

A.A. Abiduev, N.A. Urkhanov // Industrialnye tekhnologii i sredstva kompleksnoi mekhanizatsii selskokhoziaistvennogo proizvodstva Sibiri: Sb. nauch. tr. / SO VASKhNIL. – Novosibirsk, 1981. – S. 69-75.

3. Gromov, A.G. Issledovanie raboty triera s vertikalnymi kolebaniiami / A.G. Gromov, V.A. Kubyshchev // Traktory i selkhoz mashiny. – 1967. – No. 7. – S. 28-31.

4. Terskov, G.D. O vliianii osnovnykh faktorov na propusknuuiu sposobnost reshet s kruglymi otverstiiami // Tr. ChIMESKh. – 1958. – Vyp. 6. – S. 33-94.

5. Goncharov, E.S. Mekhaniko-tekhnologicheskoe obosnovanie i razrabotka universalnykh vibrotsentrobezhnykh zernovykh separatorov: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / E.S. Goncharov; VIM. – Moskva, 1986. – 34 s.

6. A.s. 239703 SSSR, MKI2 A01 7/44, V07V 18/50, Mashina dlia razdeleniia zernovoi smesi po razmeram / B.T. Tarasov, (SSSR) - 824077/30-15, Zaiavleno 09.03.63; Opubl. 18.03.69, Biul. No. 11 // Otkrytiia. Izobreteniia. – 1969. – No. 11. – 123 s.

7. Tarasov, B.T. Obosnovanie tekhnologicheskoi skhemy tsentrobezhno-reshetnogo separatora / B.T. Tarasov, N.I. Strikunov // Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protses-sov i mashin pri uborke zernovykh kultur v Zapadnoi Sibiri: sb. nauch. tr. / Alt. s.-kh. in-t. – Barnaul, 1987. – S. 34-48.

8. Mikitiuk, M.E. Povysenie effektivnosti oчитki zerna na tsilindricheskom podsevnom reshete: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / M.E. Mikitiuk: Barnaul, 2023. – 22 s.



УДК 621.362

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-247-5-79-87

Ф.Ф. Хабилов, В.С. Вохмин, Д.Д. Харисов

F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin, D.D. Kharisov

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH

THERMOELECTRIC MODULE SIMULATION MODEL IN ANSYS WORKBENCH SOFTWARE ENVIRONMENT

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, термоэлектрический генератор, термоэлектричество, нагреваемая сторона, температура, последовательное соединение.

Внедрение энергосберегающих мероприятий на предприятиях АПК и в сельской местности сегодня набирает обороты. Основными тепловыми потерями на сегодняшний день являются тепловые потери с дымоотводными газами и тепловые потери на тепловой сети. Для уменьшения тепловых потерь применя-

ются энергосберегающие мероприятия, например, в дымоотводную систему устанавливают различные рекуператоры тепловой энергии, но все же полноценно повысить энергетическую эффективность не удается, так как применению тепловых потерь тепловых сетей не уделяют особого внимания. В связи с этим актуально на сегодняшний день применение на тепловых сетях термоэлектрического генератора (ТЭГ), способного преобразовать тепловую энергию тепловых сетей в электрическую, которую возможно применить для слаботочных систем дистанционного

мониторинга инженерных систем теплосети. Термоэлектрический генератор компактен, прост в использовании, состоит он из термоэлектрических модулей (ТЭМ), количество которых определяется от необходимого значения выходной мощности. Для того чтобы определить работоспособность термоэлектрического генератора и необходимое количество термоэлементов, требуется провести моделирование ТЭМ в программной среде ANSYS workbench. Данная программа способна смоделировать работу ТЭМ, и с помощью моделирования возможно получить зависимость выходных характеристик ТЭМ от перепада температур между нагреваемой и охлаждаемой сторонами ТЭМ. Разработка имитационной модели ТЭГ в программной среде ANSYS workbench позволяет экономить время и ресурсы на проведение экспериментов. Для разработки имитационной модели ТЭМ потребуется описать основные математические уравнения, используемые при моделировании ТЭМ в программной среде ANSYS workbench.

Keywords: *thermoelectric module, thermoelectric generator, thermoelectricity, heated side, temperature, series connection.*

Implementation of energy saving measures at agro-industrial complex enterprises and in rural areas is gaining momentum today. The main heat losses today are heat

losses with flue gases and heat losses in the heat network. To reduce heat losses, energy-saving measures are used, for example, various heat energy recuperators are installed in the flue system, but still this cannot fully increase energy efficiency, as the use of heat losses in heat networks is not paid special attention, in this regard, it is relevant to date the use of thermoelectric generator (TEG), which is able to convert the thermal energy of heat networks into electrical energy which may be used for low-current remote monitoring systems of heating network engineering systems. Thermoelectric generator is a compact item, easy to use, and it consists of thermoelectric modules (TEM) the number of which is determined by the required value of output power. In order to determine the performance of the thermoelectric generator and determine the required number of thermoelements, it is required to conduct simulation of TEM in the software environment ANSYS Workbench. This software is able to simulate the operation of TEM and with the help of simulation it is possible to obtain the dependence of the output characteristics of TEM on the temperature difference between the heated and cooled side of the TEM. The development of the simulation model of TEG in the ANSYS Workbench software environment allows saving time and resources for conducting experiments. To develop a simulation model of the TEM, it will be necessary to describe the basic mathematical equations used in modeling the TEM in the ANSYS Workbench software environment.

Хабиров Фидан Фазитович, аспирант, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, SPIN: 3549-0736, Researcher ID: JWO-4606-2024; e-mail: fidan.20@mail.ru.

Вохмин Вячеслав Сергеевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, SPIN: 5712-3751, Scopus ID: 57211242362, Researcher ID: F-6373-2018; e-mail: v_vohmin@mail.ru.

Харисов Денис Дамирович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, ORCID: 0009-0009-5648-5135, SPIN: 3596-5273, Scopus ID: 57204632114, Researcher ID: F-4085-2018; e-mail: kharisov777@mail.ru.

Khabirov Fidan Fazitovich, post-graduate student, Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, SPIN: 3549-0736, Researcher ID: JWO-4606-2024; e-mail: fidan.20@mail.ru.

Vokhmin Vyacheslav Sergeevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, SPIN: 5712-3751, Scopus ID: 57211242362, Researcher ID: F-6373-2018; e-mail: v_vohmin@mail.ru.

Kharisov Denis Damirovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, ORCID: 0009-0009-5648-5135, SPIN: 3596-5273, Scopus ID: 57204632114, Researcher ID: F-4085-2018; e-mail: kharisov777@mail.ru.

Введение

Интерес к термоэлектрическим генераторам увеличивается с каждым годом. Это связано с повышением эффективности преобразования тепловой энергии в энергию электрическую за счет открытия новых полупроводниковых материалов и применения более современного оборудования для производства ТЭМ, состоящего из множества р-п переходов. При нагревании контактов р-п и охлаждении контактов п-р возникает термоЭДС, что называется эффектом Зеебека. Если перевернуть модуль и оказывать те же самые воздействия, также будет образо-

вание термоЭДС, но направление тока поменяется в противоположную сторону [1]. Для моделирования термоэлектрического модуля применяются компьютерные программы ANSYS workbench и COMSOL, но в нашем случае будем использовать ANSYS. При моделировании ТЭМ можно увидеть, как воздействуют температуры на ТЭМ, какое количество термоэлектрических модулей понадобится при определенной температуре источника тепловой энергии [2-4].

Основной **целью** является разработка имитационной модели в программной среде ANSYS

workbench для моделирования зависимостей выходных характеристик ТЭМ от перепада температур между нагреваемой и охлаждаемой стороной ТЭМ.

Основная задача исследования состоит в разработке математической модели работы термоэлектрического модуля в среде ANSYS с описанием дифференциальных уравнений, которые используются при моделировании термоэлектрических модулей.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились при помощи общенаучных методов в рамках статического и логического анализа.

Объектом исследования является имитационная модель термоэлектрического модуля в среде ANSYS, которая за счет перепада температур между сторонами ТЭМ генерирует электрическую энергию.

При математическом описании ТЭМ используются классические уравнения термоэлектричества. Модель показывает температурные зависимости свойств полупроводниковых материалов ТЭМ в заданном диапазоне температур, включая электрические и тепловые потери [4-7]. Рассмотрим уравнения для описания модели термоэлектрического модуля в программе ANSYS workbench.

Уравнение теплового потока (1) и уравнение непрерывности электрического заряда (2) объединены термоэлектрическими материальными уравнениями (3), (4), а также уравнением состояния в диэлектрической среде (5). Уравнения представлены в научных работах [8, 9].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = \dot{q}; \quad (1)$$

$$\nabla \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) = 0; \quad (2)$$

$$q = [\Pi] J - [\lambda] \nabla T; \quad (3)$$

$$J = [\sigma] (E - [\alpha] \nabla T); \quad (4)$$

$$D = [\varepsilon] E; \quad (5)$$

$$E = -\nabla \varphi, \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

C – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

T – температура, °C;

\dot{q} – скорость тепловой генерации на единицу объема, Дж;

q – вектор плотности теплового потока, Вт/м²;

J – вектор плотности электрического поля, А/м²;

D – вектор электрической индукции, Кл/м²;

$[\Pi]$ = $T[\alpha]$ – матрица коэффициента Пельтье;

$[\lambda]$ – матрица теплопроводности;

$[\sigma]$ – матрица электрической проводимости;

$[\alpha]$ – матрица коэффициента Зеебека;

$[\varepsilon]$ – матрица диэлектрической проницаемости;

φ – электрический потенциал, В. Более подробное описание формул дано в научных работах [8, 9].

Для того чтобы связать уравнения термоэлектричества, требуется подставить уравнения (3)-(6) в уравнения (1)-(2) [8, 9]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + [\Pi] J - [\lambda] \nabla T = \dot{q}; \quad (7)$$

$$\nabla \left([E] \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + ([\sigma][\sigma] \nabla T) + \nabla ([\sigma] \nabla \varphi) = 0. \quad (8)$$

Полученные уравнения (7) и (8) применяются при моделировании ТЭМ в программных средах ANSYS workbench [8, 9].

ТермоЭДС, вырабатываемое термоэлектрическим модулем, определяется по выражению:

$$E_{ТЭДС} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (9)$$

Значение напряжения при добавлении нагрузки будет иметь вид:

$$U = E - R_H = E_{ТЭДС} - I \cdot R. \quad (10)$$

Сила тока ТЭМ определяется по следующему выражению:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R + R_H} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R(m + 1)}, \quad (11)$$

где R_H – внешняя нагрузка, Ом;

R – внутреннее сопротивление термоэлектрического модуля, Ом;

m – обозначение безразмерного коэффициента, который представляет

$$m = \frac{R_H}{R}. \quad (12)$$

Генерируемая мощность ТЭГ находится по уравнению:

$$P = U \cdot I = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{(R + R_H)^2} \cdot R_H = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{R} \cdot \frac{m}{(m + 1)^2}. \quad (13)$$

Основываясь на законе сохранения энергии, перепад тепловых потоков будет представлять собой электрическую мощность, которую можно найти по уравнению [8, 9]:

$$P = Q_h - Q_c. \quad (14)$$

КПД термоэлектрического модуля находится согласно уравнению:

$$\eta = \frac{P}{Q_h}. \quad (15)$$

Формирование имитационной модели.

Разработанная 3D модель термоэлектрическо-

го генератора в программе ANSYS workbench представлена на рисунке 1.

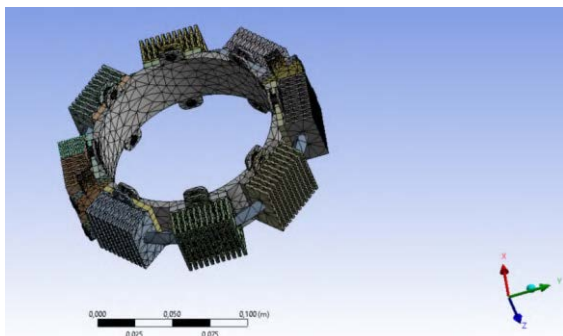


Рис. 1. Модель термоэлектрического генератора в программе ANSYS workbench

На каждую часть термоэлектрического генератора были заданы материалы и показатели теплопроводности. После задания материалов следующим этапом стало нанесение сетки на модель термоэлектрического генератора в программе ANSYS workbench [9, 10].

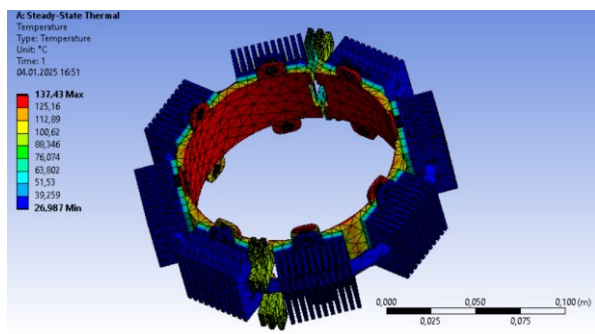


Рис. 2. Моделирование процесса нагрева и охлаждения ТЭГ в программе ANSYS workbench

Чтобы определить, как именно будет протекать процесс теплопередачи в термоэлектрическом генераторе, и какая именно температура будет доходить до модулей после тепловыравнивающей пластины, была исследована имитационная модель термоэлектрического генератора в среде ANSYS, где температура нагрева была установлена в 137°C . Эта температура соответствует температуре дымоотводных газов котельной, а температура охлаждения была задана в 27°C . По результатам моделирования после тепловыравнивающей пластины на ТЭМ будет температура в пределах 100°C . Температуру с нагреваемой стороны задаем выше

100°C в связи с тем, чтобы определить возможность применения ТЭГ не только как для тепловых сетей, но и для дымоотводных труб. После рассмотрения распределения температуры в ТЭГ для определения требуемого количества ТЭМ в зависимости от перепада температур между сторонами ТЭМ исследовали один ТЭМ. Так как конструкции ТЭГ могут быть разными, основной принцип работы ТЭМ остается неизменным.

В дальнейшем исследовании будет разработана имитационная модель ТЭМ, где с нагреваемой стороны будет задаваться температура нагрева от $30\text{--}120^{\circ}\text{C}$, при охлаждении противоположной стороны ТЭМ в 27°C .

Результаты и их обсуждения

Имитационная модель термоэлектрического модуля включает в себя полупроводники -n типа и -p типа, которые соединены между собой последовательно. Сверху на полупроводники установлена керамическая пластина с обеих сторон термоэлектрического модуля, для того чтобы сгенерировать электрический ток. В целях исследования была задана внешняя нагрузка 2 Ом. Температура с нагреваемой стороны изменялась с $30\text{--}120^{\circ}\text{C}$, а охлаждение осуществлялось при 27°C [9-11].

Исследование воздействия перепада температур на модуль очень важно, так как при случае перегрева модуля он может выйти из строя или вообще не генерировать электрическую энергию в требуемом диапазоне температур. Нагреваемая сторона термоэлектрического модуля окрашена красным цветом, а охлаждаемая сторона – синим цветом, что наглядно представлено на рисунке 3. Согласно моделированию ТЭМ температура нагреваемой стороны достигла 100°C , а температура с охлаждаемой стороны – 27°C [9-11].

На рисунке 4 представлено сечение ТЭМ, где дана генерация напряжения при моделировании ТЭГ в программе ANSYS workbench. При моделировании получили нагревание в 100°C и охлаждение в 27°C , а выходное значение напряжения при разнице температур в 73°C составило $U = 1,55\text{ В}$ [9-11].

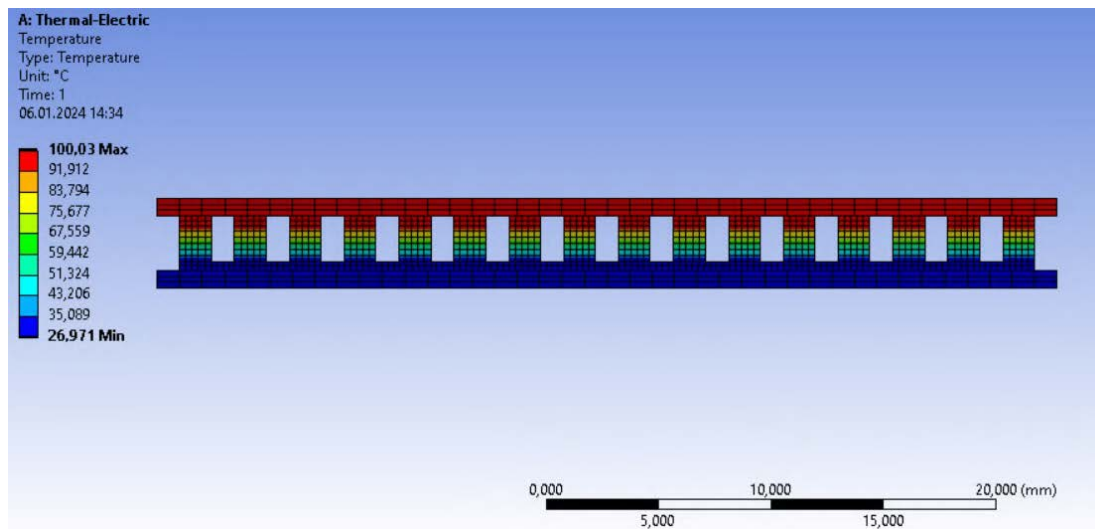


Рис. 3. Графическое изображение температурного профиля термоэлектрического модуля в среде ANSYS

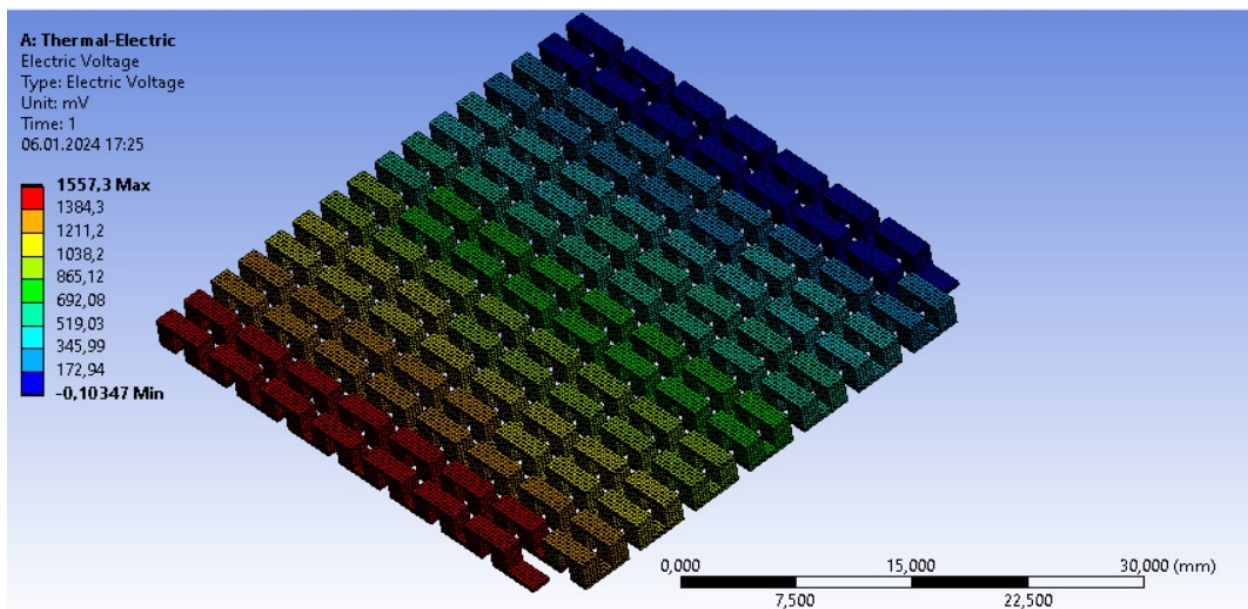


Рис. 4. Моделирование процесса генерации термоЭДС в зависимости от перепада температур между сторонами ТЭМ в ANSYS

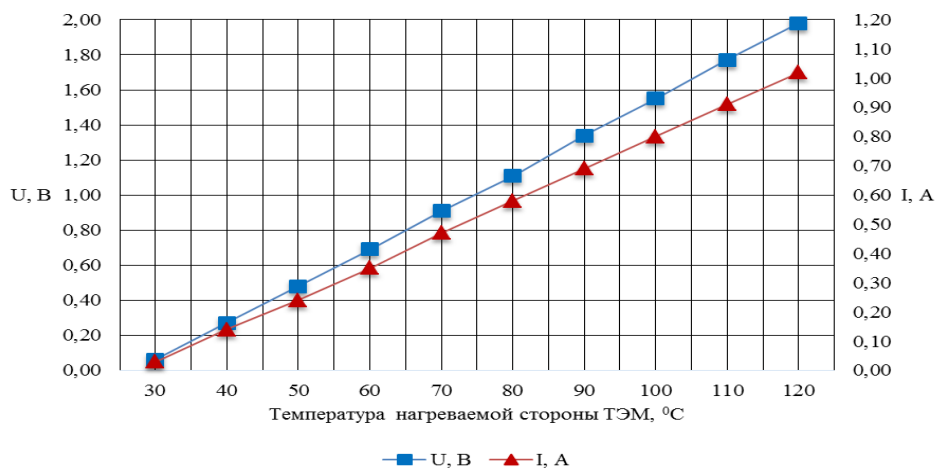


Рис. 5. U (В), I (А) в зависимости от температуры нагреваемой стороны ТЭМ

Имитационная модель термоэлектрического модуля в среде ANSYS позволяет задавать требуемый температурный градиент для определения значения силы тока, термоЭДС и выходной мощности при использовании одного модуля. Основываясь на полученных данных, можно определить требуемое количество ТЭМ, полученные данные представлены ниже [9-11].

Полученные данные сведем в таблицу.

По результатам моделирования разработанной имитационной модели ТЭМ в программе

ANSYS workbench можно сделать вывод, что применение ТЭМ в диапазоне температур от 30 до 120°C является возможным. Имитацией температурных значений можно рассчитать, какое количество электрической энергии получится от одного ТЭМ. Комбинируя количество термоэлектрических модулей, можно определить требуемые энергетические параметры для электропитания слаботочных систем дистанционного мониторинга тепловых сетей [9-11].

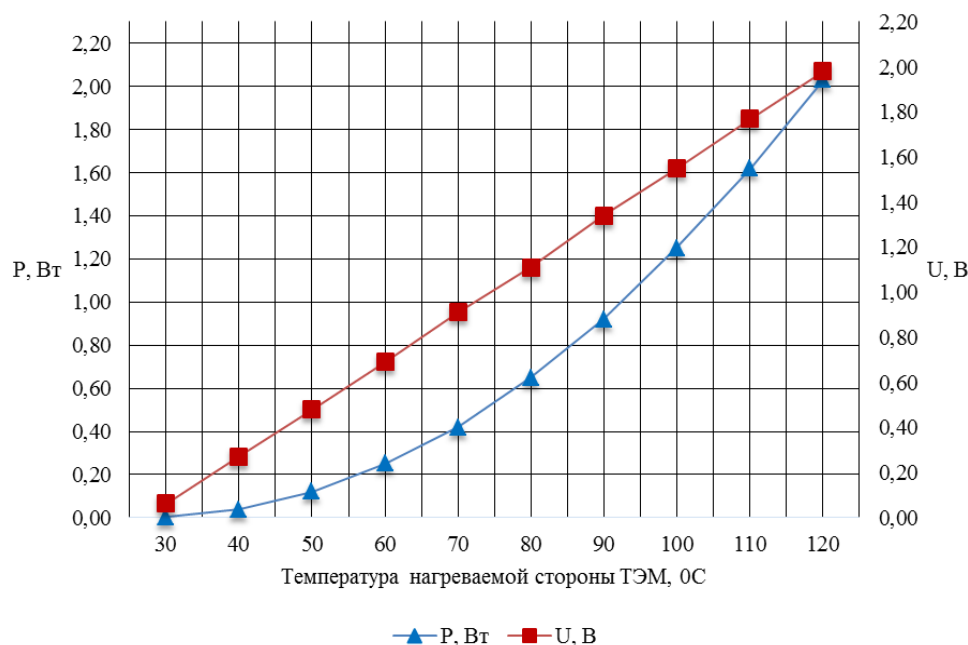


Рис. 6. P (Вт), U (В) в зависимости от температуры нагреваемой стороны ТЭМ

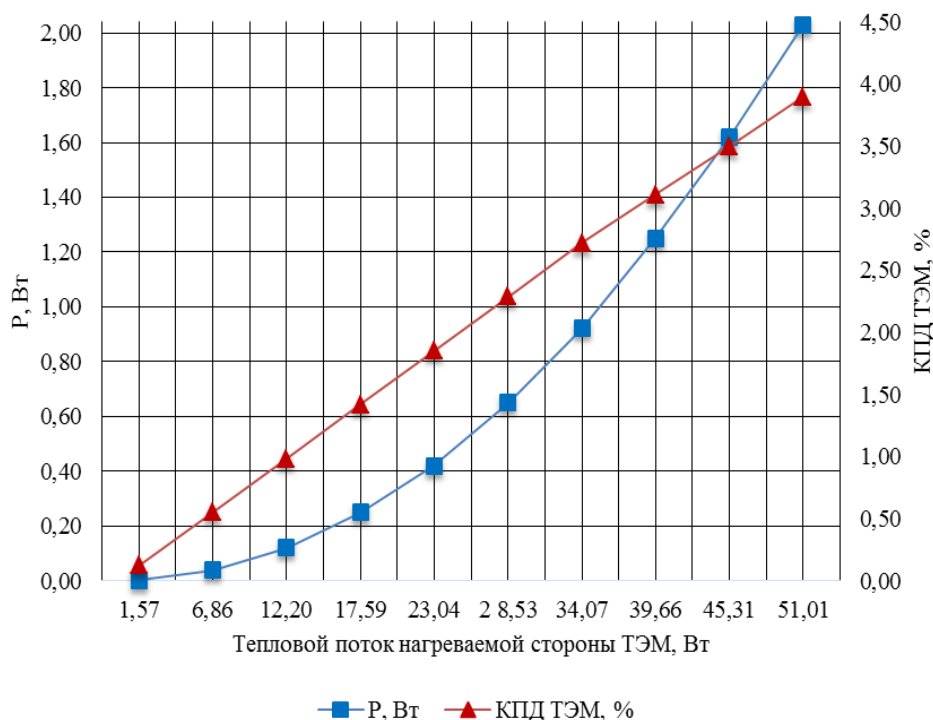


Рис. 7. P (Вт), η (%) в зависимости от теплового потока нагреваемой стороны ТЭМ

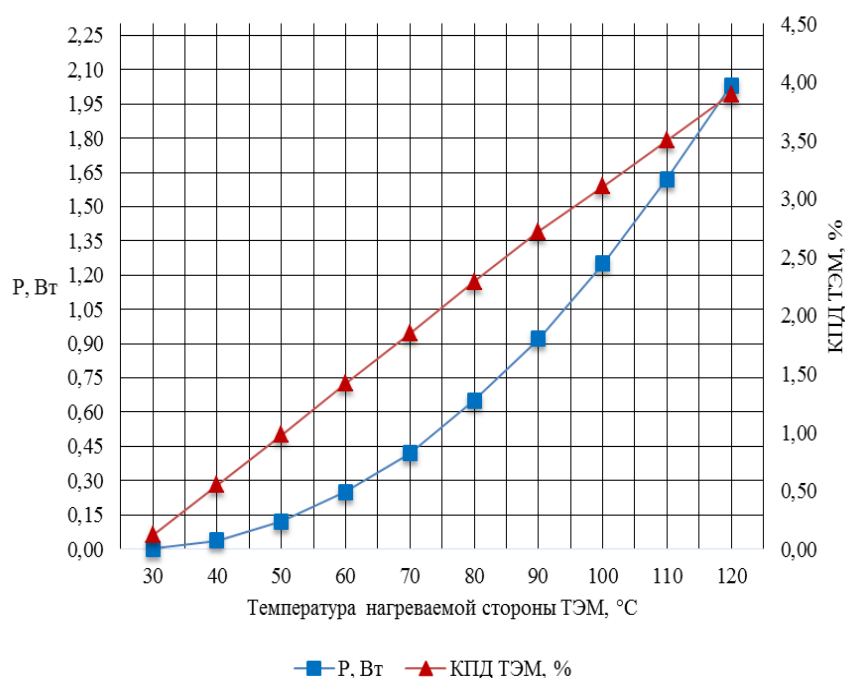


Рис. 8. P (Вт), η (%) в зависимости от температуры нагреваемой стороны ТЭМ

Таблица

Выходные характеристики ТЭГ в программе ANSYS workbench

T_x , °C	T_n , °C	U , В	I , А	P , Вт	Q_n , Вт	η , %
27	30	0,0621	0,031	0,0021	1,571	0,121
	40	0,271	0,142	0,0383	6,863	0,552
	50	0,481	0,241	0,121	12,201	0,983
	60	0,692	0,352	0,252	17,593	1,421
	70	0,913	0,471	0,423	23,042	1,852
	80	1,114	0,582	0,651	28,531	2,293
	90	1,345	0,691	0,922	34,072	2,721
	100	1,551	0,803	1,253	39,661	3,115
	110	1,772	0,914	1,625	45,315	3,54
	120	1,983	1,021	2,031	51,012	3,91

Выводы

1. При постоянном охлаждении модуля 27°C и при тепловой нагрузке от 30-120°C образуется градиент температуры. При нагреве термоэлектрического модуля до 120°C получили максимальные показатели ТЭМ. Полученные выходные характеристики при моделировании составили: $U = 1,98$ В, $I = 1,02$ А, $P = 2,03$ Вт.

2. Имитационная модель позволяет определить выходное значение термоЭДС в зависимости от температуры нагрева и охлаждения. Согласно полученным зависимостям термоЭДС от перепада температур между сторонами ТЭМ возможно рассчитать требуемое количество ТЭМ для слаботочных систем дистанционного мониторинга тепловых сетей.

3. Показатель вырабатываемого термоЭДС ТЭМ зависит от показателя коэффициента Зеебека и количества термоэлектрических модулей, чем выше показатели, тем выше вырабатываемая термоЭДС.

Библиографический список

1. Хабиров, Ф. Ф. Исследование возможности применения термоэлектрического генератора в вентиляционной системе птичника / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин. – Текст: непосредственный // Современное научное знание в условиях системных изменений: материалы VII Национальной научно-практической конференции, посвященной 25-летию Тарского филиала ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Тарский филиал

ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 18-19 июня 2024 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2024. – С. 50-55.

2. Хабилов, Ф. Ф. Математическое моделирование работы термоэлектрического генератора и фотоэлектрического преобразователя в среде имитационного блочного моделирования matlab / Ф. Ф. Хабилов, В. С. Вохмин, А. В. Идрисов. – DOI 10.31563/2308-9644-2024-52-2-61-70. – Текст: непосредственный // Российский электронный научный журнал. – 2024. – № 2 (52). – С. 61-70.

3. Вохмин, В. С. Исследование термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 для слабotoчных систем сельскохозяйственных предприятий / В. С. Вохмин, Ф. Ф. Хабилов. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-232-2-86-92. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 2 (232). – С. 86-92.

4. Хабилов, Ф.Ф. Термоэлектрический генератор на биотопливе / Ф. Ф. Хабилов, В. С. Вохмин, Р. В. Сарварова. – Текст: непосредственный // Электроэнергетика сегодня и завтра: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Курск, 24 марта 2023 года / Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова; Научно-образовательный центр «Инженер». – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. – Т. 2. – С. 220-224.

5. Хабилов, Ф. Ф. Теоретическое обоснование применения термоэлементов в системе дымоотведения котельной / Ф. Ф. Хабилов, В. С. Вохмин, Д. Д. Харисов. – Текст: непосредственный // Современные тенденции повышения энергоэффективности в инженерных сетях и ЖКХ: Материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках Весеннего форума ЖКХ и строительства, Уфа, 16-18 апреля 2019 года. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2019. – С. 110-117.

6. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: справочное пособие. – Санкт-Петербург: ИПФ «Криотерм», 2004. – 53 с. – Текст: непосредственный.

7. Огуречников, Л. А. Сравнительный анализ низкотемпературных энергосберегающих тех-

нологий / Л. А. Огуречников. – Москва: Промышленная энергетика, 2001. – № 2. – С. 7-10.

8. Коротков, А. С. Моделирование термоэлектрического генератора на основе МЭМС технологии / А. С. Коротков, В. В. Лобода. – Текст: непосредственный // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 4. – С. 71-76.

9. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с. – Текст: непосредственный.

10. Хабилов, Ф. Ф. Моделирование работы термоэлектрического генератора в программном комплексе ANSYS Workbench / Ф. Ф. Хабилов, В. С. Вохмин. – DOI 10.24412/2078-1318-2024-1-151-159. – Текст: непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (75). – С. 151-159.

11. Karri, M., Thacher, E., Helenbrook, B. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management*. 52. 1596-1611. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.013.

References

1. Khabirov, F.F. Issledovanie vozmozhnosti primeneniia termoelektricheskogo generatora v ventilatsionnoi sisteme ptichnika / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin // Sovremennoe nauchnoe znanie v usloviakh sistemnykh izmenenii: Materialy VII Natsionalnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 25-letiiu Tarskogo filiala FGBOU VO Omskii GAU, Tarskii filial FGBOU VO Omskii GAU, 18–19 iyunia 2024 goda. – Омск: FGBOU VO Omskii GAU, 2024. – С. 50-55.

2. Khabirov, F.F. Matematicheskoe modelirovanie raboty termoelektricheskogo generatora i fotoelektricheskogo preobrazovatelia v srede imitatsionnogo blochnogo modelirovaniia Matlab / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin, A.V. Idrisov // Rossiiskii elektronnyi nauchnyi zhurnal. – 2024. – No. 2 (52). – С. 61-70. – DOI 10.31563/2308-9644-2024-52-2-61-70.

3. Vokhmin, V.S. Issledovanie termoelektricheskogo modulia TGM-127-1,4-2,0 dlia slabotochnykh sistem selskokhoziaistvennykh predpriatii / V.S. Vokhmin, F.F. Khabirov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universi-

teta. – 2024. – No. 2 (232). – S. 86-92. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-232-2-86-92.

4. Khabirov, F.F. Termoelektricheskii generator na biotoplive / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin, R.V. Sarvarova // Elektroenergetika segodnia i zavtra: sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Kursk, 24 marta 2023 goda / Kurskaia gosudarstvennaia selskokhoziaistvennaia akademiia imeni I.I. Ivanova; Nauchno-obrazovatelnyi tsentr «Inzhener». T. 2. – Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga", 2023. – S. 220-224.

5. Khabirov, F.F. Teoreticheskoe obosnovanie primeneniia termoelementov v sisteme dymootvedeniia kotelnoi / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin, D.D. Kharisov // Sovremennye tendentsii povyseniia energoeffektivnosti v inzhenernykh setiakh i ZhKKh: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh Vesennego foruma ZhKKh i stroitelstva, Ufa, 16–18 aprelya 2019 goda. – Ufa: Bashkirskii GAU, 2019. – S. 110-117.

6. Termoelektricheskie moduli i ustroistva na ikh osnove. Spravochnoe posobie. – Sankt-Peterburg: IPF «Krioterm», 2004. – 53 s.

7. Ogurechnikov L.A. Sravnitelnyi analiz nizkotemperaturnykh energosberegaiushchikh tekhnologii / L.A. Ogurechnikov // Promyshlennaya energetika. – 2001. – No. 2. – S. 7-10.

8. Korotkov, A.S. Modelirovanie termoelektricheskogo generatora na osnove MEMS tekhnologii / A.S. Korotkov, V.V. Loboda // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES). – 2016. – No. 4. – S. 71-76.

9. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika T. VIII. Elektrodinamika sploshnykh sred. – Moskva: FIZMATLIT, 2005. – 656 s.

10. Khabirov, F.F. Modelirovanie raboty termoelektricheskogo generatora v programmnom komplekse ANSYS Workbench / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin // Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 1 (75). – S. 151-159. – DOI 10.24412/2078-1318-2024-1-151-159.

11. Karri, M., Thacher, E., Helenbrook, B. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management*. 52. 1596-1611. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.013.



УДК 631.358:635:34

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-247-5-87-95

И.С. Кручинкина, А.С. Алатырев,
С.С. Алатырев, М.А. Пекунькин
I.S. Kruchinkina, A.S. Alatyrev,
S.S. Alatyrev, M.A. Pekunkin

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТГИБА РАСТЕНИЙ КАПУСТЫ ПЕРЕД МАШИНОЙ УБОРКОЙ УРОЖАЯ

RESEARCH OF BENDING CABBAGE PLANTS BEFORE MACHINE HARVESTING

Ключевые слова: машинная уборка кочанной капусты, исследование процесса отгиба растений капусты.

Keywords: headed cabbage machine harvesting, study of cabbage plant bending.