

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 2. С. 70–78
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 2, pp. 70–78

Научная статья
УДК 621.36
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187721>
EDN: <https://www.elibrary.ru/RDXCVE>

Определение контактного электрического сопротивления в термоэлектрических модулях методом вариации высоты ветвей по рабочим характеристикам

Д.В. Воробьев^{1✉}, П.Г. Макаров²

^{1,2}Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

¹vorobyevdv@mpei.ru[✉]

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального определения контактного электрического сопротивления «термоэлектрический материал-контактная площадка» (ТЭ материал-контактная площадка) в термоэлектрических модулях (ТЭМ) в рабочих режимах. Методика включает в себя определение контактного сопротивления в изотермическом режиме, двухэтапную обработку для исключения влияния джоулева нагрева и паразитной термоЭДС в измерениях. Построена конечно-элементная модель ТЭМ в программной среде COMSOL Multiphysics, учитывающая температурные зависимости свойств термоэлектрических материалов, электрическое сопротивление коммутационных контактов и определенное удельное электрическое сопротивление ТЭ материал-контактная площадка. Проведена экспериментальная верификация разработанной модели на образцах и сравнение с моделью без учета контактного сопротивления.

Ключевые слова: элемент Пельтье, термоэлектрический модуль, термоэлектрический охладитель, контактное сопротивление, COMSOL

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Для цитирования. Воробьев Д.В., Макаров П.Г. Определение контактного электрического сопротивления в термоэлектрических модулях методом вариации высоты ветвей по рабочим характеристикам // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 2. С. 70–78. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187721>

Original article

Electrical contacts resistance determination in thermoelectric modules by the method of varying the height of thermoelectric elements by operation

D.V. Vorobyev¹✉, P.G. Makarov²

^{1,2}National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

¹vorobyevdv@mpei.ru✉

Abstract. This paper presents the results of an experimental study of electrical contact resistance of the contact of thermoelectric element- contact pad in thermoelectric modules (TEM) according to operational parameters. This method includes double approximation to exclude the impact of Joule heating and parasitic thermal EMF during measurements. A finite element model of TEM was designed in COMSOL Multiphysics software that includes temperature dependences of thermoelectric properties of materials. Electrical resistance of the pads and measured contact resistance of thermoelectric element – pad. Experimental verification was performed to prove the need of accounting of electrical contact resistance in TEM model.

In the first part of the study the analysis of electrical contact methods is presented. All the methods can be divided in two groups: local measurement methods and methods of analysis of full TEMs. Method presented in current article belongs to the second group but with determination of electrical contacts resistance under operation.

In the second part of the study the methodology and experimental results of electrical contact resistance are presented. Since electrical contact resistance does not depend on thermoelectric elements length, the method of measuring of TEMs performance and approximation is suggested. Obtained results show that electrical contact resistance is in appropriate range and equal to $5,2 \times 10^{-11} \text{ Ohm} \times \text{m}^2$.

Determined value of electrical contact resistance was implemented in COMSOL Multiphysics 3D model to verify experimental TEM performance.

Further, developed 3D model was used to compare TEM performance under different operational modes. This study was compared to the model that does not include electrical contact resistance. The results show that electrical contact resistance should be considered to predict TEM performance with higher accuracy especially in TEM systems with big quantity of electric contacts.

Keywords: Peltier element, thermoelectric module, thermoelectric cooler, contact resistance, COMSOL

Funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No 23-19-00840).

For citation. Vorobyev D.V., Makarov P.G. Electrical contacts resistance determination in thermoelectric modules by the method of varying the height of thermoelectric elements by operation. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 2, pp. 70–78. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187721>

Введение

Развитие микро- и миниатюрных термоэлектрических модулей (ТЭМ) требует высокой точности прогнозирования их рабочих характеристик. С учетом ограничения ТЭМ в части максимальной холодопроизводительности требуется

уменьшать высоту термоэлектрических элементов или увеличивать их количество. По мере уменьшения высоты термоэлектрических элементов или увеличения их количества, влияние электрического контакта «термоэлектрический материал-контактная площадка» (ТЭ материал-

контактная площадка) становится все более заметным [1, 2]. Как показывают исследования, для эффективной работы миниатюрных ТЭМ удельное контактное сопротивление не должно превышать 10^{-8} Ом \times м² [3]. При этом, как демонстрируется в работе [4], для низких термоэлементов наличие контактного сопротивления всего 10^{-9} Ом \times м² может снизить их производительность на 50 %. Такое сильное влияние неизбежно приводит к существенным расхождениям между теоретическими прогнозами, не учитывающими контактные потери, и экспериментальными результатами [5].

Существующие подходы к определению контактного сопротивления R_c можно разделить на две категории. Первая включает в себя локальные методы, требующие специальных тестовых образцов или разборки ТЭМ: зондовые измерения, метод на основе эффекта Пельтье [6] применяемый к отдельным ветвям. Эти методы неприменимы для неразрушающей диагностики готовых изделий, а также мало применимы к готовым ТЭМ, где дополнительным фактором является еще и технология сборки многопарных ТЭМ с реально отличающейся толщиной соединений. Вторая категория – методы анализа рабочего ТЭМ в сборе [7]. Наиболее продвинутый предложен в статье [4], основан на итеративной подгонке параметров комплексной модели под результаты специального эксперимента.

Фундаментальной основой для прямого выделения R_c является его трактовка как параметра, определяющегося технологией изготовления и не зависящего от геометрии ветви. Полное электрическое сопротивление ТЭМ $R_{ТЭМ}$ линейно зависит от длины ветви L :

$$R_{ТЭМ} = A \times L + B, \quad (1)$$

где коэффициент A определяется свойствами материала, а постоянный член B пропорционален сумме контактных сопротивлений и сопротивлению коммутационных элементов ТЭМ. Таким образом, измерение $R_{ТЭМ}$ для серии ТЭМ с разной L и экстраполяция к $L = 0$ дает искомое значение B и, следовательно, R_c . Однако практическая реализация этого принципа для готовых ТЭМ осложнена необходимостью точного измерения именно омического сопротивления, без искажающего влияния термоЭДС, возникающей при протекании тока через ТЭМ.

Для решения этой проблемы в данной работе предлагается и реализуется метод, сочетающий принцип геометрической экстраполяции и классическим изотермическим подходом к измерению сопротивления. Метод основан на следующих ключевых элементах:

1. Эксперимент на серии готовых ТЭМ, идентичных по материалам, технологии создания контактов и площади сечения, но имеющих различную высоту ветвей L .

2. Использование детальной физической модели с учетом контактных сопротивлений для интерпретации результатов эксперимента. Контактное сопротивление R_c вводится в модель как параметр тонкого слоя с удельным электрическим сопротивлением ρ_c .

3. Решение обратной задачи с критерием постоянства R_c и сравнение с экспериментальными данными.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная апробация метода определения контактного электрического сопротивления в ТЭМ, основанного на анализе рабочих характеристик серии образцов с варьируемой высотой ветвей.

Для достижения этой цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. Проведение эксперимента по снятию электрических параметров ТЭМ с разной высотой ветвей в изотермическом режиме $\Delta T = 0$ К;

2. Определение контактного сопротивления;

3. Разработка конечно-элементной модели, адекватно описывающих процессы и теплообмен в исследуемых ТЭМ с учетом геометрии реальных образцов;

4. Верификация модели в сравнении с экспериментальными данными.

Экспериментальная установка и методика

Исследования образцов ТЭМ проводились на разработанной установке, позволяющей измерять теплофизические и электрические параметры ТЭМ под тепловой нагрузкой. Эксперимент проводился в изотермическом режиме ($\Delta T = 0$ К) на внешних сторонах ТЭМ на серии ТЭМ с различной высотой ветвей L .

На рисунке 1 представлена структурная схема установки, включающая:

- исследуемый ТЭМ, устанавливаемый на медное основание с помощью припайки;

- нагреватель Q_c , создающий тепловую нагрузку на холодной стороне исследуемого ТЭМ;
- система термостабилизации с регулируемой температурой, включающая в себя, ТЭМ основания, медное основание и радиатор;
- датчики температуры (Pt100) на холодной стороне исследуемого ТЭМ и на медном основании под исследуемым ТЭМ;
- контроллер ТЭМ;
- блок управления тепловой нагрузкой;
- персональный компьютер.

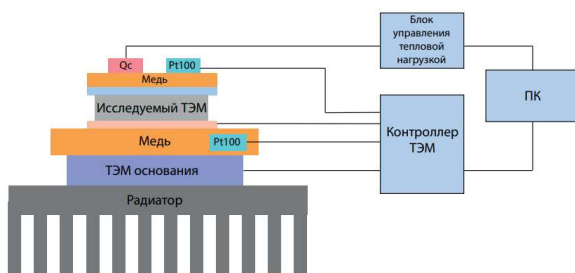


Рис. 1. Схема установки для исследования ТЭМ

Подводимая к холодной стороне ТЭМ мощность нагревателя Q_c равномерно распределяется по медной пластине и подводится к холодной стороне ТЭМ. Потребляемая мощность исследуемого ТЭМ, а также температуры на сторонах исследуемого ТЭМ задаются и определяются контроллером ТЭМ. Все результаты записывались в стационарном режиме после установления температурного равновесия. Флуктуации температуры на сторонах ТЭМ в стационарном режиме не превышали $0,005\text{ }^\circ\text{C}$.

Методика и результаты

Для определения R_c использовался метод вариации геометрии, основанный на измерении полного сопротивления серии ТЭМ с разной высотой ветвей L . Исследовалась серия из пяти ТЭМ, изготовленных по идентичной технологии (одинаковая площадь сечения ветвей S , материалы и процесс формирования контактов), но с варьируемой высотой L в диапазоне от $0,5$ до $1,5$ мм. Все измерения проводились в изотермических условиях ($\Delta T = 0\text{ K}$) при пяти значениях силы тока I в диапазоне от 70 до 400 мА. Для вариации силы тока, на ТЭМ подавалась тепловая нагрузка разной величины. Для каждого ТЭМ, содержащего $N = 23$ термоэлектрические пары, измерялись падение напряжения U и рассчитывались следующие величины:

- Полное электрическое сопротивление одной пары ветвей:

$$R_{\text{пар}} = \frac{U}{I \times N}, \quad (2)$$

- Джоулева мощность, выделяющаяся на одной паре ветвей:

$$P_{\text{пар}} = I \times \frac{U}{N}. \quad (3)$$

Обработка экспериментальных данных выполнялась в два этапа. На первом этапе для каждого значения высоты ветвей L зависимость сопротивления пары $R_{\text{пар}}$ от джоулевой мощности $P_{\text{пар}}$ экстраполировались к $P_{\text{пар}} = 0$, что позволило исключить влияние внутреннего перепада температур и получить значение $R_{\text{пар}0}(L)$. На втором этапе полученная зависимость $R_{\text{пар}0}(L)$ аппроксимировалась линейной функцией, свободный член которой после вычета сопротивления металлизации соответствует искомому контактному сопротивлению R_c .

Первичные результаты измерений и расчетов для ТЭМ с разной высотой ветвей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные определения кажущегося сопротивления ТЭМ

Высота L , мм	I , А	U , В	$R_{\text{ТЭМ}}$, Ом	$R_{\text{пар}}$, Ом	$P_{\text{пар}}$, мВт
0,5	0,070	0,051	0,729	0,03168	0,155
	0,141	0,103	0,731	0,03176	0,631
	0,221	0,157	0,710	0,03089	1,510
	0,300	0,212	0,707	0,03073	2,765
	0,380	0,267	0,703	0,03055	4,410
0,7	0,070	0,068	0,971	0,04224	0,207
	0,141	0,139	0,986	0,04286	0,852
	0,220	0,212	0,964	0,04190	2,029
	0,300	0,286	0,953	0,04145	3,730
	0,380	0,363	0,955	0,04153	5,997
0,9	0,070	0,086	1,229	0,05342	0,262
	0,141	0,175	1,241	0,05396	1,073
	0,220	0,267	1,214	0,05277	2,554
	0,300	0,363	1,210	0,05261	4,735
	0,381	0,463	1,215	0,05284	7,664
1,2	0,070	0,113	1,614	0,07019	0,344
	0,141	0,230	1,631	0,07092	1,410
	0,221	0,353	1,597	0,06945	3,391
	0,301	0,484	1,608	0,06991	6,341
	0,391	0,622	1,591	0,06917	10,576
1,5	0,070	0,139	1,986	0,08634	0,423
	0,141	0,286	2,028	0,08819	1,754
	0,221	0,443	2,005	0,08715	4,255
	0,310	0,610	1,968	0,08555	8,217
	0,401	0,794	1,980	0,08609	13,852

На рисунке 2 графически представлены полученные экспериментальные данные с линиями тренда. В исследуемом диапазоне токов относительное изменение сопротивления не превышает 8 %, что позволяет аппроксимировать зависимость линейной функцией. В общем случае, при больших мощностях разогрева, данная зависимость становится нелинейной из-за неоднородности изменения температур вдоль ветвей.

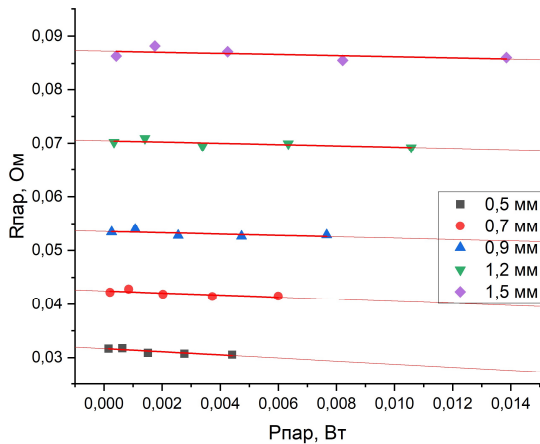


Рис. 2. Сопротивление пар термоэлектрических элементов разной высоты

В проведенном эксперименте, несмотря на внешние строго изотермические условия, джоулев разогрев и эффект Пельтье приводят к возникновению внутреннего перепада температуры вдоль ветвей, что искажает измерение чисто омического сопротивления.

Значения $R_{пар}$, полученные после экстраполяции к $P_{пар} = 0$, представляют собой сумму омического сопротивления материала ветвей, сопротивления металлизации керамических плат, контактного сопротивления и систематической добавки, обусловленной паразитной термоЭДС от внутреннего перепада температур ветвей.

Паразитная термоЭДС $U_{термо}$, возникающая из-за перепада температур вдоль ветвей, при небольшом перепада температур линейно пропорциональна как току I , так и высоте ветвей L :

$$U_{термо} \sim C \times I \times L, \quad (4)$$

где C – константа, зависящая от термоэлектрических свойств материалов и геометрии. Следовательно, ее вклад в кажущееся сопротивление линейно зависит от высоты.

Таким образом, полная зависимость $R_{пар}$ имеет вид:

$$R_{пар} = \frac{\rho \times L}{S} + R_{мет} + R_c + C \times L, \quad (51)$$

где ρ – удельное сопротивление термоэлектрического материала, S – площадь сечения ветвей.

Эту зависимость можно переписать как линейное уравнение:

$$R_{пар} = A \times L + B, \quad (6)$$

где эффективный коэффициент наклона A включает в себя как омическое $\frac{\rho \times L}{S}$, так и добавку за счет паразитного термоЭДС $C \times I \times L$, а свободный член B соответствует сумме контактного сопротивления R_c и сопротивления металлизации $R_{мет}$, соединяющих термоэлектрические элементы, не зависящих от геометрии.

Следовательно, построение зависимости $R_{пар0}$ в таблице 2 и ее линейная аппроксимация позволяют непосредственно определить $R_{пар0}$ как точку пересечения аппроксимирующей прямой с осью ординат.

Таблица 2. Зависимость сопротивления пары ветвей от длины ветвей

L , мм	$R_{пар0}$, Ом
0,50	0,03170
0,70	0,04311
0,90	0,05460
1,20	0,07333
1,50	0,09193

На рисунке 3 представлена итоговая зависимость экстраполированных значений сопротивления пары $R_{пар0}$ от высоты ветви L , построенная по данным таблицы 2. Экспериментальные точки с высокой точностью ложатся на прямую линию, что подтверждает линейный характер зависимости.

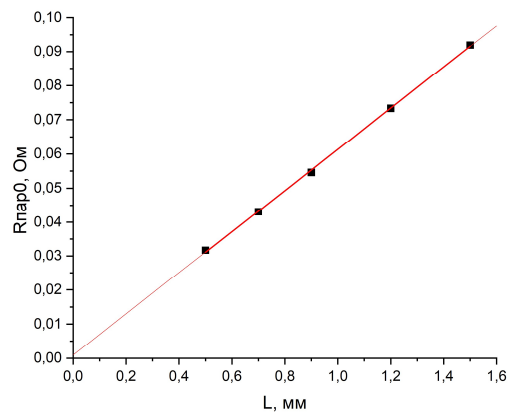


Рис. 3. Зависимость сопротивления пары ветвей от длины ветвей

Линейная аппроксимация этих данных дает следующее уравнение:

$$R_{\text{пар}} = 60,57 \times L + 0,00147, \quad (7)$$

где L выражено в мм, $R_{\text{пар}}$ – в Ом, коэффициент A в Ом/мм, а свободный член B в Ом.

В соответствии с изложенной методикой, свободный член B соответствует суммарному контактному сопротивлению, приходящемуся на одну пару ветвей с учетом металлизации. Так как толщина медной металлизации, соединяющая ветви составляет 25 мкм, ширина соединения 0,6 мм, а расстояние между центрами ветвей составляет 1,0 мм, следует вычесть сопротивление металлизации из полученных данных. Таким образом, в результате эксперимента получено значение суммарного контактного сопротивления на одну пару ветвей: $R_c = 0,574$ мОм. Это сопротивление включает в себя последовательное соединение четырех контактов: ТЭ материал-контактная площадка. В таком случае электрическое сопротивление одного контакта составляет 0,1435 мОм.

Удельное контактное сопротивление одного перехода ТЭ материал-контактная площадка: $\rho_c \approx 5,2 \times 10^{-11}$ Ом \times м².

Конечно-элементная модель ТЭМ

Экспериментально определенное значение контактного сопротивления R_c представляет собой макроскопический параметр, характеризующий совокупность всех электрофизических процессов на границе раздела ТЭ материал-контактная площадка. Для корректного прогнозирования рабочих характеристик ТЭМ данный параметр должен быть интегрирован в математическую модель. В настоящей работе за основу была взята модель, представленная в работе [7], которая была модернизирована путем введения R_c и реализована в виде трехмерной конечно-элементной модели в среде COMSOL Multiphysics для учета пространственного распределения полей.

Модель для однокаскадного ТЭМ с N парами ветвей описывается системой из пяти уравнений теплового баланса для температур на сторонах ТЭМ и внутренних переходах и может быть представлена в компактном матричном виде. Однако в исходной модели контактные сопротивления между ветвями и медными коммута-

ционными переключками учитываются лишь опосредованно через их вклад в джоулев нагрев, но не как самостоятельные элементы, вызывающие скачок электрического потенциала и дополнительное тепловыделение в отдельном узле.

Для явного учета контактного сопротивления предлагается модернизация модели из работы [7], заключающаяся во введении дополнительных температурных узлов непосредственно на границах раздела ТЭ материал-контактная площадка.

Система уравнений с дополнительным контактным электрическим сопротивлением R_c , дополняющим систему уравнений 1.1 из работы [7], представлена ниже:

$$k_0(T_0 - T_1) - k_{c0}(T_1 - T_2) + Q = 0, \quad (8)$$

$$k_{c0}(T_1 - T_2) - k_{\text{met}}(T_2 - T_3) \frac{N}{2} = 0, \quad (9)$$

$$N(\alpha I T_3 - \frac{1}{2} I^2 (R + \frac{r}{2} + 2R_c) + k_{\text{met}} \frac{1}{2} (T_2 - T_3)) = 0, \quad (10)$$

$$N(\alpha I T_3 - \frac{1}{2} I^2 (R + \frac{r}{2} + 2R_c) + k_{\text{met}} \frac{1}{2} (T_2 - T_3)) = 0, \quad (10)$$

$$N(\alpha I T_4 + \frac{1}{2} I^2 (R + \frac{r}{2} + 2R_c) - k(T_4 - T_3) + k_{\text{met}} \frac{1}{2} (T_4 - T_5)) = 0, \quad (11)$$

$$N(\alpha I T_3 - \frac{1}{2} I^2 (R + \frac{r}{2} + 2R_c) + k_{\text{met}} \frac{N}{2} (T_4 - T_5) - k_{c1}(T_5 - T_0)) = 0. \quad (12)$$

Модернизированная система уравнений была взята за теоретическую основу для построения трехмерной конечно-элементной модели в COMSOL. Дополнительные стандартные модули COMSOL позволяют учесть двумерные эффекты. Такой подход позволяет сохранить физическую строгость и прозрачность системы уравнений, но при этом:

1. Снять ограничение одномерности переноса.
2. Визуализировать реальное распределение температуры, особенно в зонах вблизи контактов.

3. Учесть двумерные эффекты в теплопередаче через керамические платы.

Для каждого из пяти экспериментальных ТЭМ была построена 3D-геометрия, точно соответствующая реальным образцам. На рисунке 4 представлена 3D модель ТЭМ в COMSOL Multiphysics в рабочем режиме под тепловой нагрузкой.

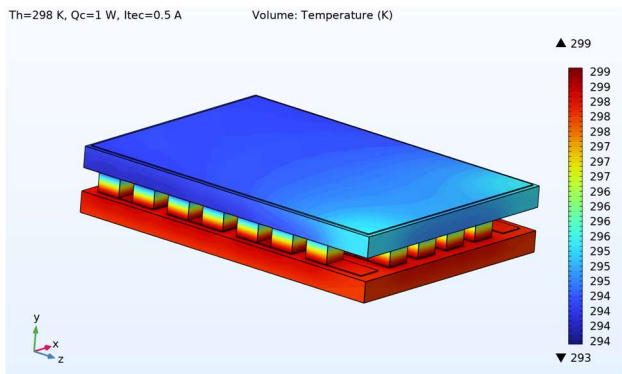


Рис. 4. 3D модель ТЭМ в программе COMSOL под тепловой нагрузкой в рабочем режиме

- Контактное сопротивление R_c задавалось как физическое свойство границы раздела между объемами термоэлектрического материала и меди.

- В среде COMSOL это было реализовано с помощью функции Contact Impedance в интерфейсе «Electric Currents». Измеренное удельное электрическое сопротивление контакта задавалось для каждого контакта в модели.

- Температурные зависимости свойств термоэлектрических материалов задавались в соответствии с данными производителя.

Модель использовала связанные интерфейсы «Electric Currents» и «Heat Transfer in Solids». Мультифизическая связь «Thermoelectric Effect» учитывала термоэлектрические эффекты и джоулевый нагрев в соответствии с системой уравнений.

- На всех внешних поверхностях задавалась одинаковая температура $T = 298$ К.

- На одну из контактных площадок подавался суммарный ток I , соответствующий экспериментальным значениям (0,07–0,40 А). Противоположный контакт заземлялся.

Визуализация двумерных эффектов позволяет наблюдать температурные неоднородности вдоль верхней керамической платы ТЭМ, обусловленное отсутствием термоэлектрических элементов в углах конструкции ТЭМ.

Верификация модели

Верификация разработанной модели была проведена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными раздела 2 для режима нулевого перепада температур при разных величинах тепловой нагрузки. В таблице 3 и на рисунке 5 представлено сопоставление экспериментальных значений падения напряжения экспериментальных образцов из таблицы 1 и моделей с учетом и без учета контактного сопротивления для ТЭМ с высотой ветви 0,5 мм.

Таблица 3. Сравнение падения напряжения на ТЭМ эксперимента и модели с учетом и без учета R_c

Q_c , Вт	Эксперимент, В	Модель с учетом R_c , В	Модель без учета R_c , В
0,2	0,051	0,049	0,047
0,4	0,103	0,108	0,097
0,6	0,157	0,160	0,147
0,8	0,212	0,216	0,199
1	0,267	0,270	0,254

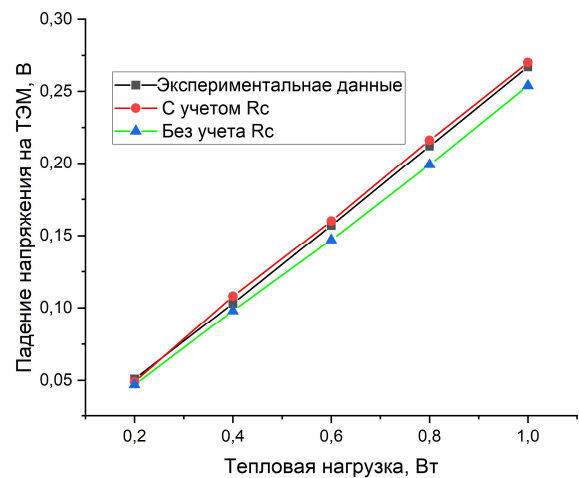


Рис. 5. Сравнение падения напряжения на ТЭМ эксперимента и модели с учетом и без учета R_c

Как видно из графика, неучет контактного сопротивления занижает падение напряжения на ТЭМ, что в итоге сказывается на учете энергетических характеристик ТЭМ.

Без учета R_c разница падения напряжения на ТЭМ составляла до 7,8 %, в то время как с учетом R_c разница в падении напряжения была уменьшена до 2,9 %. Эта неучтенная разница будет более заметной, чем больше ветвей и, соответственно, электрических контактов ТЭ материал-контактная площадка в конструкции ТЭМ.

Оценка погрешностей измерений

Погрешность определения силы тока и напряжения определяется паспортной точностью контроллера Meerstetter ТЕС-1091 и составляет 1 % от измеренного значения. Расчетная относительная погрешность определения сопротивления ТЭМ на основе измеренных тока и напряжения составила $\approx 1,41$ %.

На основе этого относительная погрешность определения контактного сопротивления R_c составила 37 %, что обусловлено малым абсолютным значением R_c и погрешностью экстраполяции. Удельное контактное сопротивление с учетом погрешности составило $\rho_c = 5,2 \pm 1,9 \times 10^{-11}$ Ом \times м².

Тепловая нагрузка создавалась резистивным нагревателем с сопротивлением 10 Ом и задавалась источником питания SPE3102 OWON, погрешность установки тока и напряжения которого составляет $\pm(0,1$ % + 10 мА) и $\pm(0,1$ % + 20 мВ) соответственно. Погрешность задания тепловой нагрузки варьировалась от 3,02 % до 1,46 % в зависимости от величины тепловой нагрузки.

Заключение и выводы

В работе предложен и экспериментально апробирован комбинированный метод определения контактного электрического сопротивления R_c в собранных ТЭМ, основанный на анализе рабочих характеристик серии образцов с варьируемой высотой ветвей L . Метод решает проблему разделения вклада омического сопротивления объемного материала и добавки от паразитной термоЭДС, возникающей даже в условиях внешнего изотермического режима.

На экспериментальной установке, обеспечивающей высокую стабильность температурных условий (флуктуации $\leq 0,005$ °С), получены вольт-амперные характеристики для пяти ТЭМ с высотой ветвей от 0,5 до 1,5 мм. Методом экстраполяции к нулевой мощности джоулева разогрева определена чисто омическая составляющая полного сопротивления пары ветвей.

Установлена линейная зависимость $R_{\text{пар}}$ от L . Свободный член линейной аппроксимации, не зависящий от геометрии, соответствует суммарному контактному сопротивлению. В результате получено значение $R_c = 0,574$ мОм на одну пару ветвей, что соответствует удельному контактному сопротивлению перехода ТЭ материал-контакт-

ная площадка $\rho_c = 5,2 \times 10^{-11}$ Ом \times м². Несмотря на значительную относительную погрешность, обусловленную малым значением контактного сопротивления, метод позволил надежно определить его величину и показать, что оно существенно ниже критического порога в 10^{-8} – 10^{-9} Ом \times м², за которым производительность ТЭМ резко падает.

Разработана и реализована в среде COMSOL Multiphysics трехмерная конечно-элементная модель ТЭМ, явно учитывающая контактное сопротивление через граничное условие «Contact Impedance». Модель интегрирует экспериментально найденное значение R_c и температурные зависимости свойств материалов.

Проведена верификация модели путем сравнения с экспериментальными данными в изотермическом режиме. Показано, что учет R_c повышает точность прогнозирования падения напряжения на ТЭМ: расхождение с экспериментом сокращается с 7,8 % (для модели без учета R_c) до 2,9 %. Это демонстрирует необходимость учета контактных потерь для адекватного математического описания ТЭМ, особенно миниатюрных ТЭМ, где вклад R_c становится более заметным.

Разработанный метод и верифицированная модель представляют собой эффективный инструментарий для неразрушающей диагностики и точного проектирования ТЭМ, что требуется для повышения эффективности и оптимизации их рабочих характеристик.

Список источников

1. Vikhor L., Kotsur M. Evaluation of Efficiency for Miniscule Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 4082. DOI: 10.3390/en16104082
2. Liu W., Jie Q., Kim H.S. et al. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 87. pp. 357–376. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.12.042
3. Корчагин Е.П., Нагрешников Е.В., Штерн М.Ю. и др. Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах // *Известия вузов. Электроника*. 2023. Т. 28, № 6. С. 773–783. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-6-773-783
4. Annapragada S.R., Salamon T., Kolodner P. et al. Determination of Electrical Contact Resistivity in Thermoelectric Modules (TEMS) from Module-Level Measurements. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 2. № 6. pp. 1023–1030. DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2183595

5. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary // *Journal of Thermoelectricity*. 2019. № 4. pp. 74–88.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. Measurement of Electrical Contact Resistance of the «Metal – Thermoelectric Material» Structure Using the Peltier Effect // *Journal of Thermoelectricity*. 2024. № 1–2. pp. 34–45. DOI: 10.63527/1607-8829-2024-1-2-34-45
7. Kondratiev D., Yershova L. TE Coolers Computer Simulation: Incremental Upgrading of Rate Equations Approach. *Proceedings // Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society*. Freiburg im Breisgau, (September 20–21, 2001).
3. Korchagin EP, Nagreshnikov EV, Shtern MYu et al. Research of factors impacting contact resistance in thermoelements. *Proc. Univ. Electronics*. 2023;28(6):773–783. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-6-773-783
4. Annapragada SR, Salamon T, Kolodner P et al. Determination of Electrical Contact Resistivity in Thermoelectric Modules (TEMS) from Module-Level Measurements. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2012;2(6):1023–1030. DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2183595
5. Anatyshuk LI, Vikhor LM, Mitskaniuk NV. Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary. *Journal of Thermoelectricity*. 2019; (4):74–88.

References

1. Vikhor L, Kotsur M. Evaluation of Efficiency for Miniscale Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts. *Energies*. 2023;16:4082. DOI: 10.3390/en16104082
2. Liu W, Jie Q, Kim HS et al. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices. *Acta Materialia*. 2015;87:357–376. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.12.042
6. Anatyshuk LI, Lysko VV. Measurement of Electrical Contact Resistance of the «Metal – Thermoelectric Material» Structure Using the Peltier Effect. *Journal of Thermoelectricity*. 2024;1–2:34–45. DOI: 10.63527/1607-8829-2024-1-2-34-45
7. Kondratiev D, Yershova L. TE Coolers Computer Simulation: Incremental Upgrading of Rate Equations Approach. *Proceedings. Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society*. Freiburg im Breisgau. (September 20–21. 2001).