

К ТЕОРИИ ТЕРМОПАР

В. И. Панферов

Рассмотрены вопросы формального (математического) описания процессов в термопарах как с позиций механизма контактной термо-ЭДС, так и с позиций эффекта Томсона. Показано, что конечные соотношения с точностью до обозначений получаются одинаковыми для обоих механизмов.

В системах управления микроклиматом зданий для измерения температуры широко используются термоэлектрические термометры, содержащие в своем составе термопару. Термопары являются базовым элементом 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]. Поэтому изучение и выявление всех сторон и особенностей термоэлектрических процессов в термопарах имеет достаточно большое значение.

Как показал анализ литературных данных, до настоящего времени нет единого общепринятого представления о причинах возникновения термо-ЭДС термопары. Обычно для объяснения принципа действия термоэлектрического термометра привлекают несколько механизмов, чаще всего выделяют два явления [2-4]: 1) механизм контактной термо-ЭДС (эффект Зеебека); 2) эффект Томсона. Несмотря на различную природу 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 [2-10], поэтому есть смысл подробнее остановиться на этом вопросе. При этом подчеркнем, что указанный вопрос является достаточно важным, поскольку в учебной литературе по измерительной технике обычно упоминался механизм контактной термо-ЭДС [5-8] и поэтому все основные свойства термопар были описаны и обоснованы с позиций этого явления.

К месту заметим, что значимость эффекта Томсона до сих пор еще подвергается сомнению [1, с. 15 и с. 128], однако в данной работе мы не будем непосредственно обсуждать этот вопрос.

Отметим также, что возможно именно по причине недостаточной ясности в описании процессов в двух недавно изданных учебниках по теплотехническим измерениям и приборам [9, 10] это формальное описание просто опущено, в [10, с. 60], например, первое свойство термопар фор-

мулируется «без доказательства», что вообще-то не является лучшим выходом из создавшегося положения.

Рассмотрим цепь, состоящую из двух разнородных проводников P и Q (рис. 1).

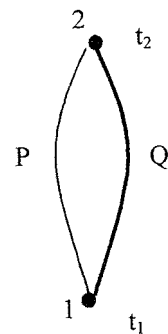


Рис. 1. Термопара

Как это хорошо известно, в данной цепи контактные термо-ЭДС образуются в точках 1 и 2, обозначим их как $E_{PQ}(t_1)$ и $E_{QP}(t_2)$. Результирующая контактная ЭДС цепи (см. 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 [5] 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 термо-ЭДС 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 . Очевидно, что термо-ЭДС 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 термо-ЭДС Томсона зависит только от температуры концов проводника Q и не зависит от температуры других его точек. Кроме того, термо-ЭДС 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.

Для проводника P по аналогии можно записать, что

$$E_P = F_P(t_1) - F_P(t_2),$$

здесь контур (см. 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 термо-ЭДС 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 термо-ЭДС, поэтому рассмотрим и эти моменты.

Свойство 1: если в цепь термопары включен третий проводник и его концы находятся при одинаковых температурах, то результирующая термо-ЭДС 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)

$$E_{k\Sigma 2} = E_{PQ}(t_1) + E_{QR}(t_2) + E_{RP}(t_2).$$

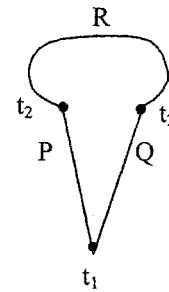


Рис. 2. Первый способ включения третьего проводника в цепь термопары

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 $E_{k\Sigma 2}$, 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) проявляется только эффект Томсона, то получим, что

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

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

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

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 контактная термо-ЭДС

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

но ведь

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

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 проявляется только эффект Томсона, то получим, что

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

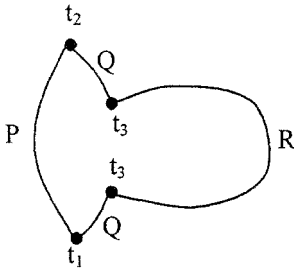


Рис. 3. Второй способ включения третьего проводника в цепь термопары

Таким образом, доказательство справедливости свойства получилось заметно проще. К месту заметим, что доказательство других двух известных свойств термопар [5-10] с позиций эффекта Томсона получается также достаточно простым и естественным.

В целом, все вышеизложенное, как нам представляется, может служить неким теоретическим доказательством законов термоэлектрических цепей. В [2, 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 в термопарах как с позиций механизма контактной термо-ЭДС, 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 термо-ЭДС, которые исторически первыми были получены и обоснованы для механизма Зеебека, при этом, конечно, следует напоминать, что вид этих формул соответствует одновременно и эффекту Зеебека и эффекту Томсона.

Литература

1. Термоэлектрическое охлаждение: Текст лекций / под общ. ред. Л.П. Булата. - СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. - 147 с.
2. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / Под общ. ред. А.В. Каржавина. - Обнинск: ПК «Тесей», 2004. - 84 с.
3. 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.
4. Гордое, А.Н. Основы температурных измерений / А.Н. Гордое, ОМ. Жагулло, А.Г. Иванова. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 304 с.
5. Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папулоеский, В. КСкугоров. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352 с.
6. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / В.П. Преображенский. - М.: Энергия, 1978. - 704 с.
7. Электрические измерения: учебник для вузов / Л.И. Байда, Н.С. Добротворский, Е.М. Душин и др. - Л.: Энергия, 1980. - 392 с.
8. Чистяков, С.Ф. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. пособие для вузов / С.Ф. Чистяков, Д.В. Радун. - М.: Высш. шк., 1972. - 392 с.
9. Блинов, О.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / О.М. Блинов, А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев. - М.: Металлургия, 1993. - 288 с.
10. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова, ИД. Кузнецов, В.С. Чистяков. - М.: МЭИ, 2005. - 458 с.