

К АНАЛИЗУ СВОЙСТВ ТЕРМОПАР С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИЗМОВ ТОМСОНА И КОНТАКТНОЙ ТЕРМОЭДС

В.И. Панферов, С.В. Панферов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассмотрены вопросы формального (математического) описания процессов генерации термоЭДС в термопарах как с позиций механизма контактной термоЭДС, так и с позиций эффекта Томсона. Показано, что конечные соотношения как для суммарной термоЭДС, так и для трех широко известных свойств (теорем) термопар с точностью до обозначений получаются одинаковыми для обоих механизмов. Вследствие этого следует считать, что свойства термоЭДС термопар абсолютно не различимы с позиций механизма контактной термоЭДС и с позиций эффекта Томсона (инвариантны по отношению к обоим механизмам возникновения термоЭДС). Ранее в литературе данные соотношения обосновывались при учете только механизма контактной термоЭДС. Полученные результаты могут служить неким расширенным теоретическим обоснованием обычно используемых на практике законов термоэлектрических цепей.

Ключевые слова: термопара, контактная термоЭДС, эффект Томсона, свойства термопар, формальное описание.

Введение

В системах управления теплотехническими объектами для измерения температуры широко используются термоэлектрические термометры, содержащие в своем составе термопару. Термопары являются базовыми элементами термоэлектрических генераторов, используемых напрямую для получения электрической энергии, а также и так называемых термоэлементов, применяемых, например, в холодильной технике и в термоэлектрических тепловых насосах [1, 2]. Термопары используются, кроме того, и в электротепловых преобразователях, применяемых для измерения силы электрического тока.

Актуальность исследуемого вопроса

Согласно [1–4] актуальность теории и практики термоэлектричества для настоящего времени весьма значительна, отмечается недостаточная развитость ряда направлений, а также и большое число публикаций по проблеме [1], в том числе и по истории термоэлектричества [5–7]. Поэтому изучение и выявление всех сторон и особенностей термоэлектрических процессов в термопарах имеет достаточно большое значение, в частности, и с точки зрения учебных целей.

Постановка задачи исследования

Как показал анализ литературных данных, до настоящего времени нет единого общепринятого представления о причинах возникновения термоЭДС термопары. Например, в [3, с. 6] отмечается, что «...термоЭДС возникает не в спае, а по длине термоэлектродов», а в [2] по-прежнему считается, что термоЭДС обуславливается контактной разностью потенциалов.

В целом, для объяснения принципа действия

термопары привлекают несколько механизмов, чаще всего выделяют два явления:

- 1) механизм контактной термоЭДС (называемый в литературе эффектом Зеебека);
- 2) эффект Томсона.

Несмотря на различие данных эффектов, как нам удалось выяснить, формальное описание процессов в термоэлектрических цепях получается совершенно одинаковым. Вместе с тем, насколько нам это известно, в литературе эта тождественность описаний до настоящего времени не была достаточно отчетливо показана [4, 8–15], поэтому есть смысл подробнее остановиться на этом вопросе. При этом подчеркнем, что указанный вопрос является достаточно важным, поскольку, например, в учебной литературе по измерительной технике обычно упоминался механизм контактной термоЭДС [10–15] и поэтому все основные свойства термопар были описаны и обоснованы с позиций этого явления.

Заметим, что значимость эффекта Томсона до сих пор еще подвергается сомнению [1, с. 15, 128], В частности, в [1] на стр. 15 сказано «...эффект Томсона... несомненно присутствует, но не играет определяющей роли», тем не менее, в данной работе мы не будем непосредственно обсуждать этот вопрос.

Отметим также, что возможно именно по причине недостаточной ясности в описании процессов в относительно недавно изданных учебниках по теплотехническим измерениям и приборам [14, 15] это формальное описание просто опущено, в [15, с. 60], например, первое свойство термопар («теорема о третьем проводнике») формулируется «...без доказательства», что вообще-то не является лучшим выходом из создавшегося положения.

Теоретическая часть исследования

Следуя [16], рассмотрим цепь, состоящую из двух разнородных проводников P и Q (рис. 1).

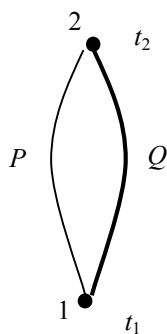


Рис. 1. Термопара

Как это хорошо известно, в данной цепи контактные термоЭДС образуются в точках 1 и 2, обозначим их как $E_{PQ}(t_1)$ и $E_{QP}(t_2)$. Результирующая контактная ЭДС цепи рис. 1 будет равна $E_{k\Sigma 1} = E_{PQ}(t_1) + E_{QP}(t_2)$ (направление обхода контура против часовой стрелки, порядок чередования индексов соответствует этому направлению), здесь t_1 и t_2 – температуры контактов. На основании закона Вольты [11, 17] можно записать, что $E_{PQ}(t_2) + E_{QP}(t_2) = 0$, поэтому $E_{k\Sigma 1} = E_{PQ}(t_1) - E_{PQ}(t_2)$.

Теперь рассмотрим отдельно однородный проводник, пусть, например, это будет проводник Q и пусть его длина равна L . Выделим по длине этого проводника малый участок dx , тогда термоЭДС Томсона, генерируемая на этом участке, будет равна $dE_Q = k_Q(t) \frac{dt}{dx} dx$, где $k_Q(t)$ – коэффициент Томсона для проводника Q [9]. Очевидно, что термоЭДС Томсона для всего проводника Q будет определяться как

$$E_Q = \int_0^L k_Q(t) \frac{dt}{dx} dx = \int_{t_1}^{t_2} k_Q(t) dt = F_Q(t) \Big|_{t_1}^{t_2} = F_Q(t_2) - F_Q(t_1).$$

Здесь $F_Q(t)$ – первообразная для $k_Q(t)$, т. е. $\frac{dF_Q(t)}{dt} = k_Q(t)$. Из этого выражения отчетливо видно, что термоЭДС Томсона зависит только от температуры концов проводника Q и не зависит от температуры других его точек. Кроме того, термоЭДС Томсона зависит также и от рода проводника, так как коэффициент Томсона $k_Q(t)$ и первообразная для него $F_Q(t)$ определяются именно родом проводника Q .

Для проводника P по аналогии можно записать, что $E_P = F_P(t_1) - F_P(t_2)$, здесь контур рис. 1

также обходится против часовой стрелки, поэтому для проводника P начальной точкой будет уже точка 2. $F_P(t)$ – первообразная для коэффициента Томсона проводника P . Таким образом, суммарная термоЭДС цепи рис. 1, обусловленная эффектом Томсона, будет равна

$$\begin{aligned} E_{T\Sigma 1} &= F_Q(t_2) - F_Q(t_1) + F_P(t_1) - F_P(t_2) = \\ &= [F_P(t_1) - F_Q(t_1)] - [F_P(t_2) - F_Q(t_2)] = \\ &= F_{PQ}(t_1) - F_{PQ}(t_2), \end{aligned}$$

где $F_{PQ}(t) = F_P(t) - F_Q(t)$. Отсюда следует, что $E_{T\Sigma 1}$, также как и $E_{k\Sigma 1}$, зависит только от рода проводников и температуры их спаев. Причем отметим также, что конечные выражения для $E_{k\Sigma 1}$ и $E_{T\Sigma 1}$ одинаковы с точностью до обозначений.

Как известно, свойства термопар также ранее были описаны и обоснованы с позиций контактной термоЭДС. Поэтому рассмотрим и эти вопросы.

Свойство 1: если в цепь термопары включен третий проводник и его концы находятся при одинаковых температурах, то результирующая термоЭДС цепи не изменится.

Рассмотрим первый возможный способ включения третьего проводника (на схеме это проводник R) в цепь термопары – в разрыв второго контакта проводников P и Q . При таком включении третьего проводника температуры мест его подсоединения должны быть, конечно, равны t_2 . Для исходной термопары, изображенной на рис. 1, результирующая контактная ЭДС будет равна $E_{k\Sigma 1} = E_{PQ}(t_1) - E_{PQ}(t_2)$. Для термопары с третьим проводником (рис. 2) $E_{k\Sigma 2} = E_{PQ}(t_1) + E_{QR}(t_2) + E_{RP}(t_2)$.

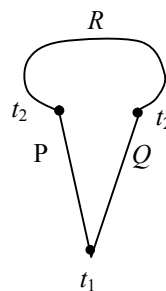


Рис. 2. Первый способ включения третьего проводника в цепь термопары

Если в цепи с третьим проводником температуры всех контактов будут одинаковы и равны t_2 , то на основании закона Вольты можно записать $E_{PQ}(t_2) + E_{QR}(t_2) + E_{RP}(t_2) = 0$, следовательно $E_{QR}(t_2) + E_{RP}(t_2) = -E_{PQ}(t_2)$. Подставляя это соотношение в формулу для суммарной кон-

тактной термоЭДС цепи рис. 2 $E_{k\Sigma 2}$, получим, что $E_{k\Sigma 2} = E_{PQ}(t_1) - E_{PQ}(t_2)$, т. е. $E_{k\Sigma 2} = E_{k\Sigma 1}$.

Если теперь считать, что в цепи (см. рис. 2) проявляет себя только эффект Томсона, то получим, что суммарная термоЭДС Томсона для цепи рис. 2 будет равна

$$E_{T\Sigma 2} = F_Q(t_2) - F_Q(t_1) + F_R(t_2) - F_R(t_2) + F_P(t_1) - F_P(t_2) = F_{PQ}(t_1) - F_{PQ}(t_2),$$

т. е. $E_{T\Sigma 2} = E_{T\Sigma 1}$. При этом заметим, что для получения конечного соотношения не потребовалось привлекать какие-то дополнительные данные, в том числе и закона Вольта.

Далее, рассмотрим второй возможный способ включения третьего проводника в цепь термопары – в разрыв одного из проводников, например, Q (рис. 3).

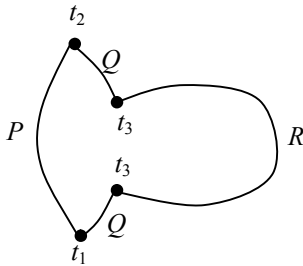


Рис. 3. Второй способ включения третьего проводника в цепь термопары

При таком включении третьего проводника температуры мест его подсоединения должны быть равны между собой, но совсем не обязательно должны быть равны t_2 . В данном случае результирующая контактная термоЭДС для цепи рис. 3 будет равна

$$E_{k\Sigma 3} = E_{PQ}(t_1) + E_{QR}(t_3) + E_{RQ}(t_3) + E_{QP}(t_2),$$

но $E_{RQ}(t_3) = -E_{QR}(t_3)$, поэтому

$$E_{k\Sigma 3} = E_{PQ}(t_1) + E_{QP}(t_2) = E_{PQ}(t_1) - E_{PQ}(t_2),$$

т. е. равна ЭДС исходной цепи.

Если теперь считать, что в цепи рис. 3 также проявляет себя только эффект Томсона, то получим, что суммарная термоЭДС Томсона для цепи рис. 3 будет равна

$$E_{T\Sigma 3} = F_Q(t_3) - F_Q(t_1) + F_R(t_3) - F_R(t_3) + F_Q(t_2) - F_Q(t_3) + F_P(t_1) - F_P(t_2) = F_{PQ}(t_1) - F_{PQ}(t_2).$$

Таким образом, доказательство справедливости свойства также получилось заметно проще.

Свойство 2: термоЭДС термопары является функцией только двух температур – температур ее спаев и не зависит от температур других точек термопары. Нетрудно видеть, что данное свойство вполне очевидно с точки зрения вышеизложенного, т. е. как с точки зрения первого, так и второго из рассматриваемых эффектов.

Свойство 3 (сформулируем в формульном виде для эффекта Томсона):

$$E_{T\Sigma 1}(t, t_0) = E_{T\Sigma 1}(t, t_0') + E_{T\Sigma 1}(t_0', t_0),$$

т. е. если температуры спаев термопары равны t и t_0 , то термоЭДС $E_{T\Sigma 1}(t, t_0)$, генерируемая при этих температурах, будет равна алгебраической сумме двух термоЭДС, одна из которых генерируется этой же термопарой при температурах t и t_0' , а другая – при температурах t_0' и t_0 .

Данное свойство используется, как правило, для приведения показаний термопары к градуировочным условиям, т. е. к температуре свободных концов в 0°C .

Действительно,

$$\begin{aligned} E_{T\Sigma 1}(t, t_0') + E_{T\Sigma 1}(t_0', t_0) &= \\ &= F_{PQ}(t) - F_{PQ}(t_0') + F_{PQ}(t_0') - F_{PQ}(t_0) = \\ &= F_{PQ}(t) - F_{PQ}(t_0) = E_{T\Sigma 1}(t, t_0). \end{aligned}$$

Доказательство данного свойства с позиций механизма контактной термоЭДС широко известно и приводится в литературе, например, в [11].

Практическая значимость результатов

В целом, все вышеизложенное, как нам представляется, может служить неким расширенным теоретическим обоснованием широко используемых на практике законов термоэлектрических цепей. К месту заметим, что в [4, с. 12], по-видимому, из-за отсутствия отчетливого формального описания и обоснования эти законы (правила) названы только «экспериментальными».

Выводы

Рассмотрены вопросы формального (математического) описания процессов генерации термоЭДС в термопарах как с позиций механизма контактной термоЭДС, так и с позиций эффекта Томсона. Показано, что конечные соотношения с точностью до обозначений получаются одинаковыми для обоих механизмов. Поэтому достаточно уверенно можно пользоваться теми формулами и свойствами для термоЭДС, которые, насколько это нам известно, исторически первыми были получены и обоснованы для механизма контактной термоЭДС. При этом, конечно, следует иметь в виду, что вид этих формул соответствует одновременно и эффекту контактной термоЭДС и эффекту Томсона. Таким образом, свойства термоЭДС термопар абсолютно не различимы с позиций механизма контактной термоЭДС и с позиций эффекта Томсона, т. е., опираясь на данные свойства, нельзя сделать заключение о том, что возникновение термоЭДС в термопаре обуславливается только механизмом контактной термоЭДС или только эффектом Томсона.

Литература

1. Термоэлектрическое охлаждение: текст лекций / под общ. ред. Л.П. Булата. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. – 147 с.

2. Шостаковский, П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40–46.

3. Каржавин, В.А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Каржавин. – СПб.: ВНИИМ, 2010. – 20 с.

4. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / под общ. ред. А.В. Каржавина. – Обнинск: ПК «Тесей», 2004. – 84 с.

5. Бондарук, В.И. Состояние и тенденции развития измерительных термоэлектрических преобразователей переменного тока / В.И. Бондарук, Д.Д. Тащук // Термоэлектричество. – 2009. – № 1. – С. 75–85.

6. Коржуев, М.А. О последовательности открытия основных термоэлектрических явлений / М.А. Коржуев, И.В. Катин // Термоэлектричество. – 2011. – № 3. – С. 83–100.

7. Коржуев, М.А. Исследования Рихмана и Ломоносова в области термоэлектричества (1745–1753) / М.А. Коржуев, В.В. Темяков // Термоэлектричество. – 2014. – № 1. – С. 90–104.

8. Белевцев, А.В. Достоверность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями и методика их периодической проверки / А.В. Белевцев, А.В. Каржавин, В.А. Каржавин //

Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова: тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИСиС. – 2006. – С. 146–152.

9. Гордов, А.Н. Основы температурных изменений / А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

10. Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Куперимидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

11. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. для вузов / В.П. Преображенский – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

12. Электрические измерения: учеб. для вузов / Л.И. Байда, Н.С. Добротворский, Е.М. Душин и др. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

13. Чистяков, С.Ф. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. пособие для вузов / С.Ф. Чистяков, Д.В. Радун. – М.: Высш. шк., 1972. – 392 с.

14. Блинов, О.М. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. для вузов / О.М. Блинов, А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.

15. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. – 458 с.

16. Панферов, В.И. К теории термопар / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып. 4, № 14 (86). – С. 48–50.

17. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1990. – 478 с.

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 декабря 2014 г.

DOI: 10.14529/power150203

REVISITING THE ANALYSIS OF THE THERMOCOUPLE PROPERTIES FROM THE STANDPOINT OF THOMSON MECHANISMS AND CONTACT THERMAL EMF

Panferov V. I., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tgsiv@mail.ru,
Panferov S. V., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tgsiv@mail.ru

The paper considers formal (mathematical) description of thermal EMF generation in thermocouples from the standpoint both of contact thermal EMF mechanisms and of Thomson effect. It is shown that resulting ratios both for total thermal EMF and for widely known properties (theorems) of thermocouples are the same for both

mechanisms within the accuracy of designation. Consequently, it must be taken as proved that the properties of thermocouple thermal EMF are absolutely undistinguishable from the contact thermal EMF mechanism standpoint and from Thomson effect standpoint (invariable in relation to the both mechanisms of thermal EMF generation). Previously, the literature substantiated the ratio data considering only contact thermal EMF mechanism. The obtained results may serve as a certain expanded theoretical substantiation of the usually practically applied laws of thermo-electric circuits.

Keywords: thermocouple, contact thermal EMF, Thomson effect, thermocouple properties, formal description.

References

1. Bulat L.P. *Termoelektricheskoe okhlazhdenie*. [Thermoelectric Cooling]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2002. 147 p.
2. Shostakovskij P. [Modern Solutions Thermoelectric Cooling for Electronic, Medical, Industrial and Household Appliances]. *Komponenty i tehnologii*. [Components and Technologies], 2009, no. 12, pp. 40–46. (in Russ.)
3. Karzhavin V.A. *Vliyanie termoelektricheskoy neodnorodnosti na tochnost' izmereniya temperatury termoparami* [Influence of Thermoelectric Inhomogeneity on the Accuracy of Temperature Measurement with Thermocouples]. St. Petersburg, VNIIM Publ., 2010. 20 p.
4. Karzhavin A.V. *Termoelektricheskie preobrazovateli temperatury. Teoriya, praktika, razvitie*. [Temperature Thermoelectric Converters. Theory, Practice and Development]. Obninsk, PC "Theseus" Publ., 2004. 84 p.
5. Bondaruk V.I., Tashhuk D.D. [Status and Trends of Measuring Thermoelectric Converters AC]. *Termoelektrichestvo* [Thermoelectricity], 2009, no 1, pp. 75–85. (in Russ.)
6. Korzhuev M.A., Katin I.V. [About the Opening Sequence of Basic Thermoelectric Effects]. *Termoelektrichestvo* [Thermoelectricity], 2011, no 3, pp. 83–100. (in Russ.)
7. Korzhuev M.A., Temjakov V.V. [Richman and Lomonosov Research in the Field of Thermoelectricity (1745–1753)]. *Termoelektrichestvo* [Thermoelectricity], 2014, no 1, pp. 90–104. (in Russ.)
8. Belevcev A.V., Karzhavin A.V., Karzhavin V.A. [The Accuracy of the Temperature Measuring Thermoelectric Converters and Methods for Periodic Inspection]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika: istoriya, sovremennoe sostoyanie, budushchee. K stoletiyu so dnya rozhdeniya M.A. Glinkova: Tr. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Metallurgical Heat Engineering: History, Current Status and Future. On the Centenary of the Birth of MA Glinkova: Third III International Scientific and Practical Conference]. Moscow, MISA, 2006. pp. 146–152.
9. Gordov A.N., Zhagullo O.M., Ivanova A.G. *Osnovy temperaturnykh izmereniy* [Fundamentals of temperature measurements]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1992. 304 p.
10. Evtihiev N.N., Kupersmidt Ja.A., Papulovskij V.F., Skugorov V.N. *Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin* [Measurement of Electrical and Non-Electrical Quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1990. 352 p.
11. Preobrazhenskij V.P. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Heat Engineering Measurements and Instrumentation]. Moscow, Energy Publ, 1978. 704 p.
12. Blinov O.M., Belen'kij A.M., Berdyshev V.F. *Elektricheskie izmereniya* [Electrical Measurements]. Leningrad, Energy Publ., 1980. 392 p.
13. Chistjakov S.F., Radun D.V. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory: ucheb. posobie dlja vuzov* [Heat Engineering Measurements and Instrumentation: a Manual for High Schools]. Moscow Higher School, 1972. 392 p.
14. Blinov O.M., Belen'kij A.M. Berdyshev V.F. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Heat Engineering Measurements and Instrumentation]. Moscow, Metallurgy Publ., 1993. 288 p.
15. Ivanova G.M., Kuznecov N.D., Chistjakov V.S. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Heat Engineering Measurements and Instrumentation]. Moscow, MEI Publ, 2005. 458 p.
16. Panferov V.I. [To the Theory of Thermocouples]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2007 vol. 4, no.14 (86), pp. 48–50. (in Russ.)
17. Trofimova T.I. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow, Higher School Publ., 1990. 478 p.

Received 2 December 2014

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Панферов, В.И. К анализу свойств термопар с позиций механизмов Томсона и контактной термоЭДС / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 20–24. DOI: 10.14529/power150203

REFERENCE TO ARTICLE

Panferov V.I., Panferov S.V. Revisiting the Analysis of the Thermocouple Properties from the Standpoint of Thomson Mechanisms and Contact Thermal EMF. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 20–24. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150203