

Моделирование термоэлектрического генератора на основе МЭМС технологии

А.С. Коротков, В.В. Лобода

Санкт-Петербургский университет Петра Великого

korotkov@spbstu.ru

Аннотация — В статье представлены результаты моделирования и экспериментальных измерений параметров промышленно выпускаемых термоэлектрических генераторов на основе МЭМС технологии. Моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов на основе программной платформы ANSYS Workbench. Особенностью предложенной модели для данного типа ТЭГ является необходимость учета влияния распределения температуры по частям корпуса. Показано, что результаты моделирования с достаточной точностью соответствуют эксперименту.

Ключевые слова — термоэлектрический генератор, МЭМС, метод конечных элементов, моделирование, выходная мощность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники и технологий неразрывно связано с поиском новых источников электрической энергии, в том числе с так называемой «зеленой» энергетикой. Важным направлением в данной области является разработка энергособирающих устройств (Energy Harvesters). В условиях энергосбережения разработка подобных устройств для автономного питания электрических и электронных систем является актуальной задачей. Одним из перспективных видов энергособирающих устройств, основанных на преобразовании в «полезную» энергию энергии, возникающей при разности температур источника тепла и среды, является термоэлектрический генератор (ТЭГ). Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) используются как первичные (автономные) источники питания во многих практических приложениях при требуемых мощностях от единиц мВт до единиц Вт. ТЭГ широко применяются в схемах питания систем мониторинга состояния двигателей, биомедицинского оборудования и др. Особым фактором, способствующим развитию техники ТЭГ, стало внедрение технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Учитывая особенности изготовления, определим ТЭГ на основе МЭМС технологии как структуру упорядоченных областей материала с заданным составом и геометрией, созданную на поверхности твердого тела в виде систем субмикронного размера, статические свойства которых обеспечивают реализацию процессов генерации, преобразования и передачи энергии. ТЭГ на основе МЭМС технологии обеспечивают при перепаде температуры в десятки градусов выходную мощность не-

сколько мВт при выходном напряжении несколько вольт. Целью данной работы является построение модели, экспериментальная проверка результатов и определение практических рекомендаций по моделированию ТЭГ на основе МЭМС технологии.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Проектирование и анализ характеристик термоэлектрических генераторов являются классическими задачами теории термоэлектричества. Методы проектирования ТЭГ основаны на использовании модели термопары. Модель описывает температурные зависимости параметров материалов ТЭГ в диапазоне рабочих температур, учитывает тепловые и электрические потери. Расчет с применением данной модели заключается в решении одномерных дифференциальных уравнений второго порядка с коэффициентами, зависящими от температуры с учетом контактных явлений. В термоэлектрическом анализе уравнение теплового потока (1) и уравнение непрерывности электрического заряда (2) соединены термоэлектрическими материальными уравнениями (3), (4) [1, с.151] и уравнением состояния в диэлектрической среде (5):

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

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

$$\mathbf{q} = [\Pi] \mathbf{J} - [\lambda] \nabla T, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = [\sigma] (\mathbf{E} - [\alpha] \nabla T), \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = [\varepsilon] \mathbf{E}, \quad (5)$$

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

где: ρ – плотность; C – удельная теплоемкость; T – температура; \dot{q} – скорость тепловой генерации на единицу объема; \mathbf{q} – вектор плотности теплового потока; \mathbf{J} – вектор плотности электрического поля; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{D} – вектор электрической индукции; $[\lambda]$ – матрица теплопроводности; $[\sigma]$ – матрица электрической проводимости;

$[\alpha]$ – матрица коэффициента Зеебека; $[\Pi] = T[\alpha]$ – матрица коэффициента Пельтье; $[\varepsilon]$ – матрица диэлектрической проницаемости; φ – потенциал.

Подстановка (3)–(6) в уравнения (1)–(2) дает систему связанных уравнений термоэлектричества:

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

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

Уравнения (7), (8) используются для моделирования термоэлектрических генераторов в двух основных программных платформах: ANSYS Workbench и COMSOL Multiphysics, в которых применяется метод конечных элементов. Результирующая система термоэлектрических уравнений в методе конечных элементов для уравнений (7, 8) имеет вид [2]:

$$\begin{bmatrix} C^{TT} & 0 \\ 0 & C^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_e \\ \varphi_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{TT} & 0 \\ K^{\varphi T} & K^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_e \\ \varphi_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q + Q^P + Q^e \\ I \end{Bmatrix},$$

где матрицы элементов и векторы нагрузки получены численным интегрированием по элементу объема V :

K^{TT} – матрица термической жесткости; $K^{\varphi\varphi}$ – матрица электрической жесткости; $K^{\varphi T}$ – матрица жесткости Зеебека; C^{TT} – матрица термического затухания; $C^{\varphi\varphi}$ – матрица диэлектрического затухания; Q – вектор термических нагрузок; Q^P – вектор нагрузок тепла Пельтье; Q^e – вектор нагрузок ЭДС; I – вектор нагрузок электрического тока; \mathbf{T}_e – вектор узловых температур, φ_e – узловые электрические потенциалы.

Термические нагрузки (Q) могут быть приложены в форме фиксированной температуры, потока тепла через поверхность, конвекции или излучения. Электрические нагрузки (I) могут быть представлены в форме фиксированного электрического потенциала и точечного электрического тока. Линейные компоненты цепи (сопротивления, конденсаторы, источники тока) могут быть присоединены к модели для моделирования пассивных и активных нагрузок. Ввод значений в матрицы λ , σ , α , ε делается в форме их диагональных значений, то есть материальных коэффициентов по осям x , y , z . Такой метод ввода позволяет скомбинировать значения с координатной системой случайно ориентированного элемента, чтобы учесть переменную ориентацию материала. Электрические свойства вводятся как сопротивление и конвертируются в проводимость $[\sigma]$. Тепловые свойства вводятся как теплопроводность $[\lambda]$. Все свойства материала могут зависеть от температуры. В частности, эффект Томсона учитывается введением температурной зависимости коэффициентов Зеебека $[\alpha]$.

Решение системы уравнений методом конечных элементов дает значения температуры и электрического потенциала в узлах или реакцию в форме потока тепла и электрического тока в узлах с фиксированной температурой и электрическим потенциалом соответственно. Градиент температуры и электрическое поле вычисляются как

$$\nabla T = \nabla \mathbf{N} \cdot T_e, \quad \mathbf{E} = \nabla \mathbf{N} \cdot \varphi_e,$$

где \mathbf{N} – вектор функции формы элемента, а затем подставляются в уравнения (3)–(5), чтобы получить значения полей \mathbf{q} , \mathbf{J} , \mathbf{D} для каждого элемента. Данная методология реализуется в модуле ANSYS Mechanical (см. далее).

III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ НА ОСНОВЕ МЭМС ТЕХНОЛОГИИ

В качестве объекта моделирования и экспериментального исследования использован термогенераторный модуль (ТГМ) TGP-651 (производитель Micropelt GmbH, Германия). ТГМ состоит из термоэлектрического генератора, герметично запакованного между двумя алюминиевыми частями корпуса. Верхняя (горячая) часть корпуса выполнена в виде цилиндра, нижняя – в виде пластины, на которую крепится плата с внешними выводами ТЭГ. Диэлектрический герметик располагается между подложками по диаметру цилиндра верхней подложки (рис. 1, а).

Конструктивно ТЭГ представляет две подложки, на которых расположены n - и p -термоэлементы (ТЭ). В качестве подложек используются стандартные кремниевые пластины, на которые наносятся контактные площадки. Слои термоэлектрического материала n - и p -типа напыляются на сформированные контактные площадки и структурируются методом сухого травления для формирования термоэлементов (рис. 1, б).

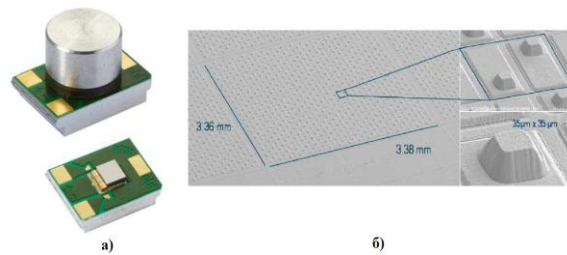


Рис. 1. Термоэлектрический генераторный модуль: а) структура, б) микрофотография термоэлементов

После резки пластины на кристаллы n - и p -термоэлементы генератора спаивают между собой, формируя термоэлектрический генератор. Данная технология позволяет разместить более 100 пар ТЭ на одном мм². Термоэлементы ТЭГ выполнены на основе твердых растворов Bi_2Te_3 для ТЭ n -типа и Sb_2Te_3 для ТЭ p -типа [3]. Данные материалы являются наиболее эффективными в диапазоне температур до 200 °С. Контактные площадки выполнены из золота.

Напряжение термо-ЭДС $E_{ТЭДС}$, генерируемое ТЭГ, прямо пропорционально коэффициенту Зеебека α генератора и разнице температур ΔT между горячей T_h и холодной T_c сторонами термоэлектрического генератора:

$$E_{ТЭДС} = \alpha \cdot \Delta T.$$

На внешней нагрузке R_H создается напряжение U , равное термо-ЭДС за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора R :

$$U = I \cdot R_H = E_{ТЭДС} - I \cdot R,$$

где сила тока I в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R + R_H}. \quad (9)$$

Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, вычисляется по следующей формуле:

$$P = U \cdot I = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{(R + R_H)^2} R_H. \quad (10)$$

Для создания разности температур на сторонах генератора к его горячей стороне необходимо подвести тепловой поток Q_h , а с холодной стороны отвести тепловой поток Q_c . По закону сохранения энергии разность тепловых потоков составит электрическую мощность P :

$$P = Q_h - Q_c.$$

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка для тестирования термоэлектрических генераторов представлена на рисунке 2.

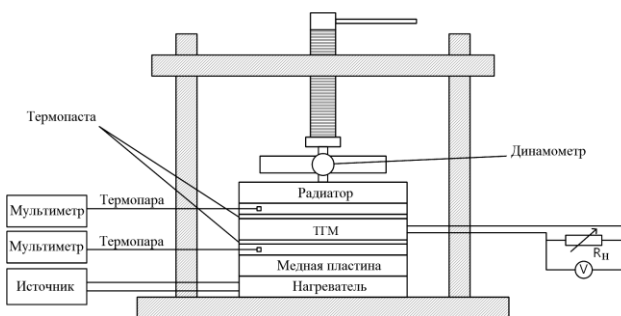


Рис. 2. Экспериментальная установка для тестирования термоэлектрического генераторного модуля

Принцип работы и устройство установки следующие: источник тепла подводит тепловой поток Q_h к горячей стороне ТЭГ, радиатор (в более общем случае – система охлаждения) отводит от холодной стороны ТЭГ тепловой поток Q_c . Для эффективной работы необходимо обеспечить максимально допустимую разность температур между сторонами генератора. ТЭГ преобразует разность значений температур горячей и холодной сторон в ток, который поступает в сопротив-

ление внешней нагрузки R_H . Экспериментальная установка снабжена измерительными приборами: вольтметром для измерения падения напряжения на внешней нагрузке, электронными термометрами для контроля температуры на сторонах модуля. ТЭГ фиксировался между источником тепла и радиатором с прижимным усилием 1кН, контролируемым динамометром. Для обеспечения равномерного температурного поля на поверхностях ТЭГ между модулем и источником тепла (а также модулем и радиатором) использовались промежуточные медные пластины. Кроме того, для наилучшего теплового контакта на границе «ТЭГ – медная пластина» использовалась термопаста Nano Grease.

Во время эксперимента поддерживалась постоянная температура горячей стороны модуля T_h . Значения внешней нагрузки R_H варьировались в пределах от 1 Ом до 10 кОм. В процессе эксперимента контролировалась температура на поверхностях ТЭГ, а также измерялось выходное напряжение на нагрузке. Величины тока и выходная мощность рассчитывались по формулам (9) и (10) соответственно.

V. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Решение задачи моделирования проводится на основе метода конечных элементов с применением расчетной платформы ANSYS Workbench. ANSYS позволяет эффективно использовать встроенные модули для решения различных физических задач и более широко используется на практике. Процесс моделирования представляется следующими этапами: препроцессорная подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving), постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing).

Этап препроцессорной подготовки состоит из пяти шагов: построение геометрической 3D-модели объекта с использованием модуля ANSYS Design Modeler, предназначенного для построения, редактирования геометрии и присвоения атрибутов модели; выбор типа анализа, в приложении к моделированию ТЭГ – это термоэлектрический анализ (Thermal-electric); задание физических свойств материалов, из которых состоит моделируемый объект (Engineering data); создание твердотельной модели объекта с использованием модуля ANSYS Mechanical, позволяющего определять поля температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением; генерация сетки конечных элементов с использованием модуля ANSYS Meshing.

Этап получения решения состоит из следующих шагов: выбор вида анализа (Steady-State Analysis) и его опций для типа анализа, выбранного на предыдущем этапе; выбор вида граничных условий – тепловые и электрические; выбор параметров расчета.

На последнем этапе осуществляется вывод результатов расчета в графической и табличной формах. Описанная методология использована при моделировании термоэлектрических генераторов на основе дис-

кретных компонентов в работах [4]-[8]. Программа моделирования, составленная авторами статьи, защи-

щена свидетельством о государственной регистрации [9].

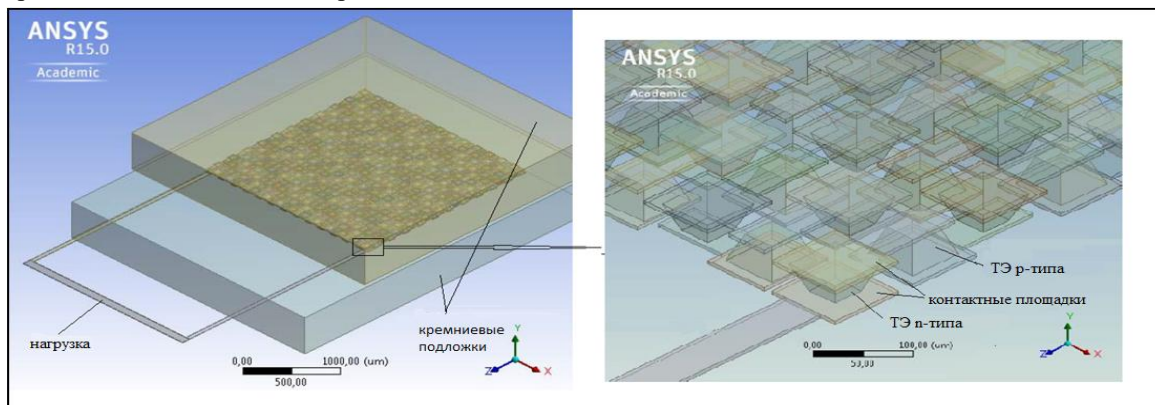


Рис. 3. Геометрическая 3D модель термоэлектрического генератора

Таблица 1

Физические свойства материалов ($T = 300 \text{ K}$)

Конструктивные части ТЭГ	Материал	Коэффициент Зеебека, мкВ/К	Удельное сопротивление, мкОм·м	Удельная теплопроводность, Вт/м·К
ТЭ <i>n</i> -типа	$\text{Bi}_2(\text{Se}_{0.1}\text{Te}_{0.9})_3$	-160	20	1.5
ТЭ <i>p</i> -типа	$(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$	210	25	1.5
Подложка	Si	–	–	148
Контактные площадки	Au	–	0.023	315

Построение геометрической 3D-модели термогенераторного модуля проведено на основе измерений линейных размеров составных частей и данных производителя. В 3D-модель не вводились верхние и нижние части корпуса, влияние которых учитывалось при формировании тепловых граничных условий (рис. 3). Физические параметры материалов ТЭ *n*- и *p*-типа, такие как коэффициент Зеебека, удельное сопротивление, удельная теплопроводность, выбирались с учетом технологии изготовления ТЭГ и приведены в [10]. Количество пар ТЭ для модуля TGP-651 составляет 286. Параметры материалов контактных площадок и подложки задавались из библиотеки ANSYS (табл.1). Генерация сетки конечных элементов производилась автоматически. Прямоугольная сетка состоит из 3D изопараметрических элементов SOLID226, имеющих три степени свободы (термическую, электрическую и структурную) в каждом из 20 узлов. Общее число элементов в сетке 9953. Тепловые граничные условия определяются температурами T_h и T_c на внешних поверхностях подложек. На первом этапе моделирования был произведен расчет распределения температуры по алюминиевым частям корпуса ТГМ, что позволило определить фактическую температуру на верхней и нижней подложках ТЭГ. Соответствие температурных режимов испытаний ТЭГ в эксперименте и тепловых граничных условий при моделировании представлено в таблице 2. Как видно, за счет нагрева корпуса ТГМ фактическая температура на сторонах генератора будет меньше, что необходимо учитывать при моделирова-

нии. Результаты моделирования в графической форме представлены на рис. 4, 5. Результаты экспериментальных измерений и моделирования представлены на рис. 6, 7.

Таблица 2

Условия моделирования и эксперимента

№	Режимы температурных испытаний (эксперимент)			Тепловые граничные условия (моделирование)		
	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
1	25	5	20	23	7	16
2	55	5	50	50	10	40
3	80	5	75	72	13	59
4	106	6	100	95	17	78

Сплошные линии показывают результаты моделирования, пунктирные – результаты эксперимента. Отличие результатов моделирования и эксперимента не превышает 6% в диапазоне температур T_h до 80°C (зависимости 1-3 на рис. 3) и составляет 10% при температуре $T_h = 106^\circ\text{C}$ (зависимость 4 на рис. 3). Нумерация зависимостей, приведенных на рисунке 3, соответствует нумерации условий моделирования и эксперимента таблицы 1. Отметим, что максимальная рабочая температура ТГМ, указанная в описании производителя, составляет 85°C . Результаты показывают, что с возрастанием температур и, соответственно, с возрастанием

танием тока погрешность моделирования увеличивается. Данное обстоятельство обусловлено возрастанием нелинейного влияния температурной зависимости физических параметров полупроводниковых материалов.

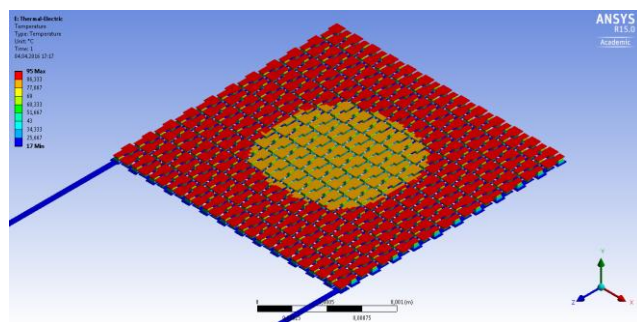


Рис. 4. Распределение температуры по объему термоэлектрического генератора

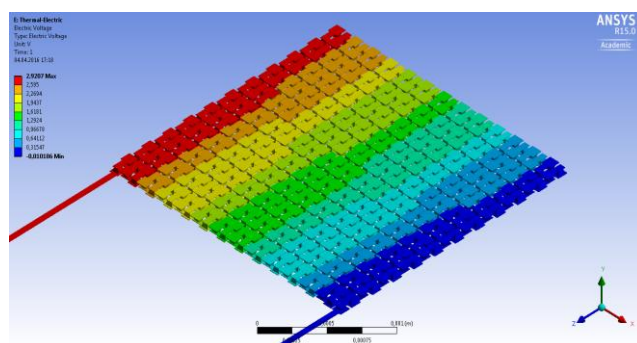


Рис. 5. Распределение напряжения по объему термоэлектрического генератора

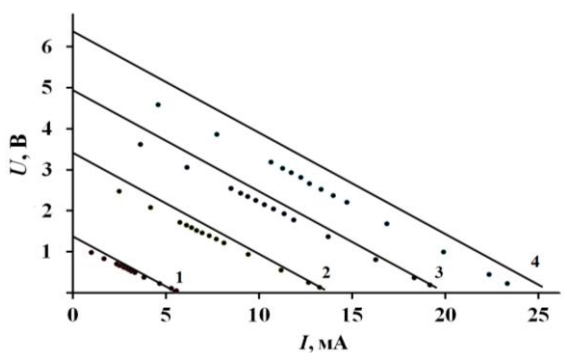


Рис. 6. ВАХ термоэлектрического генератора при различных температурных режимах

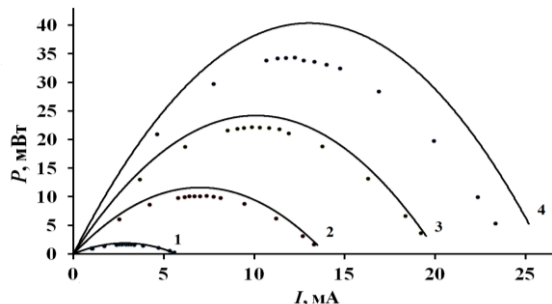


Рис. 7. Зависимости выходной мощности термоэлектрического генератора от тока в нагрузке при различных температурных режимах

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты моделирования и эксперимента позволяют сделать вывод о правильности предложенного подхода к моделированию термоэлектрических генераторов на основе МЭМС технологии. Особенностью моделирования данного типа ТЭГ является необходимость учета влияния распределения температуры по частям корпуса. Предложенная в работе методика дает возможность с достаточной точностью экстраполировать справочные данные промышленно выпускаемых генераторов и, следовательно, осуществлять подбор генератора под заданные условия эксплуатации по мощности и рабочим температурам при известных сопротивлениях внешней нагрузки.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации. Проект № 1873 на тему: «Разработка технологии построения беспроводной сверхширокополосной системы автоматизированного управления газотурбинным двигателем с использованием макрогенераторов для питания элементов системы».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. – 656 с.
- [2] Silvester, P.P., Ferrari, R.L. Finite Elements for Electrical Engineers, 3rd Edition, Cambridge University Press. 1996. P. 516
- [3] Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // Nature materials. Vol.7. February 2008. P. 105–114.
- [4] Antonova E.E., Looman D.C. Finite element for thermoelectric devices in ANSYS // Proc. ICT'05. 24th International Conference on Thermoelectronics. Clemson, USA. 2005. P. 215–218.
- [5] Hognblom O., Andersson R. Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments // Journal of Electronic Materials. Vol. 43. № 6. 2014. P. 2247–2254.
- [6] Kossyvakis D.N., Vossou C.G., Provatidis C.G., Hristoforou E.V. Computational and experimental analysis of a commercially available Seebeck module // Renewable Energy. Vol. 74. 2015. P. 1-10.
- [7] Wenguang Li, Manosh C. Paul, et al. Multiphysics simulations of a thermoelectric generator // Energy Procedia. Vol. 75. August 2015. P. 633–638.
- [8] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // Energy Harvesting and Systems. 2(1). 2015. P. 94-105.
- [9] Лобода В.В., Коротков А.С. Программа для моделирования модулей многоэлементных термоэлектрических генераторов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661985 от 13.11.2015.
- [10] Storter M., Stark I. Low power thermoelectric generator – self-sufficient energy for micro system // Proc. ICT'97. 16th International Conference on Thermoelectronics. Dresden, Germany. 1997. P. 575–577.

Simulation of MEMS Technology Based Thermoelectric Generators

A.S. Korotkov, V.V. Loboda

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

korotkov@spbstu.ru

Keywords — thermoelectric generator, MEMS, finite element method, simulation, output power.

ABSTRACT

Thermoelectric generators fabricated by means of MEMS technology are widely used in many practical applications as autonomous energy sources with the range of power from a few mW to several W. The paper presents a comparative analysis of simulation and experimental results of commercially available MEMS thermoelectric generators. Thermoelectric generator simulations were performed using the finite element method based on ANSYS Workbench software platform.

The results were obtained for the thermoelectric module TGP-651, Micropelt GmbH, Germany. The module consists of generator, which is hermetically packaged between two aluminum plates. The hot flue is applied to these plates. The crystal of the thermoelectric generator is fixed on the bottom plate. The generator n-type and p-type legs are fabricated from Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 correspondingly. The generator pads are fabricated from gold.

The simulation process consists of following stages: Preprocessing, Solving, Postprocessing. The Preprocessing stage includes 5 steps: 3D-model design, choice of the Thermal-electric analysis, setting of the engineering data that are physical parameters of materials, design of the solid state model of the thermoelectric generator using ANSYS Mechanical module, and generation of the finite element net by ANSYS Meshing. The Solving stage includes 3 steps: choice of the Steady-State Analysis and its options, choice of the electrical and thermal initial conditions, choice of the analysis parameters. The last stage deals with the output of calculated and simulated results in tables and figures.

The distinctive feature of the proposed model is a consideration of the temperature distribution among the package parts that was taken into account using the thermal initial conditions. The difference between simulation and experiment results is not more than 6% in a temperature range up to +80 grad C.

Good agreement between simulation and experimental results demonstrate correctness of the proposed approach for the simulations of MEMS technology based thermoelectric generators. The method gives an opportunity to extrapolate data sheets of commercially available thermoelectric generators and, thus, to recommend the choice of the

generator type to fulfill real requirements in accordance to the determined output power, the temperature range, and the known load resistance.

SUPPORT

The project has been supported by Ministry of education and science, Russian Federation. Agreement number 1873 on the topic “Design of the ultra-wideband system for automation control of gas turbines using thermoelectric generators for system power supply”.

REFERENCES

- [1] Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaja fizika: V. VIII. Elektrodinamika sploshnyh sred – *Theoretical physics: V.VIII. Electrodynamics of solid state* – Moscow, FIZMATLIT, 2005. 656 p (in Russian).
- [2] Silvester, P.P., Ferrari, R.L. Finite Elements for Electrical Engineers, 3rd Edition, Cambridge University Press. 1996. P. 516
- [3] Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // *Nature materials*. Vol.7. February 2008. P. 105–114.
- [4] Antonova E.E., Looman D.C. Finite element for thermoelectric devices in ANSYS // Proc. ICT’05. 24th International Conference on Thermoelectronics. Clemson, USA. 2005. P. 215–218.
- [5] Hogblom O., Andersson R. Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments // *Journal of Electronic Materials*. Vol. 43. № 6. 2014. P. 2247–2254.
- [6] Kossyvakis D.N., Vossou C.G., Provatidis C.G., Hristoforou E.V. Computational and experimental analysis of a commercially available Seebeck module // *Renewable Energy*. Vol. 74. 2015. P. 1-10.
- [7] Wenguang Li, Manosh C. Paul, et al. Multiphysics simulations of a thermoelectric generator // *Energy Procedia*. Vol. 75. August 2015. P. 633–638.
- [8] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2(1). 2015. P. 94-105.
- [9] Loboda V.V., Korotkov A.S. Program for computer simulation of multistage thermoelectric generators. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2015661985, 2015 (in Russian).
- [10] Storer M., Stark I. Low power thermoelectric generator – self-sufficient energy for micro system // Proc. ICT’97. 16th International Conference on Thermoelectronics. Dresden, Germany. 1997. P. 575–577.