидродинамике, электротехнике, электронике и т. д.) и может выполнять междисциплинарные расчеты. Workbench – это пользовательская оболочка ANSYS, призванная соединить различные физические модели в одном расчетном проекте и предоставить инженеру интуитивно понятный интерфейс управления расчетным проектом. Рабочая среда Workbench использует окна настроек. Каждое окно управляет функциями и настройками на всех этапах моделирования: создание геометрической модели, создание расчетной сетки, приложение нагрузки (определение граничных условий), просмотр расчетных результатов.

В формуле (1) представлена зависимость, которая описывает образование термо-ЭДС [4, 7]:

$$V_{OC} = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где V_{OC} – напряжение холостого хода (В) ТЭГ;

α – коэффициент Зеебека (мкВ/К);

ΔT – разница температур (К) между горячей, T_h и холодной поверхностями, T_c , ($\Delta T = T_h - T_c$).

Для математического моделирования в программе ANSYS Workbench был использован термоэлектрический модуль TGM-127-1,4-2,0 российской компании «Криотерм», характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0
 Table 1. Technical characteristics of the thermoelectric module TGM-127-1,4-2,0

Параметры	$T_c = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_c = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_h = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_h = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
Напряжение, В	2,10	3,50
Ток, А	0,94	1,50
Мощность, Вт	1,96	5,30
КПД, %	3,40	5,30
Электрическое сопротивление (при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$), Ом	$1,5 \pm 0,050\%$	
Тепловое сопротивление, К/Вт	$2,20 \pm 10\%$	

Графическое изображение ТЭГ с двумя выводами в программе ANSYS Workbench представлено на рис. 1.

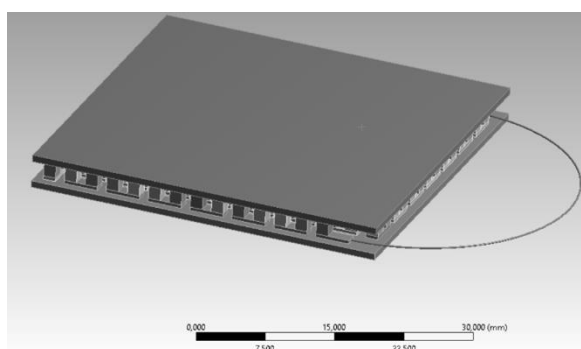


Рис. 1. Изображение ТЭГ в программе ANSYS Workbench
 Picture 1. TEG image in the ANSYS Workbench programme

С научной точки зрения эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую зависит от следующих факторов: свойств материалов, коэффициента Зеебека, электрической проводимости и теплопроводности, которые в совокупности выражаются через безразмерную добротность [7, 8, 9].

На рис. 2 показана сетка, нанесенная на разработанный в ANSYS Workbench ТЭГ.

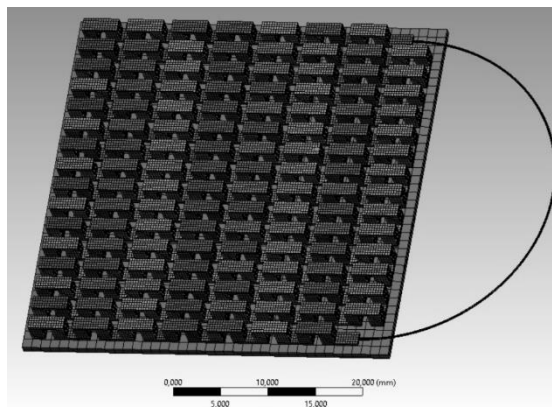


Рис. 2. Изображение ТЭГ в программе ANSYS Workbench с нанесением сетки
 Picture 2. TEG image in ANSYS Workbench programme with grid application

С помощью сетки тело ТЭГ разбивается на части для равномерного распределения нагрузки в случае, если нагрузка имеется. Нанесение сетки в программе ANSYS Workbench необходимо для эффективного проведения моделирования построенной системы [7–9].

Математическая модель термоэлектрического генератора позволяет изменять параметры горячей и холодной стороны модулей, моделировать изменение температуры, а также проводить исследования влияния параметров разности температур на выходные параметры термоэлектрического генератора.

Результаты исследования. При первоначальном исследовании термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 в программе ANSYS Workbench была задана температура с нагреваемой стороны 100 °С, а с охлаждаемой стороны – 27 °С. Температурный профиль модуля ТЭГ после моделирования отражен на рис. 3. Области красного и синего цвета обозначают более высокие и более низкие температуры соответственно. Как видно из результатов, представленных на рис. 3, окрашенный в красный цвет горячий спай имеет более высокую температуру, а окрашенный в синий цвет холодный спай имеет более низкую температуру. Максимальная температура составила при моделировании 100,03 °С, а минимальная – 26,9 °С.

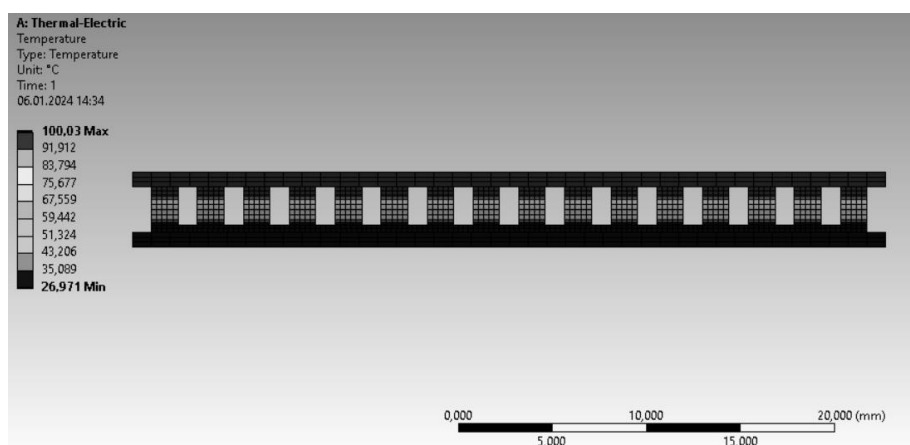


Рисунок 3. Температурный профиль ТЭГ в программе ANSYS Workbench
Picture 3. TEG temperature profile in ANSYS Workbench programme

На рис. 4 представлено напряжение на ТЭГ, которое возникает в результате температурного градиента между горячей и холодной сторонами ТЭГ [7–9].

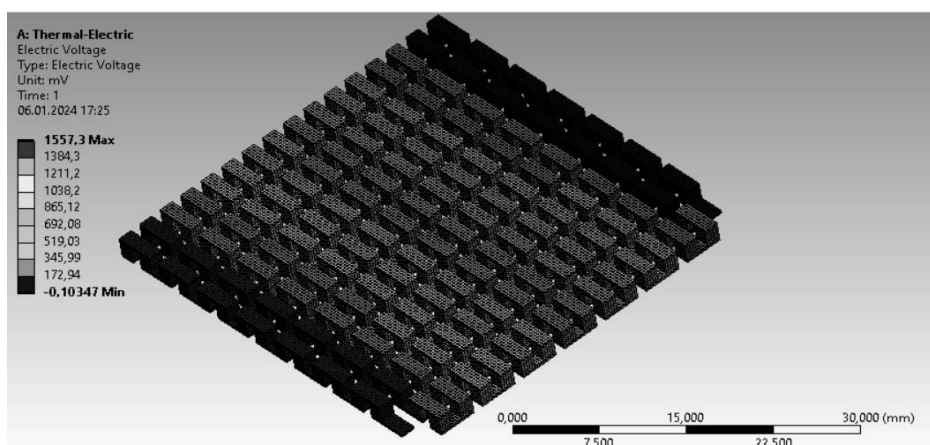


Рисунок 4. Графическое изображение напряжения, которое возникает в ТЭГ при моделировании в программе ANSYS Workbench
Picture 4. Graphical representation of the voltage that occurs in the TEG during simulation in ANSYS Workbench programme

Согласно расчетам программы ANSYS Workbench, максимальное напряжение, которое вырабатывает моделируемый термоэлектрический модуль при температурах 100 °С и 27 °С, $U = 1,55$ В.

В дальнейших исследованиях при моделировании работы термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 в программе ANSYS Workbench задавалась температура с горячей стороны модуля 30...100 °С при постоянной температуре ТЭГ с охлаждаемой стороны 27 °С.

Выходные характеристики тока, напряжения и мощности, в зависимости от разности температур на стенках ТЭГ при моделировании в программе ANSYS Workbench изображены на графике, который представлен на рис. 5.

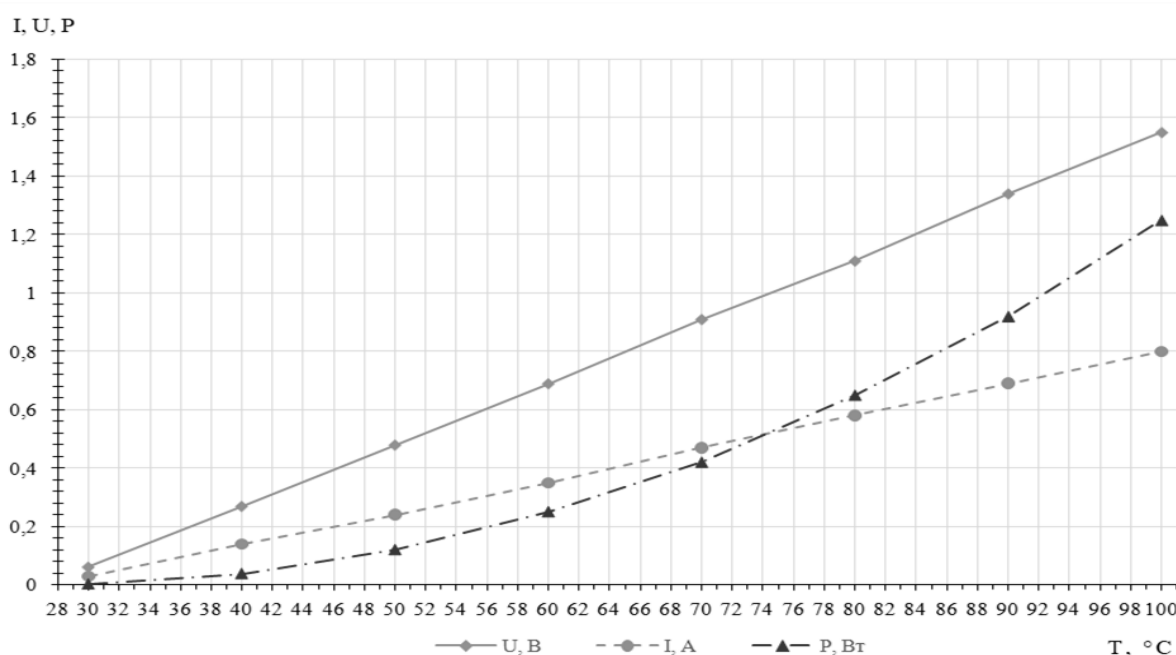


Рис. 5. Характеристики напряжения, тока и мощности на выходе ТЭГ при моделировании
Picture 5. Voltage, current and power characteristics at the TEG output during simulation

Согласно проведенному моделированию в программе ANSYS Workbench, источник питания на базе ТЭГ с термоэлектрическими модулями способен обеспечить электропитанием предлагаемую слаботочную систему передачи данных.

Полученные данные сведем в табл. 2.

Таблица 2. Выходные характеристики работы ТЭГ
Table 2. Output characteristics of the TEG operation

№ п/п	Температура охлаждаемой стороны, °С	Температура нагреваемой стороны, °С	Напряжение , В	Ток, А	Выходная мощность, Вт	Тепловой поток нагреваемой стороны, Вт	КПД ТЭГ, %
1	27	30	0,062	0,03	0,002	1,57	0,12
2		40	0,27	0,14	0,038	6,86	0,55
3		50	0,48	0,24	0,12	12,20	0,98
4		60	0,69	0,35	0,25	17,59	1,42
5		70	0,91	0,47	0,42	23,04	1,85
6		80	1,11	0,58	0,65	28,53	2,29
7		90	1,34	0,69	0,92	34,07	2,72
8		100	1,55	0,80	1,25	39,66	3,11

Таким образом, исследуемый термоэлектрический модуль можно применять для разработанной конструкции ТЭГ и проведения дальнейших экспериментальных исследований [7–9].

Для стабилизации напряжения питания, получаемого от сборки термоэлементов, необходимо применять в электрической схеме питания преобразователи напряжения [6–9].

Выводы:

1. При моделировании работы термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 при температуре с нагреваемой стороны ТЭГ 30...100 °С и с охлаждаемой стороны 27 °С, получено максимальное значение выходных вольт-амперных характеристик: $U = 1,55$ В; $I = 0,80$ А; $P = 1,25$ Вт.

2. Величина генерируемого термо-ЭДС напрямую зависит от значения коэффициента Зеебека и количества термоэлектрических модулей: чем вышеуказанные значения, тем выше выходные значения термо-ЭДС.

3. Применение термоэлектрического генератора в качестве автономного источника электроснабжения для слаботочных систем предприятий возможно и требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. Гайнетдинов, Н.Н., Вохмин, В.С., Хабилов, Ф.Ф. Термоэлектрический генератор как автономный источник энергии для питания приборов учета контрольных точек тепловых сетей // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК. – 2022. – С. 137–141.
2. Вохмин, В.С., Хабилов, Ф.Ф. Термоэлектрический генератор с принудительной системой охлаждения: пат. 2755 980 Рос. Федерация. № 2020132666; заявл. 01.10.2020; опубл. 23.09.2021, Бюл. № 27. – 8 с.
3. Хабилов, Ф.Ф., Вохмин, В.С. Обоснование применения термоэлектрического генератора в системе дымоотведения котельной // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3(32). – С. 285–292.

4. Хабилов, Ф.Ф., Вохмин, В.С. Исследование и разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК. – 2023. – С. 111–115.
5. Хабилов, Ф.Ф., Вохмин, В.С. Разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий // АПК РОССИИ. – 2022. – № 4. – С. 490–499.
6. Karri, M.A., Thacher, E.F., Helenbrook, B.T. Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies // *Energy Conversion and Management*. – 2011, vol. 52, no. 3. – pp.1596–1611.
7. Miao, Z., Meng, X., Zhou, S., & Zhu, M. Thermo-mechanical analysis on thermoelectric legs arrangement of thermoelectric modules // *Renewable Energy*. 2020, vol. 147, pp. 2272–2278.
8. Patel, V. R., & Patel, M. C. Automobile Waste Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator // *Journal of Science and Technology*. 2020, vol. 5(3), pp. 58–61.
9. Rana, S., Orr, B., Iqbal, A., Ding, L.C., Akbarzadeh, A., & Date, A. Modelling and Optimization of Low-temperature Waste Heat Thermoelectric Generator System // *Energy Procedia*. 2017, vol. 110, pp. 196–201.

References

1. Gainetdinov N.N., Vokhmin V.S., Khabirov F.F. (2022), 'Thermoelectric generator as a standalone power source for power supply of thermal grid reference point meters', *Current state, traditions and innovative technologies in the development of the agro-industrial complex*, pp. 137–141. (In Russ.).
2. Vokhmin V.S., Khabirov F.F. Thermoelectric generator with forced cooling system: Pat. 2755 980 RF. 2020132666; declared. 01.10.2020; op. 23.09.2021, Bul. 27. 8 p. (In Russ.).
3. Khabirov F.F., Vokhmin V.S. (2019), 'Justification for the application of thermoelectric generator in the smoke-discharge system of the boiler', *Innovations in agriculture*, no. 3(32), pp. 285–292. (In Russ.).
4. Khabirov F.F., Vokhmin V.S. (2023), 'Research and development of thermoelectric generator for weak-current systems of agricultural enterprises', *Modern state, traditions and innovative technologies in the development of agro-industrial complex*, pp. 111–115. (In Russ.).
5. Khabirov F., Vokhmin V.S. (2022), 'Development of thermoelectric generator for low-current systems of agricultural enterprises, APK of Russia, no. 4, pp. 490–499. (In Russ.).
6. Karri M.A., Thacher E.F., Helenbrook B.T. (2011), 'Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies', *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 3, pp. 1596–1611.
7. Miao, Z., Meng, X., Zhou, S., & Zhu, M. (2020), 'Thermo-mechanical analysis on thermoelectric legs arrangement of thermoelectric modules', *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 2272–2278.
8. Patel, V.R., & Patel, M C. (2020), 'Automobile Waste Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator', *Journal of Science and Technology*, vol. 5(3), pp. 58–61.
9. Rana, S., Orr, B., Iqbal, A., Ding, L. C., Akbarzadeh, A., & Date, A. (2017), 'Modelling and Optimization of Low-temperature Waste Heat Thermoelectric Generator System', *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 196–201.

Сведения об авторах

Хабиров Фидан Фазитович, аспирант кафедры «Электрические машины и электрооборудование», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия, <http://orcid.org/0009-0009-4209-8302>, SPIN-код: 3549-0736, Researcher ID: JWO-4606-2024; fidan.20@mail.ru.

Вохмин Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и электрооборудование», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6352-494X>, SPIN-код: 5712-3751, Scopus author ID: 57211242362, Researcher ID: F-6373-2018; v_vohmin@mail.ru.

Information about the authors

Fidan F. Khabirov, postgraduate student of the Department of Electrical Machines and Electrical Equipment, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia <http://orcid.org/0009-0009-4209-8302>, SPIN-code: 3549-0736, Researcher ID: JWO-4606-2024; fidan.20@mail.ru.

Vyacheslav S. Vokhmin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines and Electrical Equipment, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6352-494X>, SPIN-code: 5712-3751, Scopus author ID: 57211242362, Researcher ID: F-6373-2018; v_vohmin@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 10.03.2024; принята к публикации 15.03.2024.

The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 10.03.2024; accepted for publication 15.03.2024.