

3 ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

3.1 Расчет электрического сигнала преобразователя температуры

Преобразование температуры в электрический сигнал производится, как правило, с помощью термоэлектрических преобразователей (термопар) в термо-ЭДС или терморезистивных преобразователей в изменение электрического сопротивления.

Развиваемое значение термо-ЭДС на зажимах термопары определяется как разность термо-ЭДС горячего (рабочего) и холодного спая (свободных концов):

$$E_{\text{ТП}} = E_{\text{ГС}} - E_{\text{ХС}}.$$

В таблице 3.1 приведены зависимости термо-ЭДС E_{θ_0} от температуры $E_{\theta_0} = f(\theta)$ для различного вида термопар при температуре холодного спая равной нулю ($\theta_{\text{ХС}}=0^{\circ}\text{C}$). В общем случае эти зависимости нелинейные, поэтому каждый участок зависимости аппроксимируется прямой со своим углом наклона, тангенс которого определяется выражением:

$$\frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}},$$

где $E_{\text{ТВ}}$, $E_{\text{ТН}}$, $\theta_{\text{ТВ}}$, $\theta_{\text{ТН}}$ – соответственно верхние и нижние значения термо-ЭДС и температуры участка зависимости.

Таблица 3.1 – Термоэлектродвижущая сила термопар, мВ

°С	медь- копель МК	железо- копель ЖК	хромель- копель ХК	хромель- алюмель ХА	платинородий- платина ПП
-20	-0,86	-1,05	-1,27	-0,77	-0,109
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,89	1,09	1,31	0,8	0,115
100	4,75	5,75	6,95	4,1	0,640
200	10,29	12,00	14,65	8,13	1,421
300	16,48	18,10	22,90	12,21	2,31
400	23,13	24,55	31,48	16,39	3,243
500	30,15	30,90	40,15	20,64	4,210
600	34,47	37,40	49,00	24,90	5,212
700	-	44,10	57,75	29,14	6,249
800	-	51,15	66,40	33,31	7,320
900	-	-	-	37,36	8,426

1000	-	-	-	41,31	9,566
1100	-	-	-	45,14	10,741
1200	-	-	-	48,85	11,950
1300	-	-	-	52,41	13,153
1400	-	-	-	-	14,356
1500	-	-	-	-	16,760

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов (холодного спая) равной нулю ($\theta_{xc}=0^{\circ}\text{C}$). Если при эксплуатации термопары температура холодного спая будет отличаться от 0°C на величину $+\theta_{\Delta}$, то измеренная ЭДС будет меньше, и необходимо ввести поправку в показания преобразователя. Однако из-за нелинейности зависимости поправка $\Delta\theta$ к показаниям измерителя термо-ЭДС (указателя) θ'_x , градуированного непосредственно в градусах, не будет равна θ_{Δ} .

Можно поступить следующим образом. Вначале определяется поправка по термо-ЭДС ΔE , которой соответствует значение температуры свободных концов $\theta_{xc}=\theta_{\Delta}$ для участка зависимости, в котором находится значение θ_{xc} :

$$\Delta E = E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta_{\Delta} - \theta_{\text{ТН}}).$$

Далее аналогичным образом определяют значение термо-ЭДС, соответствующее показаниям указателя, для своего участка зависимости:

$$E'_x = E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta'_x - \theta_{\text{ТН}}).$$

Затем вносят поправку к значению термо-ЭДС:

$$E_x = E'_x + \Delta E.$$

Наконец определяют «истинное» значение измеряемой температуры для соответствующего участка зависимости:

$$\theta_x = \theta_{\text{ТН}} + \frac{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}}{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}} (E_x - E_{\text{ТН}}).$$

Если указатель проградуирован в единицах ЭДС (В), то необходимость определения значения отпадает.

Без введения поправки методическая погрешность в абсолютном выражении составит: $\Delta_{\text{мет}} = \theta_x - \theta'_x$, в относительном выражении: $\delta_{\text{мет}} = \frac{\Delta_{\text{мет}}}{\theta_x} 100 \%$.

3.2 Примеры расчета и варианты заданий

Пример 3.2.1. Определить «истинную» температуру и методическую погрешность, если указатель показал значение измеренной температуры термопарой ХА (хромель-алюмелевой) $\theta'_x = 490 \text{ }^\circ\text{C}$ при температуре свободных концов $\theta_{\text{xc}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

1. Определяем поправку по термо-ЭДС при $\theta_{\text{xc}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\Delta E = E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta_{\Delta} - \theta_{\text{ТН}}) = 0,80 + \frac{4,10 - 0,80}{100 - 20} (40 - 20) = 1,625 \text{ мВ.}$$

2. Определяем значение термо-ЭДС, соответствующее показаниям указателя:

$$\begin{aligned} E'_x &= E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta'_x - \theta_{\text{ТН}}) = \\ &= 16,39 + \frac{20,64 - 16,39}{500 - 400} (490 - 400) = 20,215 \text{ мВ} \end{aligned}$$

3. Вносим поправку к значению термо-ЭДС:

$$E_x = E'_x + \Delta E = 20,215 + 1,625 = 21,84 \text{ мВ.}$$

4. Определяем «истинное» значение измеряемой температуры:

$$\begin{aligned} \theta_x &= \theta_{\text{ТН}} + \frac{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}}{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}} (E_x - E_{\text{ТН}}) = \\ &= 500 + \frac{600 - 500}{24,90 - 20,64} (21,84 - 20,64) = 528,2 \text{ }^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

5. Без введения поправки методическая погрешность в абсолютном выражении составит:

$$\Delta_{\text{мет}} = \theta_x - \theta'_x = 528,4 - 490 = 38,17 \text{ }^\circ\text{C.}$$

в относительном выражении:

$$\delta_{\text{мет}} = \frac{\Delta_{\text{мет}}}{\theta_x} 100\% = \frac{38,17}{490} 100\% = 7,23 \%$$

Пример 3.2.2. Определить значение термо-ЭДС термопары ХА (хромель-алюмелевой) $E_{\text{ТП}}$ при измерении температуры $\theta_x=517$ °С, если температура холодного спая $\theta_{\text{хс}}=40$ °С.

Решение:

1. Определяем значение термо-ЭДС E_x , соответствующее температуре $\theta_x=517$ °С:

$$E_x = E_{\text{ТС}} = E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta_x - \theta_{\text{ТН}}) =$$

$$= 20.64 + \frac{24.90 - 20.64}{600 - 500} (517 - 500) = 21.364 \text{ мВ.}$$

2. Определяем значение термо-ЭДС $E_{\text{хс}}$, соответствующее температуре свободных концов $\theta_{\text{хс}}= 40$ °С:

$$E_{\text{хс}} = E_{\text{ТН}} + \frac{E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}}}{\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}} (\theta_{\text{хс}} - \theta_{\text{ТН}}) = 0,80 + \frac{4,1 - 0,80}{100 - 20} (40 - 20) = 1,625 \text{ мВ.}$$

3. Результирующая термо-ЭДС термопары:

$$E_{\text{ТП}} = E'_x = E_x - E_{\text{хс}} = 21,364 - 1,625 = 19,74 \text{ мВ.}$$

Варианты заданий приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Варианты заданий к п. 3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\theta_x', \theta_x, \text{ }^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	200	400	500	600	700	100	200	300
$\theta_{\text{хс}}, \text{ }^\circ\text{C}$	20	10	15	20	30	5	10	15	20	25	5	10	20
термопара	МК (медь-копель)					ЖК (железо-копель)					ХК (хромель-копель)		
№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$\theta_x', \theta_x, \text{ }^\circ\text{C}$	400	500	600	700	800	1000	1200	1500	1500	400	500	600	700
$\theta_{\text{хс}}, \text{ }^\circ\text{C}$	30	30	100	70	60	100	100	150	100	20	20	150	150
термопара	ХА (хромель-алюмень)					ПП (платинородий-платина)							