

Анатычук Л.И.^{1,2}, Кузь Р.В.¹, Тащук Д.Д.¹

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

²Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58000, Украина

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РАЗНОВРЕМЕННОГО КОМПАРИРОВАНИЯ

С помощью компьютерного моделирования получены распределения потенциала и температуры в дифференциальном термоэлектрическом измерительном преобразователе в режиме разновременного компарирования. Рассчитана погрешность преобразования переменного тока. Результаты моделирования сравнивались с экспериментально полученными данными. Экспериментальные данные удовлетворительно подтверждают результаты моделирования.

Ключевые слова: дифференциальный преобразователь переменного тока, компьютерное моделирование.

Computer simulation was used to obtain potential and temperature distributions in a differential thermoelectric measuring converter in the non-simultaneous comparison mode. The error of alternating current conversion was calculated. The results of simulation were compared to the data deduced from experiments. The results of simulation were satisfactorily proved by the experimental data.

Key words: differential alternating current converter, computer simulation.

Введение

Точность и надежность современных эталонов, электроизмерительных приборов и установок для определения эффективного (действующего) значения переменного тока, напряжения, мощности и коэффициента мощности в широком диапазоне частот в значительной мере зависят от параметров и характеристик измерительных преобразователей, лежащих в основе построения этих приборов.

Из практики международного сравнения эталонов переменного тока известно, что современные требования к точности измерения переменного тока, напряжения и мощности в широком диапазоне частот можно обеспечить, используя методы термоэлектрического компарирования с постоянным током. Поэтому метрологические центры многих стран ведут интенсивные разработки новых термоэлектрических средств измерения и средств их метрологического обеспечения с использованием термоэлектрического компарирования [1-3].

Основным элементом термоэлектрического метода измерения напряжения и мощности переменного тока является измерительный термопреобразователь, в котором энергия измеряемого тока превращается в тепловую, выделяющуюся в резистивном нагревателе, и снова

превращается в электрическую с помощью термоэлемента. В случае известных соотношений между величиной переменного тока и термоЭДС термоэлемента можно измерять переменные токи аппаратурой постоянного тока [4].

Для повышения точности превращения в современной метрологии переменного тока приобрели распространение преобразователи на основе термобатарей [5, 6]. В таких термопреобразователях нагреватель имеет тепловой контакт со спаями большого числа термопар (50 – 120 шт.), которые последовательно соединены в батарею. Использование термобатарейных преобразователей дает возможность значительно повысить точность преобразования тока (за счет уменьшения влияния эффекта Томсона), уменьшить рабочую температуру нагревателя и, как результат, уменьшить влияние температурных коэффициентов параметров материалов нагревателя и термопар на квадратичность вольтамперной характеристики и повысить способность к перегрузке.

Преобразователи на основе термобатарей изготавливают по тонкопленочной технологии. Низкая эффективность пленочных термопар обуславливает необходимость использования большого их количества, которое приводит к росту сопротивления термобатарей до нескольких десятков Ом и увеличению шумов, а также к увеличению величины электрической емкости между нагревателем и термопарой, которая ограничивает высокочастотный диапазон их применения.

Вышеуказанных недостатков лишены дифференциальные термоэлектрические преобразователи (ДТП). ДТП предназначены для приборов одновременного сравнения при создании эталонных и образцовых средств метрологического обеспечения, передачи информации о размерах электрических единиц измерения от государственных эталонов рабочим эталонам и мерам переменного напряжения и тока аналоговым и цифровым измерительным приборам. Однако есть случаи использования ДТП в режиме разновременного компарирования [7]. Существенное использование компьютерных методов проектирования встречается довольно редко. Особенно интересно компьютерное моделирование при использовании дифференциальных преобразователей в нестационарных режимах работы.

Целью работы является разработка компьютерного метода исследования преобразователей и реализация этого метода на ДТП, работающих в особых режимах.

Объектом исследования является разработанный в Институте термоэлектричества дифференциальный термоэлектрический преобразователь ДТПТ-6.

Предметом исследования являются распределения температуры и электрического потенциала в нагревателях и ветвях термопар.

Физическая модель дифференциального термоэлектрического измерительного преобразователя

Термоэлектрический дифференциальный измерительный преобразователь состоит из нагревателя из манганинового микропровода в стеклянной изоляции 3, который крепится к токоподводам 2 с помощью припоя 4, дифференциальной термопары 1, которая крепится к токоподводам 2 с помощью припоя 4 и имеет тепловой контакт с нагревателем в местах спаев 8.

Ток, протекая через нагреватель, вызывает выделение тепла, передающегося через контакт в местах спаев термопаре, в которой возникает термоЭДС. Вследствие потерь из-за теплопроводности из нагревателя q_1 и термопары q_2 , излучения q_6 и q_8 , и конвекции q_7 и q_9 не все тепло, выделяемое нагревателем, идет на разогрев спаев термопары. Также на спаях

нагревателя со токоподводами действует эффект Пельтье, что проявляется в выделении или поглощении тепла q_3 , а в объеме нагревателя – эффект Томсона вследствие которого выделяется или поглощается тепло q_2 . Эффекты Пельтье и Томсона вызывают возникновение погрешности асимметрии измерений – при одинаковых действующих значениях переменного и постоянного тока выходная термоЭДС будет разной. Генерируемый термопарой ток вызывает возникновение эффекта Пельтье на спаях термопар, который приводит к выделению или поглощению некоторого количества тепла q_{10} .

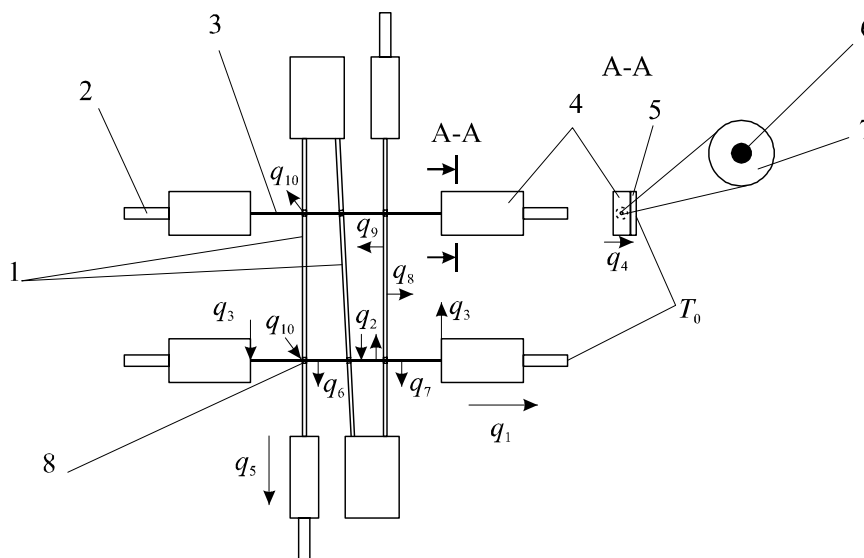


Рис. 1 Физическая модель дифференциального термоэлектрического измерительного преобразователя.
 1 – ветви дифференциальной термопары, 2 – токоподводы, 3 – нагреватель в стеклянной изоляции,
 4 – слой припоя, 5 – медная контактная пластина, 6 – марганцевый нагреватель,
 7 – стеклянная изоляция нагревателя, 8 – спай термопары.

Математическая модель дифференциального термоэлектрического измерительного преобразователя

Физическая модель дифференциального термоэлектрического преобразователя описывается системами уравнений (1) и (2).

$$\begin{cases} \nabla(k\nabla T) + Q_j = 0 \\ \nabla j = Q_j \\ j = \sigma E + j_e \\ E = -\nabla V \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где Q_j – тепловой поток вследствие действия эффекта Джоуля, T – абсолютная температура, k – коэффициент теплопроводности, D – электрическая индукция, B – магнитная индукция,

E – напряженность электрического поля, H – напряженность магнитного поля, j – плотность тока, σ – электропроводность, V – потенциал, T – абсолютная температура, k – коэффициент теплопроводности.

Системы уравнений (1) и (2) решаются с граничными условиями (3) и (4):

$$\begin{cases} T|_{z=0} = T_{amb} \\ q|_{z \neq 0} = \alpha(T_{amb} - T) + \varepsilon\sigma_B(T_{amb}^4 - T^4) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V|_{x=a} = 0, \\ V|_{y=b} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где q – плотность теплового потока, T – абсолютная температура, T_{amb} – температура окружающей среды, α – коэффициент теплообмена, ε – коэффициент излучения, σ_B – постоянная Больцмана, V – потенциал, I – номинальный ток через нагреватель.

Компьютерная модель дифференциального термоэлектрического измерительного преобразователя

С целью получения распределений температуры и потенциала была создана трехмерная компьютерная модель термоэлектрического дифференциального измерительного преобразователя. Для построения компьютерной модели использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics, который позволяет решать уравнения методом конечных элементов. На рис. 2 изображена сетка метода конечных элементов.

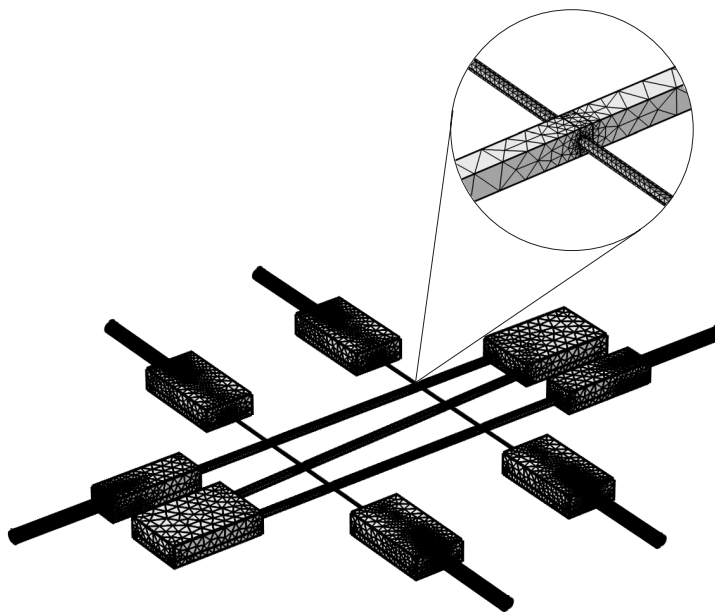


Рис. 2. Сетка метода конечных элементов.

В модели считается, что измерительный ДТП находится на воздухе.

Для постоянного тока расчеты показали, что при номинальном токе $I = 7$ мА исходная термоЭДС составляет $E = 23.000004$ мВ, что соответствует экспериментально установленным данным. Также, были получены распределения температуры (рис. 3, 4) и потенциала (рис. 5) в измерительном дифференциальном термоэлектрическом преобразователе.

Использование в модели переменного тока привело к необходимости применения модуля

расчетов, который состоит из двух шагов. Модуль heat transfer in solids не работает с модулем расчетов frequency domain, поэтому расчеты электрической части проводились в frequency domain, а потом результаты передавались в модуль heat transfer in solids который рассчитывался в модуле Stationary domain.

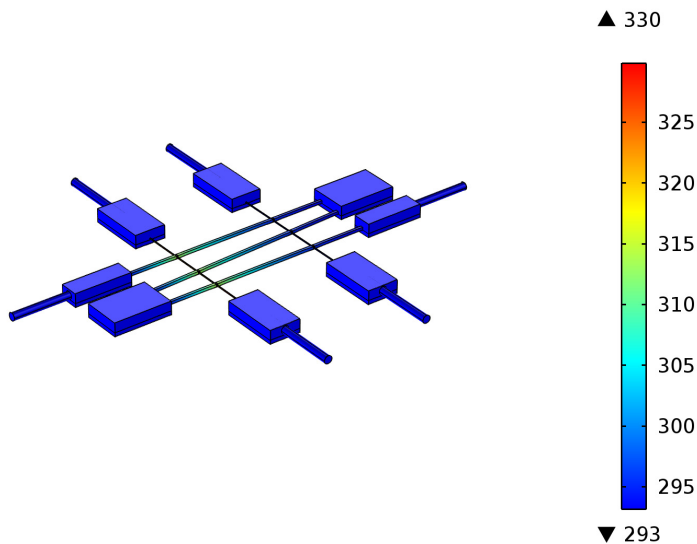


Рис. 3. Распределение температуры в исследуемом ДТП.

Максимальное значение температуры, до которой разогревается нагреватель в процессе измерений, влияет на его способность к перегрузке. При температуре выше 373 К в манганиновом микропроводе начинаются необратимые изменения, которые отрицательно влияют на характеристики термопреобразователя. На рис. 4 приведено распределение температуры в нагревателях измерительного ДТП относительно длины нагревателя L .

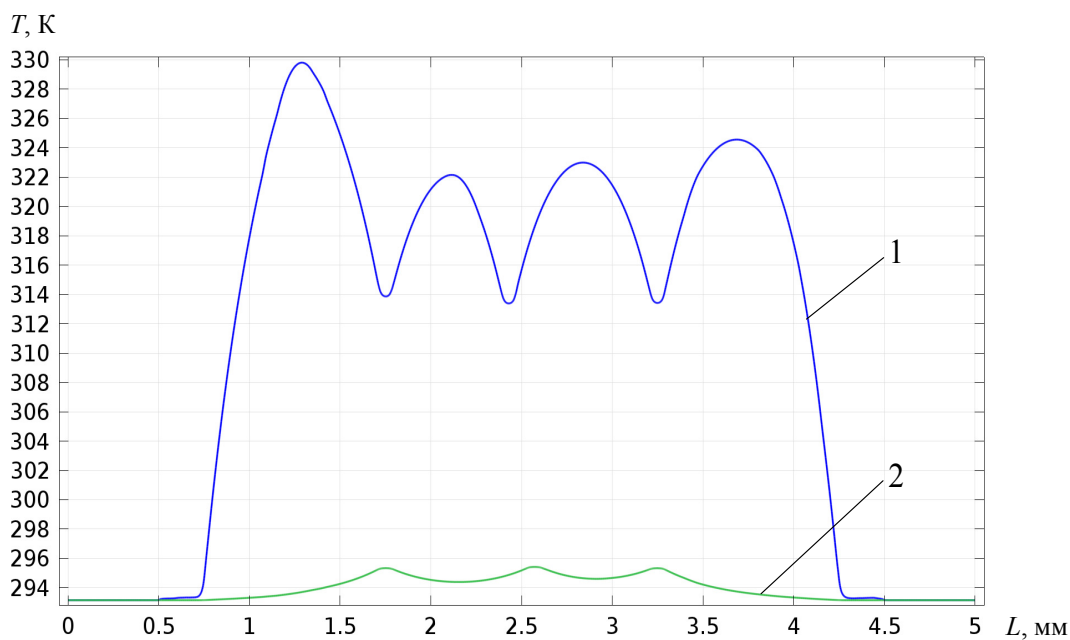


Рис. 4. Распределение температуры:
1 – в нагревателе, по которому течет постоянный ток,
2 – в нагревателе, по которому не течет ток.

Из рис. 4 видно, что температура ни в одной точке нагревателя не превышает 330 К, а следовательно не происходят необратимые изменения в материале нагревателя, как при постоянном, так и переменном токе, которые могут привести к ухудшению характеристик ДТП.

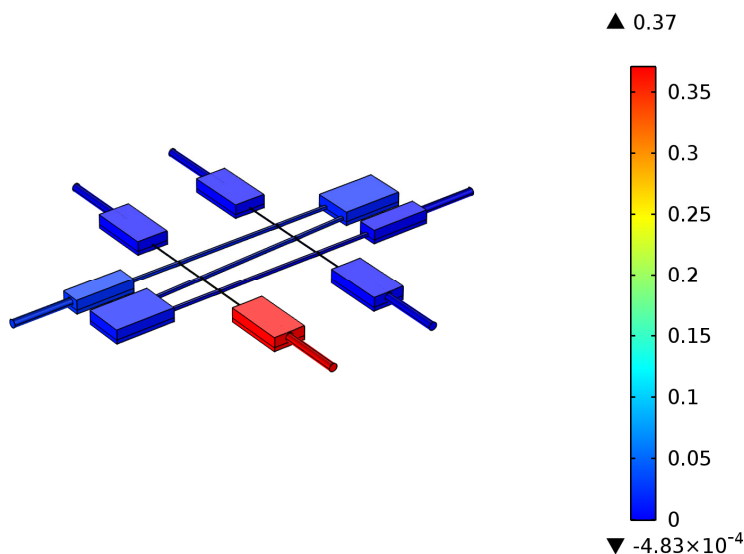


Рис. 5. Распределение электрического потенциала в исследуемом ДТП.

На рис. 6 приведено сравнение рассчитанной погрешности преобразования переменного тока в диапазоне частот 1 кГц – 30 МГц с экспериментальными данными.

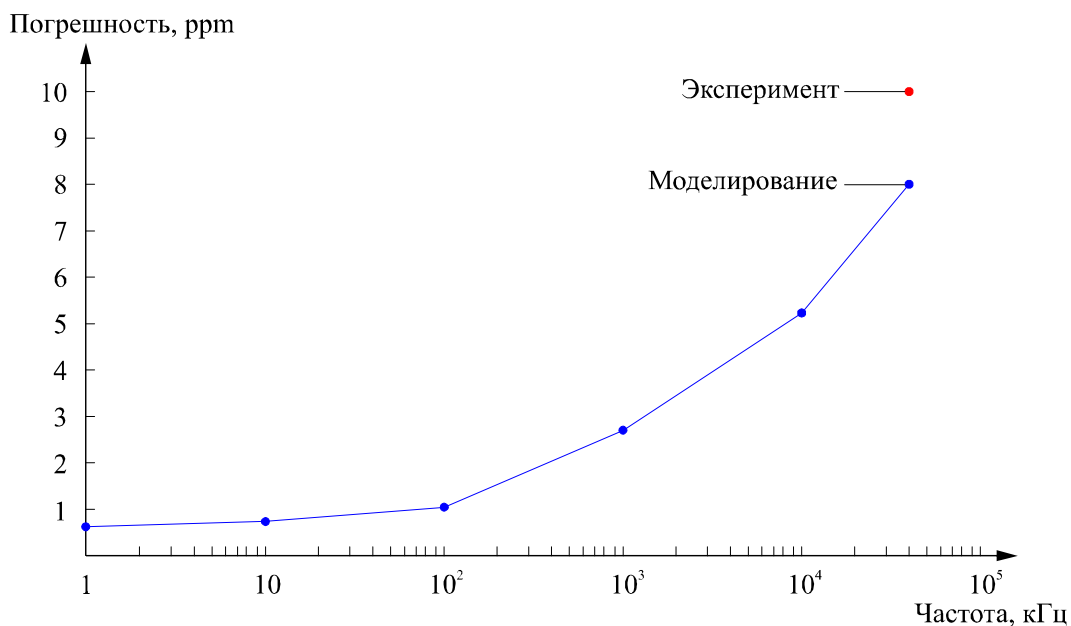


Рис. 6. Зависимость рассчитанной погрешности преобразования от частоты измеренного сигнала.

Для переменного тока частотой 30 МГц расчеты показали, что при эффективном значении тока $I = 7$ мА выходная термоЭДС представляет $E = 23.000184$ мВ. При этом погрешность преобразования составляет 8 ppm, что удовлетворительно коррелирует с экспериментально установленными данными.

Выводы

1. Построена компьютерная модель и получены распределения потенциала и температуры в дифференциальном измерительном преобразователе в режиме разновременного компарирования.
2. Показано, что при номинальном токе 7 мА температура нагревателя не превышает 330 К, что не приводит к деградации характеристик материала нагревателя.
3. Рассчитанная погрешность преобразования переменного тока ДТП отличается от экспериментальных данных не более чем на 20%.
4. Созданная модель позволяет использовать ее для проектирования новых термопреобразователей с другой геометрической конфигурацией элементов.
5. Приведенные результаты были использованы при разработке Военного вторичного эталона единицы переменного напряжения [7].

Литература

1. T.F Wunsch., J.R. Kinard, R.P. Manginell, O.M. Jr. Solomon, T.E. Lipe and K.C. Jungling, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (2001), p.330.
2. J.R. Kinard, T.E. Lipe and T.F. Wunsch, Digest of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (Canada, 2002), p.364.
3. T.E. Lipe, C.D. Reintsema and J.R. Kinard, CPEM 2002 Conference Digest (Canada, 2003), p. 108.
4. Анатычук Л.И., Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник (Киев: Научная. мысль, 1979), 768 с.
5. M.Klonz, H. Laiz, E. Kessler Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters at RTV/IPHT // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 6, December 2001.
6. Y.H. Lee, S.W. Kwon, K.J. Kim, S.I. Park, Y.E. Ihm Performance improving of KRISS Micro-machined Multijunction Thermal Converter // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
7. Туз Ю.М., Добролюбова М.В., Артюхова Ю.В., Струнина Ю.А., Боднарук В.И., Ташук Д.Д. Эталон единицы напряжения переменного тока на основе термопреобразователей // Термоэлектричество № 3, – 2012.

Поступила в редакцию 17.08.2015.