

К вопросу о компенсации температуры холодного спая при измерении температуры с помощью термопар

Василий Кинёв, Сергей Рогожников

В статье рассматривается методика компенсации температуры холодного спая при преобразовании измеренной модулем аналогового ввода программируемого контролера термо-ЭДС термопары в значение измеряемой температуры нагретого тела. Также рассмотрен пример построения библиотечного FBD-блока для измерения температуры с помощью термопары с HCX XK(L) в программном пакете *UltraLogik* для модуля аналогового ввода ADAM-5018

Введение

Несколько лет назад у одного из авторов статьи состоялась беседа со специалистом по метрологии, во время которой он рассказал, что на их предприятии внедряется система автоматизации и КИП одного из технологических процессов производства меди на основе программируемых контроллеров. При метрологической проверке каналов измерения температуры с помощью термопар с HCX XK(L) обнаружена ошибка в измерении, которая в диапазоне до 600°C достигала 8°C . Позднее, при разработке FBD-библиотеки для разработки систем автоматизации и КИП с использованием программируемых в программном пакете *UltraLogik* контроллеров ADAM-5510, мы обнаружили одну методическую неточность в прилагаемой с пакетом FBD-библиотеке «ADAM», касающуюся компенсации температуры холодного спая. Это и явилось причиной написания данной статьи.

Коротко о явлении Зеебека

Измерение температуры нагретых тел с помощью термопар основано на физическом явлении, открытом в 1821 году Зеебеком (T. Seebeck). Явлением Зеебека называют возникновение электродвижущей силы E в замкнутой электрической цепи, составленной из последовательно соединенных разнородных проводников, если места их контакта (спаи) поддерживают при разных температурах. Величину E называют термо-ЭДС [1]. На рисунке №1 изображена электрическая цепь, составленная из проводников различных материалов 1 и 2. Спаи находятся при температурах T_c и $T_h > T_c$. Такая цепь называется *термоэлементом* или *термопарой*.

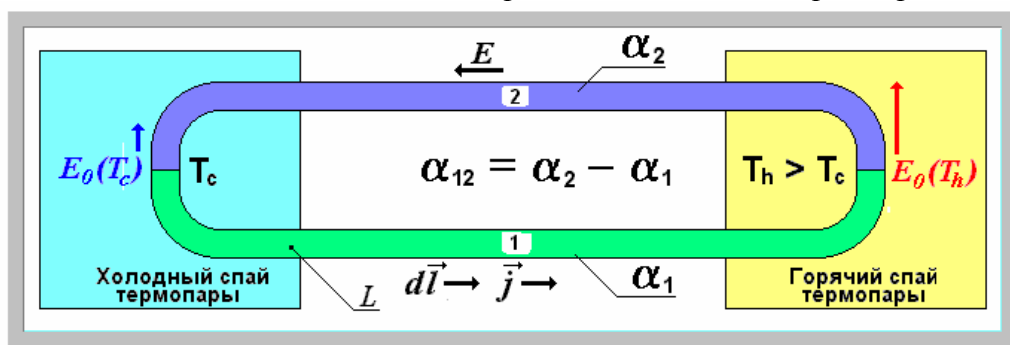


Рисунок №1. Иллюстрация к явлению Зеебека (направления E_0 указаны в предположении $T_h > T_c > 0^{\circ}\text{C}$).

Из теории термоэлектрических явлений известно, что выражение для вектора плотности электрического тока \vec{j} в отсутствие магнитного поля имеет вид [1]:

$$\vec{j} = -(\alpha \text{grad } T + \text{grad}(\varphi - \mu/e))/\rho \quad (1)$$

Здесь: T - температура,

e - модуль электрического заряда электрона,

ρ - удельное сопротивление,

α - удельная термоэлектродвижущая сила,

μ - химический потенциал электронов,

φ - электрический потенциал,
 $(\mu - e\varphi)$ - электрохимический потенциал.

Закон Ома для контура L : $E = IR$; отсюда дифференциал $dE = IdR = jS(\rho/S)d\vec{l} = \rho(jd\vec{l})$ (S – площадь сечения проводника, $d\vec{l}$ – дифференциал длины контура). Следовательно, для нахождения E нужно взять криволинейный интеграл от ρj по $d\vec{l}$, обойдя замкнутый контур L против часовой стрелки.

$$\begin{aligned} E &= \oint_L IdR = \oint_L (S \vec{j}) \frac{\rho d\vec{l}}{S} = \oint_L \rho \vec{j} d\vec{l} = - \oint_L \alpha \text{grad} T d\vec{l} + \frac{1}{e} \oint_L \text{grad}(\mu - e\varphi) d\vec{l} = \\ &= - \oint_L \alpha \frac{\partial T}{\partial l} dl + 0 = - \oint_L \alpha dT = - \int_{T_c}^{T_h} \alpha_1 dT - \int_{T_h}^{T_c} \alpha_2 dT = \int_{T_c}^{T_h} (\alpha_2 - \alpha_1) dT = \int_{T_c}^{T_h} \alpha_{12} dT = \\ &= \int_0^{T_h} \alpha_{12} dT - \int_0^{T_c} \alpha_{12} dT = E_0(T_h) - E_0(T_c), \quad \text{где: } E_0(T) = \int_0^T \alpha_{12} dT, \quad \alpha_{12} = \frac{dE_0}{dT} \end{aligned}$$

В выражении (1) криволинейный интеграл от второго слагаемого будет равен нулю, так как электрохимический потенциал – функция непрерывная, а интеграл по замкнутому контуру от градиента непрерывной функции равен нулю. В интеграле от первого слагаемого составляющие градиента в плоскости сечения проводников равны нулю и $(\text{grad } T) \cdot d\vec{l} = (\partial T / \partial l) dl = dT$. В результате интегрирования по замкнутому контуру L получаем формулу для вычисления E :

$$E = E_0(T_h) - E_0(T_c), \quad (2)$$

где: $E_0 = f(T)$ – функция, являющаяся интегралом от $\alpha_{12} = \alpha_2 - \alpha_1$ по dT с переменным верхним пределом, равным T , при нижнем пределе интегрирования, равном 0°C .

В свою очередь $\alpha_{12} = dE/dT$ является функцией температуры и зависит от сочетания материалов 1 и 2. Приближенные значения α_{12} для некоторых материалов для температур, близких к 0°C , приведены в таблице №1, когда вторым электродом термопары является свинец [2]. Знак «плюс» указывает, что у спая с большей температурой ток направлен в сторону от свинцового проводника к проводнику из таблицы, при знаке «минус» - в обратном направлении.

Таблица №1. Приближенные значения удельных термоэлектродвижущих сил некоторых проводников относительно свинца при $0 \dots 100^\circ\text{C}$ [2].

Проводник	α_{12} , мкВ/ $^\circ\text{C}$
Свинец	0
Медь	+3,2
Серебро	+2,7
Никель	-20,8
Железо	+15,0
Платина	-4,4
Аллюмель	-17,3
Копель	-38,0
Хромель	+24,0
Платинородий	+2,0

Значения функций $E_0 = f(T)$, называемых номинальными статическими характеристиками преобразования (НСХ), для различных типов термопар, применяемых в практике измерения температуры, затабулированы в ГОСТ 3044-84 [3]. Там же приводятся коэффициенты a_n полиномиальной аппроксимации данных функций $E_0 = f(T) = \sum a_n T^n$. На рисунке №2 приведены графики для $E_0(T)$ и $\alpha_{12}(T)$ для хромель-копелевой термопары ХК(L).

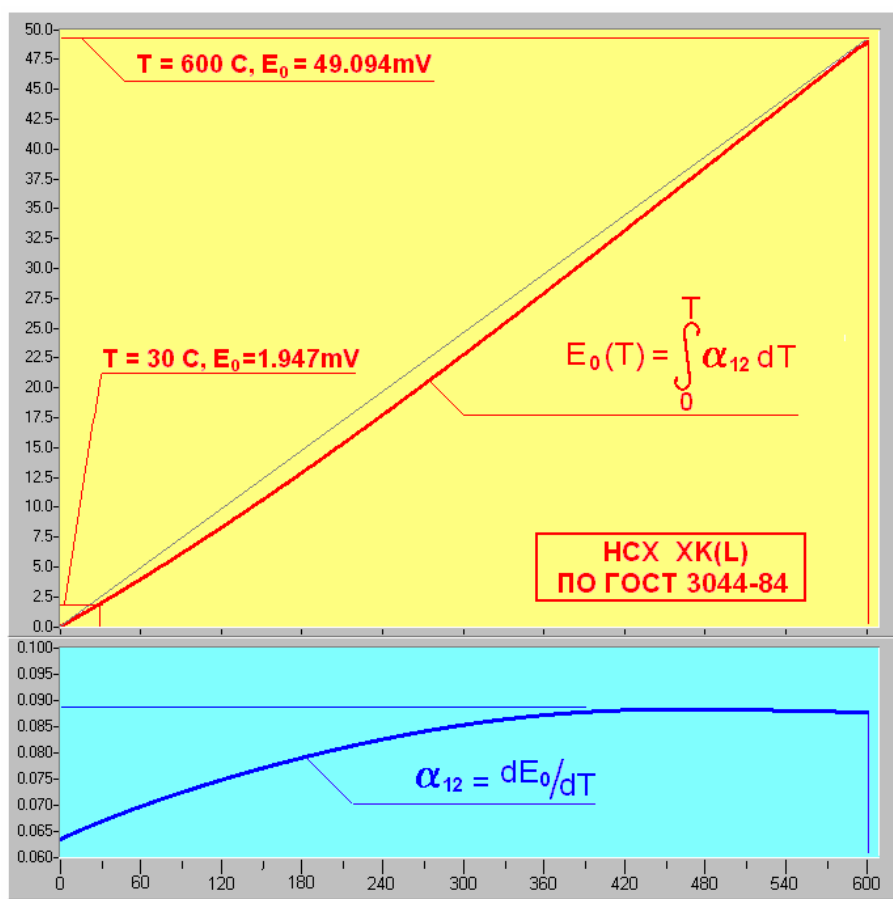


Рисунок №2. Графики зависимости $E_0(T)$ и $\alpha_{12}(T)$ для хромель-копелевой термопары ХК(L).

Рассмотрим пример хромель-копелевой термопары ХК(L). Какова будет термо-ЭДС E , если спаи термопары находятся при температурах: $T_h = 600^\circ\text{C}$, $T_c = 30^\circ\text{C}$?

Согласно ГОСТ 3044-84: $E_0(600) = 49,094\text{ мВ}$, $E_0(30) = 1,947\text{ мВ}$, следовательно, термо-ЭДС при данных температурах спаев $E = 49,094 - 1,947 = 47,147\text{ мВ}$.

Измерение температуры с помощью термопар

Важным для нас является следующее свойство явления Зеебека [1]: если в разрыв одной из ветвей термоэлемента (термопары) включить последовательно любое количество проводников другого состава, все спаи которых находятся при одной и той же температуре, то термо-ЭДС в такой цепи будет равна термо-ЭДС исходного термоэлемента (термопары). Это свойство позволяет нам включить в цепь термопары, со стороны холодного спая, какой-либо измерительный прибор для измерения термо-ЭДС E : милливольтметр, АЦП модуля аналогового ввода контроллера и так далее.

Поставим задачу: известен тип термопары (известна функция $E_0 = f(T)$), известно (измерено) значение термо-ЭДС E , известна (измерена) температура холодного спая T_c ; как вычислить температуру горячего спая T_h ?

Вернемся к соотношению (2) $E = E_0(T_h) - E_0(T_c)$, которое разрешим относительно $E_0(T_h)$: $E_0(T_h) = E + E_0(T_c)$. Нам известна по ГОСТ 3044-84 функция $E_0 = f(T) = \sum a_n T^n$, следовательно, $E_0(T_c)$ мы можем вычислить и правая часть $E + E_0(T_c)$ будет известна. Располагая табличными значениями функции $E_0 = f(T)$, можно, например, методом наименьших квадратов построить полиномиальную аппроксимацию обратной к ней функции $T = f^{-1}(E_0) = \sum b_k E_0^k$. Такие полиномы для применяющихся в практике термопар построены, в частности, в библиотеке «Нормализаторы» программного пакета *UltraLogik*. Таким образом, мы можем вычислить T_h по формуле:

$$T_h = f^{-1}(E_0(T_h)) = f^{-1}(E + E_0(T_c)) = \sum b_k (E + \sum a_n T_c^n)^k \quad (3)$$

Данная формула лежит в основе вычисления температуры горячего спая термопары с помощью измерения термо-ЭДС термопары и температуры холодного спая термопары.

Вернемся к рассмотренному ранее примеру хромель-копелевой термопары ХК(L): предположим, что мы измерили термо-ЭДС $E = 47,147\text{мВ}$, измерили температуру холодного спая $T_c = 30^\circ\text{C}$. Какова температура T_h горячего спая?

Находим $E + \sum a_n T_c^n = 47,147 + 1,947 = 49,094\text{мВ}$. Отсюда: $T_h = f^{-1}(49,094) = 600^\circ\text{C}$.

Пусть функция $E_0 = f(T)$, график которой проходит через начало координат, пренебрежительно мало отличается от линейной функции. Тогда и график функции $T = f^{-1}(E_0)$ также проходит через начало координат, и пренебрежительно мало отличается от прямой линии. В этом случае можно приближенно предположить:

$$T_h = f^{-1}(E_0(T_h)) = f^{-1}(E + f(T_c)) = f^{-1}(E) + f^{-1}(f(T_c)) = f^{-1}(E) + T_c = \sum b_k E^k + T_c \quad (4)$$

Если это свойство распространить на функции, график которых значительно отличается от прямой линии, то использование формулы (4) приведет к неоправданной погрешности вычислений.

Еще раз вернемся к рассмотренному выше примеру с ХК(L): $E = 47,147\text{мВ}$, $T_c = 30^\circ\text{C}$. Если применить формулу (4), то получим: $T_h = f^{-1}(47,147) + 30 = 577,82 + 30 = 607,82^\circ\text{C}$.

Ошибка составляет: $\Delta T_h = 7,82^\circ\text{C}$ ($\delta T_h = 1,3\%$). Полагаем, что это как раз те восемь градусов, о которых упоминалось в начале данной статьи.

FBD-блок для термопары ХК(L) для ADAM-5018

Рассмотрим пример построения в программном пакете *UltraLogik* библиотечного FBD-блока для хромель-копелевой термопары с НСХ ХК(L) по ГОСТ 3044-84. Блок построен на основании формулы (3). Коэффициенты b_k взяты из библиотеки «Нормализаторы». Для нахождения $E_0(T_c)$ построен полином второй степени, так как в интервале $-20...+50^\circ\text{C}$ он дает результаты с хорошей точностью и нет необходимости использовать из ГОСТ 3044-84 полином восьмой степени, построенный для температур $-200...+800^\circ\text{C}$.

Таблица №2. Сравнение полинома $E_0(T_c) = T_c (0,06325 + 0,000055 T_c)$ с данными из [3].

T_c	E_0 [3]	E_0 Вычисл.	ΔE_0
$^\circ\text{C}$	мВ	мВ	мВ
-20	-1,240	-1,2430	-0,0030
-10	-0,626	-0,6270	-0,0010
0	0,000	0,0000	0,0000
5	0,318	0,3176	-0,0004
10	0,638	0,6380	0,0000
15	0,961	0,9611	0,0001
20	1,287	1,2870	0,0000
25	1,616	1,6156	-0,0004
30	1,947	1,9470	0,0000
35	2,282	2,2811	-0,0009
40	2,618	2,6180	0,0000
45	2,957	2,9576	0,0006
50	3,299	3,3000	0,0010

Реализация и внешний вид FBD-блока **SENSOR_TC_L** показан на рисунке №3.

Блок предназначен для измерения температуры в интервале $0...600^\circ\text{C}$ термопарой ХК(L) с помощью модуля ADAM-5018, сконфигурированного под биполярный сигнал с разрешением 16bit. Входы и выходы блока:

Inp (INTEGER) - вход кода с модуля ADAM-5018,

Gnf (INTEGER) - коэффициент усиления конфигурации модуля ADAM-5018,

- CMP (FLOAT) - коэффициент коррекции преобразования напряжения в код,
 CJC (FLOAT) - температура холодного спая в $^{\circ}\text{C}$,
 MES (FLOAT) - температура горячего спая в $^{\circ}\text{C}$.

Использованные здесь библиотечные блоки FUNC_LINE и FUNC_POL8 вычисляют значение линейной функции $y = a_0 + a_1x$ и значение полинома 8 степени $y = a_0 + a_1x + \dots + a_8x^8$ соответственно и в пояснениях не нуждаются.

Gnf не рекомендуется выбирать больше 16, так как при этом напряжение с датчика температуры холодного спая модуля ADAM-5018 может выйти за пределы шкалы преобразования. CMP – это аналог настроечного резистора в приборах. При правильно откалиброванном модуле CMP = 1. Если же есть некоторое отклонение при преобразовании напряжения в код, то его можно компенсировать, вводя значение близкое к единице (но у нас не возникала необходимость в этом). Блок для измерения температуры холодного спая мы не обсуждаем, так как реализация такого блока для модуля ADAM-5018 приведена в библиотеке «ADAM» пакета *UltraLogik*.

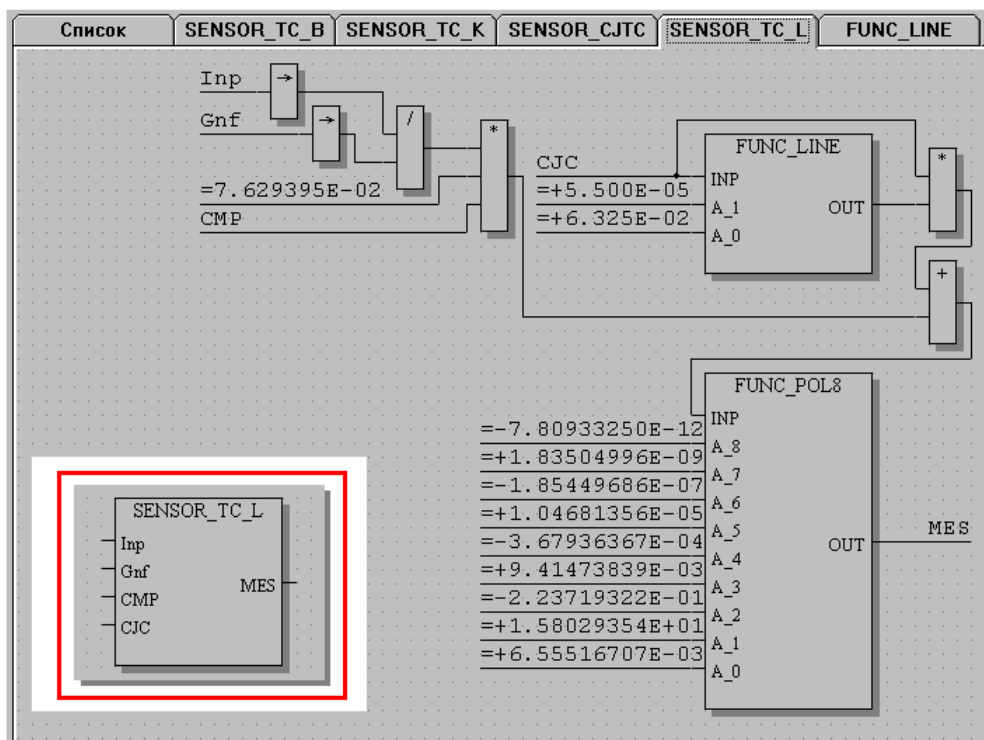


Рисунок №3. Реализация и внешний вид блока **SENSOR_TC_L**.

Заключение

Мы ограничились примером FBD-блока для хромель-копелевой термопары. Для термопары ХА(К) при измерении температур до 1000°C ошибка при применении формулы (4) незначительна.

В случае платино-родиевой термопары с НСХ ПР(В) компенсацию выполнять не целесообразно, поскольку в интервале температур $0 \dots 53^{\circ}\text{C}$ $E_0(T)$ принимает значения разного знака и не выходит за пределы интервала $-0,003 \dots +0,003\text{мВ}$. Тем более, если ее выполнить по формуле $T_h = \sum b_k E^k + T_c$, то это может привести к погрешности до 4%.

Действительно, пусть термо-ЭДС $E = 4,833\text{мВ}$, $T_c = 40^{\circ}\text{C}$. Так как $E_0(40) = 0,000\text{мВ}$ [3], то по формуле (3) $T_h = \sum b_k (E + 0)^k = \sum b_k E^k = 1000^{\circ}\text{C}$; если же мы воспользуемся приближенной формулой (4) $T_h = \sum b_k E^k + T_c = 1000 + 40 = 1040^{\circ}\text{C}$, то ошибка преобразования составит неприемлемое значение $\delta = 100(1040-1000)/1000 = 4\%$.

Отсюда следует, что при разработке программ контроллеров в части измерения температуры с помощью термопар, к каждому типу термопар следует подходить индивидуально, исследуя его номинальную статическую характеристику, в нашем обозначении функцию $E_0 = f(T)$, в том диапазоне температур, в котором нужно будет вести измерения.

Литература

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов. Издание шестое: Издательство «Наука», М., 1974.
2. Физический энциклопедический словарь. Том пятый: Издательство «Советская энциклопедия», М., 1966
3. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования: Издательство стандартов, М., 1987