

УДК 621.362

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹Шелехов И.Ю., ¹Пожидаев В.В., ²Смирнов Е.И.

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск,
e-mail: promteplo@yandex.ru;*

²*ООО «Термостат+», Иркутск, e-mail: evg_smirnof@mail.ru*

В статье представлены результаты исследования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на основе термоэлектрических модулей, эксплуатация которых происходила в Иркутской области. Приводятся результаты изменения эффективности работы классических и пространственно ориентированных термоэлектрических модулей в различных энергетических системах. Авторами ставится задача по увеличению эффективности работы термоэлектрических систем за счет применения конструктивно-технических решений. Цель исследования состояла в проведении технико-экономических обоснований применения конструктивных решений в создании термоэлектрических систем. Эксперименты проводились в лаборатории ИРНТУ «Современное нагревательное оборудование». Для проведения испытаний использовался стенд на основе измерителя-регулятора ТРМ138, прибор фирмы «ОВЕН» марки ИМС-Ф1.Щ1 с комплектом термопар. Предметом исследования были два типа термоэлектрических систем. Первая – созданная по принципу классических термоэлектрических модулей, вторая – созданная на основе запатентованной конструкции. В статье представлены исследования параметров термоэлектрических систем. Показано, что с применением новых конструктивно-технологических решений возможно увеличить КПД термоэлектрических модулей и снизить их себестоимость. В результате проведенной работы было определено, что эффективность термоэлектрических систем с применением запатентованного метода изготовления термоэлектрических модулей в среднем увеличивается на 16,5%, а стоимость уменьшается в 8 раз.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), термоэлектрический модуль, энергетическая система, эффективность, окупаемость, технические решения, конструктивные решения

STUDY EFFICIENCY OF WORK THERMOELECTRIC SYSTEMS

¹Shelekhov I.Yu., ¹Pozhidaev V.V., ²Smirnov E.I.

¹*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: promteplo@yandex.ru;*

²*LLC «Thermostat +», Irkutsk, e-mail: evg_smirnof@mail.ru*

The article presents the results of a study of renewable energy sources (RES) based on thermoelectric modules, the operation of which took place in the Irkutsk region. The results of changes in the efficiency of classical and spatially oriented thermoelectric modules in various energy systems are presented. The authors set the task of increasing the efficiency of thermoelectric systems through the use of structural and technical solutions. The aim of the study was to conduct feasibility studies on the use of structural solutions in the creation of thermoelectric systems. The experiments were conducted in the laboratory of INRTU «Modern Heating Equipment». For testing, we used a test bench based on the TPM 138 measuring regulator, an OVEN device of the IM-F11.SCH1 brand with a set of thermocouples. The subject of research was two types of thermoelectric systems. The first, created on the principle of classical thermoelectric modules, the second, created on the basis of a patented design. The article presents a study of the parameters of thermoelectric systems. It is shown that with the use of new structural and technological solutions it is possible to increase the efficiency of thermoelectric modules and reduce their cost. As a result of the work, it was determined that the efficiency of thermoelectric systems using the patented method of manufacturing thermoelectric modules increases by an average of 16.5%, and the cost decreases by 8 times.

Keywords: renewable energy sources (RES), thermoelectric module, energy system, efficiency, payback, technical solutions, design solutions

Основной приоритет научных исследований на территории России принадлежит области использования и добычи нефти, природного газа, угля.

Вступив в рыночные отношения и выйдя со своей продукцией на международный рынок, производители обнаружили, что энергоёмкость нашей продукции в несколько раз выше, чем у западных производителей. Для обогрева помещений, находящихся в аналогичных климатических условиях, мы тратим в несколько раз больше энергии, чем в других странах. Это означает, что все производители сталкиваются с высокой стоимостью энергоресурсов, а в последние

годы ещё и с постоянным ростом их стоимости, а значит, со снижением конкурентоспособности их продукции. Для увеличения энергоэффективности производства многие производители ищут более перспективные и надежные варианты снабжения энергоресурсами. Проведенный нами анализ показал, что в Иркутской области, несмотря на климатические условия, параллельно с традиционными источниками энергии в имеющиеся системы жизнеобеспечения, в качестве резервного источника энергии устанавливаются приборы, работающие от солнечной энергии [1–3]. В основном предпочтение отдается солнечным системам

горячего водоснабжения, так как в подавляющем большинстве, в отдаленных районах, где в основном и сконцентрировано промышленное производство, с окончанием отопительного сезона исчезает горячее водоснабжение. Внедрение других альтернативных источников энергии ведется в незначительных масштабах. Исключением могут служить генераторы электрической энергии малой мощности, также работающие от солнечной энергии. Несмотря на то, что прибыль от внедрения таких систем не может покрыть расходы, приборы находят широкое применение, так как отсутствие постоянного и стабильного источника электрической энергии, в современных условиях может привести к более серьезным материальным затратам. Несмотря на наши климатические условия, определенную сложность в эксплуатации, высокую стоимость и вероятность того, что прибыль от внедрения таких систем не сможет покрыть расходы, приборы находят широкое применение [4–6].

Резервные источники электроснабжения очень популярны в нашем регионе, так как обширные территории, климатические условия, разветвленные и устаревшие сети не всегда позволяют гарантировать потребителям стабильные поставки энергии. Долгие годы вопрос об использовании возобновляемой энергии в энергетическом комплексе России практически не рассматривался, в основном из-за огромных запасов энергетического сырья. Интерес к данной области исследования стал проявляться в последнее время [7], с одной стороны, это связано с желанием снизить энергетические затраты при обслуживании зданий различного назначения, с другой, связано с повышением качества жизни людей, проживающих за чертой города.

Внедрение генерирующих устройств, работающих на солнечной энергии, началось с момента, когда КПД данных приборов перешел отметку в 7%, при значениях 5–6% применялись только тонкопленочные гибкие панели, изготовленные из аморфного кремния. Когда у солнечных батарей КПД стал находиться в диапазоне от 15% до 25%, произошел качественный скачок в их практическом применении [8]. С внедрением солнечных батарей открылась новая эра практического использования полупроводниковых материалов, так как новые открытия в одной области науки всегда приводят к качественным переменам в сопутствующих областях. Например, в области термоэлектричества. На текущий момент КПД термоэлектрических материалов и КПД материалов, используемых для производства фотоэлементов, находится на одном уровне, но производство фотоэлементов пока проще и дешевле. В отличие

от фотоэлементов, на КПД термоэлектрических систем в большей степени оказывают влияние проектно-технические решения, чем электрофизические характеристики применяемых материалов [9–10]. Классические термоэлектрические модули изготавливаются путем последовательного размещения проводников *n*- и *p*-типа между двух керамических подложек. Расстояние между керамическими подложками определяется высотой проводников *n*- и *p*-типа, обычно это 1–3 мм, при этом проводники обладают хорошей теплопроводностью, и это является определяющим фактором, снижающим КПД. В основном данную проблему решают с помощью установки на внешнюю сторону термоэлектрического модуля радиатора, но их площадь незначительна, поэтому конструктивные решения при проектировании радиаторов нагрева и охлаждения не дают значительных результатов. Новые конструктивные решения [11–12], применяемые в области проектирования термоэлектрических модулей, показали, что это упрощает конструкции систем, снижает стоимость и увеличивает эффективность. Но при этом предлагаемые технические решения сложно применить при массовом производстве.

Технико-экономическое обоснование применения новых технических решений при конструировании термоэлектрических модулей применительно к различным энергетическим системам. На текущий момент применение термоэлектрических модулей обосновано при малых мощностях и в системах охлаждения электронной техники. С применением новых конструктивных решений расширяется спектр применения данных систем. Нашими исследованиями мы показываем, что научные исследования в области термоэлектрических систем находятся на переломном этапе, когда их применение становится целесообразным в энергетических системах различной мощности.

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводились на территории Иркутского национального исследовательского технического университета в лаборатории «Современное нагревательное оборудование».

Для измерения температурных параметров макетов энергетических систем и параметров термоэлектрических модулей использовался специализированный стенд, изготовленный на основе измерителя-регулятора ТРМ 138, универсального восьмиканального измерителя-регулятора. Сигналы с термопар обрабатывались штатным программным обеспечением, поставляемым совместно с приборами (Owen Process Manager).

Контроль напряжения, потребляемого тока, мощности осуществлялся прибором фирмы «ОВЕН» марки ИМС-Ф1.Ц1.

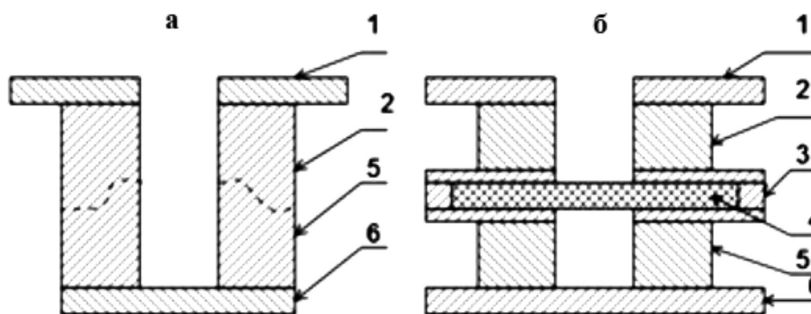


Рис. 1. Конструктивно-технические решения при изготовлении термоэлектрических модулей: а) классического типа; б) двухкаскадного типа

Результаты исследования и их обсуждение

Классический вид одного элемента термоэлектрического модуля представлен на рис. 1, позиция «а», где 1 – это токоподводящая дорожка холодного контакта, 6 – токоподводящая дорожка горячего контакта, движение теплового потока в полупроводнике (2, 5) осуществляется от одного контакта к другому. Для увеличения КПД были предприняты российскими и зарубежными учеными конструктивно-технические решения по разделению полупроводника (позиция «б») на горячую и холодную зону, разместив между ними теплоизолирующий слой 4, соединив их дополнительной токопроводящей шиной 3, при этом получается двухкаскадный термоэлектрический модуль. Благодаря данному техническому решению, КПД многокаскадных термоэлектрических систем стал выше 30%, что поставило их на один уровень с солнечной энергетикой.

Если внимательно проанализировать фигуру «б», видно, что если оба каскада перенести в одну плоскость и сориентировать полупроводники в одной полярности, то мы получим термоэлектрический модуль одностороннего действия. Если данные модули собрать в блоки, то получится термоэлектрический модуль с пространственной ориентацией сторон [13–14]. При этом, в зависимости от уровня электропроводности токоведущих шин, расстояние между теплопередающими сторонами можно значительно увеличить, измеряя его не единицами миллиметров, а десятками, снизив взаимное влияние практически до нуля. Наши научные исследования проводились в направлении оптимизации геометрических размеров. Обычно работы по оптимизации геометрических размеров заключаются в правильном подборе соотношения между сопротивлением модуля (R) и тепло-

водностью p - и n -элементов (G), так как эффективность термоэлектрического модуля имеет обратную зависимость от этих параметров. Сопротивление и теплопроводность зависят от площади проводника (S), его длины (l), от удельной электропроводности (σ) и удельной теплопроводности (λ):

$$R = \frac{l}{S \cdot \sigma}, \quad G = \frac{S \cdot \lambda}{l}.$$

При расчете эффективности термоэлектрического модуля фактически учитывается отношение удельной теплопроводности к удельной электропроводности, так как добротность термоэлектрического модуля рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot G},$$

где α – коэффициент Зеебека, а R и G – это две взаимозависимые величины. Как известно, с увеличением электропроводности увеличивается теплопроводность, и наоборот. В конструкции классического термоэлектрического модуля p - и n -элементы расположены перпендикулярно теплопередающим поверхностям, параллельно друг к другу на таком расстоянии, что тепловой поток распределен практически равномерно и направлен от одной поверхности к другой, потери в окружающую среду практически отсутствуют. Предложенное конструктивно-техническое решение позволило изменить конструкции термоэлектрических элементов с классического вида «а», как это показано на рис. 1, на вид «б». На данную разработку получен патент РФ № 2663748 [15].

Для сравнительных испытаний разрабатывались и изготавливались модули различных конструкций, в зависимости от типа энергетической системы и технологических возможностей закрепления модулей на ис-

точники «тепла» и «холода». Модули классического типа приобретались у ведущих производителей и устанавливались в конструкцию с радиаторами. Радиаторы рассчитывались в соответствии с методиками, представленными в своих публикациях ведущими учеными, работающими в этой области исследования.

В табл. 1 представлены результаты испытания классических термоэлектрических модулей, изготовленных для среды «вода» – «вода» № 1, «воздух» – «вода» № 2, «воздух» – «воздух» № 3, $\Delta T^{\circ}\text{C}$ – это градиент температуры, при котором проводились испытания. Измерения проводились при нагрузке в 4 Ом, ток сборки превышал значение 10 А.

В табл. 2 представлены результаты испытания термоэлектрических модулей, изготовленных по запатентованной технологии, для аналогичных сред.

На рис. 2 представлен график изменения напряжения на классическом термоэлектрическом модуле в зависимости от токовой нагрузки, а на рис. 3 представлен график изменения напряжения на авторском термоэлектрическом модуле. Испытания проводились в среде «воздух» – «вода».

Из проведенного эксперимента видно, что электрофизические показатели запатентованной конструкции выше, чем у классических термоэлектрических модулей. Кроме этого, необходимо учитывать, что при испытании авторского термоэлектрического модуля не использовались радиаторы, стоимость которых в восемь раз выше стоимости классического термоэлектрического модуля.

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что дополнительные конструктивно-технологические решения повышают эффективность термоэлектрических систем в среднем на 16,5%, при этом снижая её стоимость в 8 раз. При этом можно с полной уверенностью утверждать, что современное состояние научных знаний в области термоэлектричества должно сместить общую концепцию о том, что применение термоэлектрических преобразователей оправдано только в электронной промышленности при мощностях до нескольких десятков ватт. Наши исследования показывают, что в области создания энергосберегающих технологий термоэлектрические системы нового поколения займут достойное место.

Таблица 1

Результаты испытания термоэлектрического модуля классического вида

	№ 1	№ 2	№ 3
$\Delta T, ^{\circ}\text{C}$	U, B	U, B	U, B
50	36	34	38
70	49	48	52

Таблица 2

Результаты испытания авторского термоэлектрического модуля

	№ 1	№ 2	№ 3
$\Delta T, ^{\circ}\text{C}$	U, B	U, B	U, B
50	42	44	43
70	57	58	55

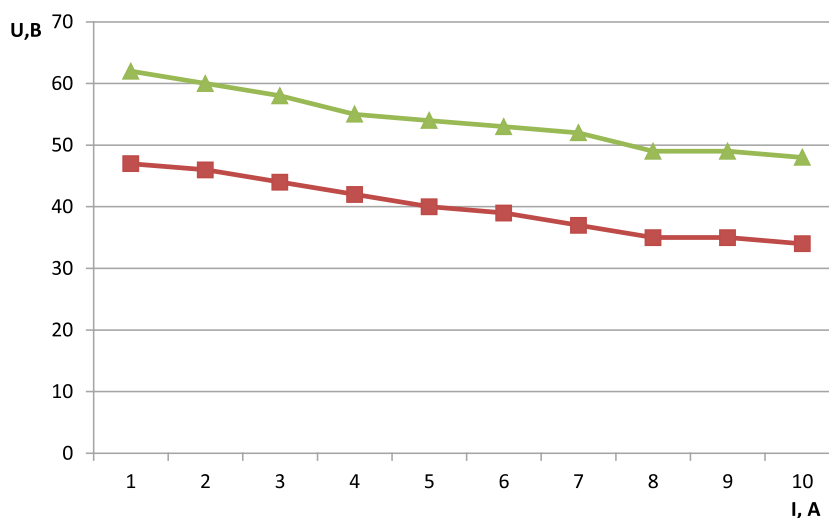


Рис. 2. График изменения напряжения на классическом термоэлектрическом модуле в зависимости от токовой нагрузки

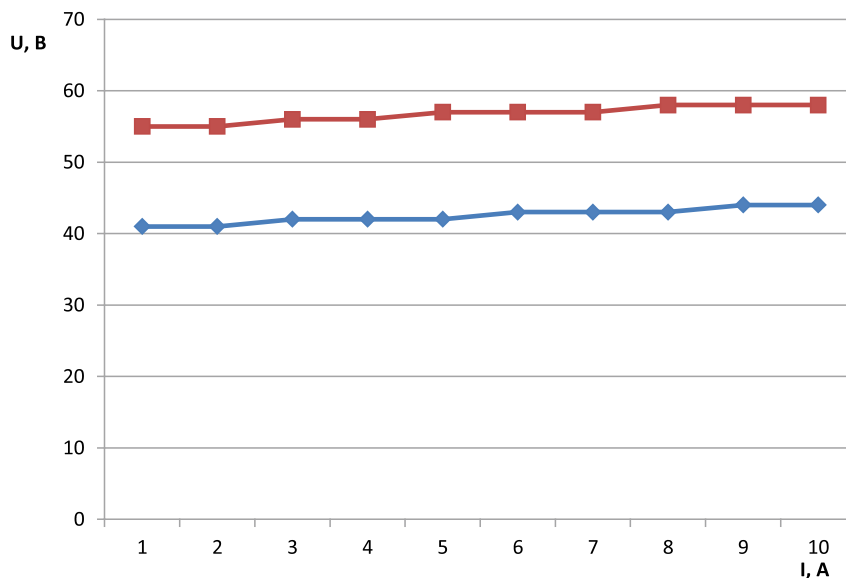


Рис. 3. График изменения напряжения на авторском термоэлектрическом модуле в зависимости от токовой нагрузки

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-48-380002.

Список литературы

1. Шелехов И.Ю., Шишелова Т.И., Смирнов Е.И. Новые технические решения для проектирования термоэлектрических систем // Вестник Мордовского университета. Бюллетень Мордовского университета. 2018. № 28(1). С. 48–61. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061.
2. Sugiarta N., Sastra Negara P. Technical feasibility evaluation on the use of a peltier thermoelectric module to recover automobile exhaust heat. Journal of Physics: Conference Series 2, Science, Technology, Innovation, and Culture for Sustainable Development: Challenge for Green Industry. «2nd International Joint Conference on Science and Technology, IJC-ST 2017». 2018. P. 012090.
3. Yoo C.-Y., Kim Y., Hwang J., Yoon H., Park S.H., Cho B.J., Min G. Impedance spectroscopy for assessment of thermoelectric module properties under a practical operating temperature Energy. 2018. Т. 152. P. 834–839.
4. Kim K., Kim H., Kim W. Enhanced mechanical stability by using a groove-type electrode in a thermoelectric module Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B. 2018. Т. 42. № 4. P. 285–290.
5. Köysal Y., Özdemir A.E., Atalay T. Experimental and modeling study on solar system using linear fresnel lens and thermoelectric module. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME. 2018. Т. 140. № 6. P. 061003.
6. Wang C., Calderón C., Wang Y. An experimental study of a thermoelectric heat exchange module for domestic space heating Energy and Buildings. 2017. Т. 145. P. 1–21.
7. Соколов М.М. Использование возобновляемых и нетрадиционных источников энергии: учеб. пособие. Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. 116 с.
8. Oki S., Suzuki R.O. Performance simulation of a flat-plate thermoelectric module consisting of square truncated pyramid elements. Journal of Electronic Materials. 2017. Т. 46. № 5. P. 2691–2696.
9. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savel'eva I.Y. Modification of the mathematical model of the thermoelectric module of a thermostating coating. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Т. 90. № 2. P. 344–352.
10. Mykhailovsky V.Y., Razinkov V.V., Maksimuk M.V., Havryliuk M.V. Experimental research on a thermoelectric generator cascade module for solid fuel teg. Journal of Thermoelectricity. 2017. № 5. P. 64–72.
11. Mykhailovsky V.Y., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. Research on thermoelements based on n-pbte and p-tags materials for thermoelectric generator cascade module. Journal of Thermoelectricity. 2017. № 3. P. 36–44.
12. Korde P., Kamble V. Efficient energy harvesting using thermoelectric module Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. Т. 106. P. 329–340.
13. Громов Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули // компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 108–113. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Components%20and%20Technologies%202014.pdf> (дата обращения: 21.02.2020).
14. Васильев Е.Н., Деревянко В.А. Расчет эффективности термоэлектрических модулей для охлаждения радиоэлектронных элементов // Решетневские чтения. Красноярск: Изд-во ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2013. Т. 1. № 17. С. 211–213.
15. Пат. 2663748, Российская Федерация, МПК H01L35/32. Пространственно ориентированный термоэлектрический модуль и способ его изготовления / И.Ю. Шелехов, Е.И. Смирнов, К.П. Кашко, И.В. Шелехова; заявитель и патентообладатель ООО «Термостат+». № 2015153586; заявл. 14.12.2015; опубл.28.02.2017, Бюл. № 7. 11 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 21.02.2020).