

Термопары: задачи с решениями и пояснениями. Практическое пособие по измерению температуры

Повный А. В.

Школа для электрика - <https://electricschool.info/>

Канал в Telegram:
<https://t.me/electricschool>

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий решебник предназначен для студентов технических специальностей, изучающих дисциплины «Электрические измерения», «Контрольно-измерительные приборы» и «Промышленная автоматизация». Он содержит подробные решения задач по теме **термоэлектрические преобразователи (термопары)** с пояснением физической сущности каждого явления.

Цель сборника — не просто получить числовой ответ, а сформировать понимание принципов работы термопар, источников погрешностей и методов их устранения. Каждое решение построено по единой структуре: **условие** → **дано** → **теория** → **решение** → **вывод**, что позволяет использовать материал как для самостоятельной подготовки, так и в ходе аудиторных занятий.

Тематика задач

Сборник охватывает следующие вопросы:

- Определение термо-ЭДС по градуировочным таблицам НСХ
- Обратная задача: нахождение температуры по измеренной ЭДС, интерполяция
- Законы термоэлектрических цепей (промежуточных температур, промежуточного проводника)
- Погрешности из-за отклонения температуры холодных спаев от нуля
- Влияние сопротивления измерительной цепи на показания прибора
- Применение медных и термоэлектродных (компенсационных) соединительных проводов
- Последовательное включение термопар (термобатарея)
- Температурная чувствительность и нелинейность НСХ

Нормативная база

Все расчёты выполнены в соответствии с **ГОСТ Р 8.585-2001** «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования». Значения термо-ЭДС приведены для температуры холодных спаев $T_0 = 0$ °С, если иное не оговорено в условии задачи.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

1. Основные законы термоэлектрических цепей

Закон промежуточных температур:

$$E(T_1, T_2) = E(T_1, 0) - E(T_2, 0)$$

Позволяет пересчитывать ЭДС при произвольной температуре холодного спая, если известны табличные значения НСХ.

Закон промежуточного проводника:

Введение однородного металла в цепь термопары не изменяет суммарную ЭДС, если оба конца вставки находятся при одинаковой температуре. Это является основой применения компенсационных проводов.

Поправка на температуру холодного спая:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AC}(T_1, T_2) + E_{CB}(T_1, T_2)$$

Напряжение на выводах прибора (делитель):

$$U = E \cdot \frac{R_V}{R_V + R_{вн}}$$

Температурная чувствительность:

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

2. Типы термопар и их характеристики

Обозначение РФ	Тип МЭК	Материалы электродов	Диапазон, °С	Чувствительность (20–100°С)
ТПП	S	Платина-родий (10%) / Платина	0 ... +1600	~6,5 мкВ/°С
ТПР	B	Платина-родий (30%) / Платина-родий (6%)	+200 ... +1800	~1,0 мкВ/°С
ТХА	K	Хромель / Алюмель	-200 ... +1300	~41 мкВ/°С
ТХК	L	Хромель / Копель	-200 ... +600	~68 мкВ/°С
ТЖК	J	Железо / Константан	-200 ... +1200	~55 мкВ/°С
ТМК	T	Медь / Константан	-250 ... +400	~40 мкВ/°С

3. Таблицы НСХ (ГОСТ Р 8.585-2001, $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

ТПП (тип S), мВ

T, $^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E, мВ	0,000	0,055	0,113	0,173	0,235	0,299	0,365	0,433	0,502	0,573	0,646
T, $^\circ\text{C}$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400
E, мВ	1,441	2,323	3,259	4,233	5,239	6,275	7,345	8,449	9,587	11,951	14,373

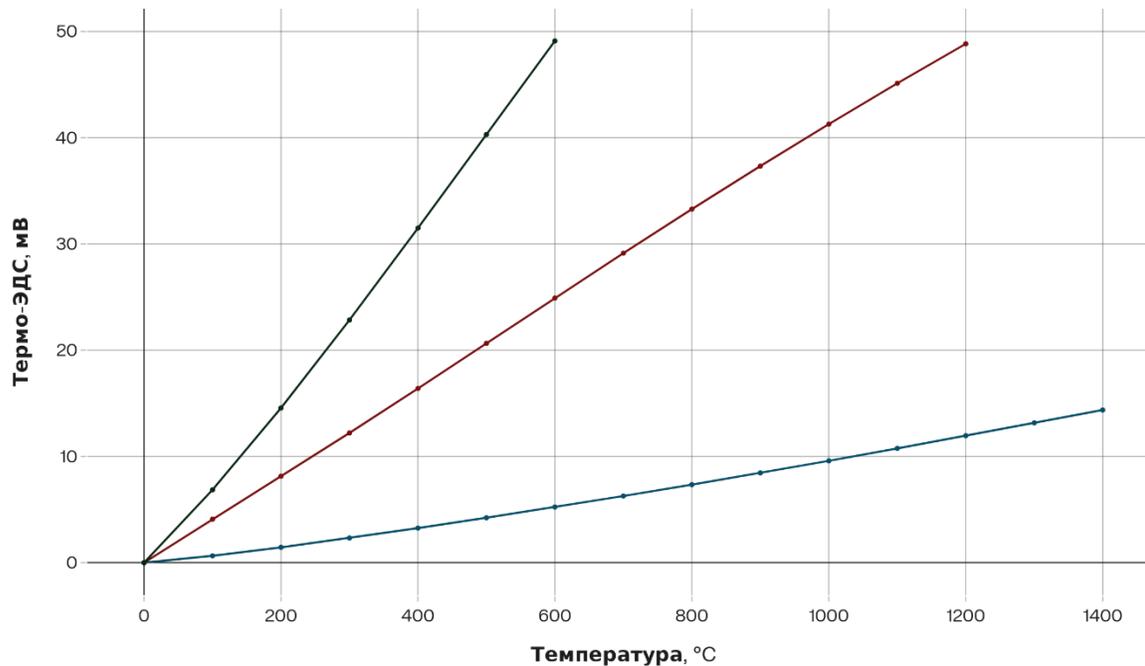
ТХА (тип К), мВ

T, $^\circ\text{C}$	0	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
E, мВ	0,000	2,023	4,096	6,138	8,138	12,209	16,397	20,644	24,905	29,129	33,275	37,326	41,276

ТХК (тип L), мВ

T, $^\circ\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600
E, мВ	0,000	6,862	14,560	22,843	31,492	40,299	49,108

4. График НСХ термопар



5. Классы точности термопар (ГОСТ Р 8.585-2001)

Класс	ТПП (S)	ТХА (K)	ТХК (L)
1	$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,004 \cdot T]$	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,004 \cdot T]$	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,004 \cdot T]$
2	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,007 \cdot T]$	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,0075 \cdot T]$	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,0075 \cdot T]$
3	—	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,015 \cdot T]$	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm[0,015 \cdot T]$

6. Применение соединительных проводов

Тип провода	Материал	Эффективный T_0	Погрешность
Медные	Cu	T холодного спая термопары	Максимальная
Термоэлектродные (компенсационные)	Аналог материала термопары	T у прибора	Средняя
С термокомпенсацией	Любой + схема компенсации	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (электрически)	Минимальная

Практическое правило: для высокоточных измерений (ТПП, ТПР) всегда применяют компенсационные провода и автоматическую компенсацию холодного спая в приборе.

Задачи с решениями

Задача 1

Условие

Найти термо-ЭДС для термопары **ТПП (тип S)** при $T = 50, 80$ и $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура холодных спаев $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теория

По градуировочным таблицам НСХ (ГОСТ Р 8.585-2001) термопара **ТПП** — **платина-родий/платина**. Термо-ЭДС берётся напрямую из таблицы при $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ

T, °C	E(T, 0), мВ
50	0,299
80	0,502
90	0,573

Задача 2

Условие

Измеренные значения термо-ЭДС для термопары ТХА (тип К) при $T_0 = 0$ °C составили 5,2; 7,8; 8,0 мВ. Найти температуру контролируемой среды.

Теория

По таблице НСХ ТХА (хромель-алюмель) находим температуру методом **линейной интерполяции**:

$$T = T_1 + \frac{E - E_1}{E_2 - E_1} \cdot (T_2 - T_1)$$

Решение

Из таблицы: $E(100^\circ\text{C}) = 4,096$ мВ, $E(150^\circ\text{C}) = 6,138$ мВ, $E(200^\circ\text{C}) = 8,138$ мВ.

При $E = 5,2$ мВ (между 100 и 150 °C):

$$T = 100 + \frac{5,2 - 4,096}{6,138 - 4,096} \times 50 = 100 + \frac{1,104}{2,042} \times 50 \approx 127 \text{ }^\circ\text{C}$$

При $E = 7,8$ мВ (между 150 и 200 °C):

$$T = 150 + \frac{7,8 - 6,138}{8,138 - 6,138} \times 50 \approx 191,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

При $E = 8,0$ мВ:

$$T = 150 + \frac{8,0 - 6,138}{2,000} \times 50 \approx 196,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Задача 3

Условие

Найти температурную чувствительность термопары ТХК (тип L) в диапазонах 0–100, 100–200, 200–300 °С. Построить график.

Теория

Температурная чувствительность (крутизна) — это средняя термо-ЭДС на градус:

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta T} \text{ (мкВ/}^\circ\text{C)}$$

Решение

Из таблицы НСХ ТХК: $E(0) = 0$; $E(100) = 6,862$; $E(200) = 14,560$; $E(300) = 22,843$ мВ.

Диапазон	ΔE , мВ	S , мкВ/°С
0–100 °С	6,862	68,6
100–200 °С	7,698	77,0
200–300 °С	8,283	82,8

Вывод: чувствительность ТХК **возрастает** с температурой — характеристика нелинейная, что видно по увеличению наклона НСХ.

Задача 4

Условие

Измеренная термо-ЭДС при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 1,1 мВ. Определить тип термопары и погрешность.

Решение

Сравниваем с табличными значениями $E(150, 0)$ для разных типов:

Тип термопары	$E(150^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C})$ по таблице
ТХА (тип К)	6,138 мВ
ТХК (тип L)	~10,22 мВ
ТПП (тип S)	~0,900 мВ

Измеренное значение 1,1 мВ **ближайшее к ТПП (тип S)**. Погрешность нахождения E :

$$\delta E = 1,1 - 0,900 = +0,2\text{ мВ}$$

Задача 5

Условие

При измерении температуры термопарой **ТХА** термо-ЭДС равна 5,5 мВ при $T_0 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти истинную и измеренную температуры.

Теория

Прибор откалиброван при $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, но реально $T_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Нужно ввести **поправку на температуру холодного спая**:

$$E(T, 0) = E_{\text{изм}} + E(T_0, 0)$$

Решение

Из таблицы ТХА: $E(30^\circ\text{C}, 0) = 1,203 \text{ мВ}$.

$$E_{\text{ист}} = 5,5 + 1,203 = 6,703 \text{ мВ}$$

Интерполируя по таблице ТХА ($E(150) = 6,138$; $E(200) = 8,138$):

$$T_{\text{ист}} = 150 + \frac{6,703 - 6,138}{8,138 - 6,138} \times 50 \approx 164 \text{ }^\circ\text{C}$$

Измеренная температура (без поправки): $T_{\text{изм}} \approx 134 \text{ }^\circ\text{C}$.

Погрешность из-за $T_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$ — именно поэтому важно компенсировать температуру холодного спая.

Задача 6

Условие

До какой температуры окружающей среды (холодного спая) термопары **ТПП** можно проводить измерения в диапазоне $100\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ с погрешностью не выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$?

Теория

Погрешность из-за отклонения T_0 от $0 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\delta T = \frac{E(T_0, 0)}{S}$$

где S — чувствительность ТПП в рабочем диапазоне. Для ТПП $S \approx 0,010$ мВ/°С.

Решение

$$\delta T \leq 10 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow E(T_0, 0) \leq 10 \times 0,010 = 0,100 \text{ мВ}$$

По таблице ТПП: $E = 0,100$ мВ соответствует $T_0 \approx 18 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$T_{\text{окр}} \leq 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Задача 7

Условие

Термопару **ТХК** используют в диапазоне 0–600 °С. Найти $E(300, 100)$, $E(0, 100)$, $E(400, 200)$, если градуировка проведена при $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теория

По закону промежуточных температур:

$$E(T_1, T_2) = E(T_1, 0) - E(T_2, 0)$$

Решение

Из таблицы НСХ ТХК:

Вычисление	Формула	Результат
$E(300, 100)$	$22,843 - 6,862$	15,981 мВ
$E(0, 100)$	$0,000 - 6,862$	-6,862 мВ
$E(400, 200)$	$31,492 - 14,560$	16,932 мВ

Вывод: отрицательное значение $E(0, 100)$ означает, что рабочий спай холоднее холодного — термо-ЭДС меняет знак. Это полностью соответствует физике термоэлектрического эффекта.

Задача 8

Условие

Термопара ТХА помещена в среду 50–100 °С. Определить изменение напряжения на выводах милливольтметра с $R_V = 150$ Ом, если $R_{вн} = 15$ Ом, $T_0 = 0$ °С.

Теория

Схема подключения — делитель напряжения. Напряжение на выводах прибора:

$$U = E(T, T_0) \cdot \frac{R_V}{R_V + R_{вн}}$$

Решение

Из таблицы НСХ ТХА (тип К): $E(50^\circ\text{C}) = 2,023$ мВ, $E(100^\circ\text{C}) = 4,096$ мВ.

Коэффициент передачи: $\frac{150}{150+15} = 0,9091$

$$U_1 = 2,023 \times 0,9091 = 1,839 \text{ мВ}$$

$$U_2 = 4,096 \times 0,9091 = 3,724 \text{ мВ}$$

$$\Delta U = 3,724 - 1,839 = 1,885 \text{ мВ}$$

Вывод: напряжение на выводах всегда меньше истинной ЭДС из-за падения на $R_{вн}$ — в данном случае на 9,1%.

Задача 9

Условие

Напряжения на выводах millivoltmeter: 0,8; 1,0; 1,2 мВ при подключении термопары ТПП. $R_{вн} = 25 \text{ Ом}$, $R_V = 200 \text{ Ом}$, $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти температуру среды.

Теория

Истинная ЭДС термопары больше показания прибора:

$$E_{\text{ист}} = U \cdot \frac{R_V + R_{\text{вн}}}{R_V} = U \cdot \frac{225}{200} = U \times 1,125$$

Решение

U, мВ	E_ист, мВ	T по таблице ТПП, °C
0,8	0,900	150
1,0	1,125	183
1,2	1,350	215

Задача 10

Условие

Милливольтметр (шкала 0–10 мВ / 0–100 °C) отградуирован при $R_V = 150 \text{ Ом}$, $R_{вн} = 15 \text{ Ом}$. Найти систематическую погрешность при подключении термопары с $R_{вн} = 10 \text{ Ом}$.

Теория

При градуировке: $U = E \cdot \frac{150}{165}$. При работе: $U = E \cdot \frac{150}{160}$. Прибор «не знает» о смене $R_{вн}$ и показывает завышенную температуру.

Решение

Погрешность ЭДС при полной шкале $E = 10$ мВ:

$$\delta E = E \cdot \left(1 - \frac{R_V + R_{\text{реал}}}{R_V + R_{\text{гр}}}\right) = 10 \times \left(1 - \frac{160}{165}\right) = 0,303 \text{ мВ}$$

В единицах температуры (10 мВ = 100 °С → 10 °С/мВ):

$$\delta T = 0,303 \times 10 = 3,03 \text{ °С} \approx 3\% \text{ от диапазона}$$

Задача 11

Условие

$R_V = 200$ Ом, шкала 0 – 10 мВ / 0 – 100 °С. Сопротивление цепи — градуировочное.
 $T_0 = 20$ °С (вместо 0 °С). Найти систематическую погрешность для ТПП, ТХА, ТХК.

Теория

Погрешность обусловлена ненулевой ЭДС при $T_0 = 20$ °С. Она воспринимается прибором как часть сигнала от объекта:

$$\delta T = E(T_0 = 20^\circ\text{C}, 0) \times \frac{100 \text{ °С}}{10 \text{ мВ}}$$

Ответ

Тип термопары	$E(20^\circ\text{C}, 0)$, мВ	Погрешность δT , °С
ТПП (тип S)	0,113	1,13
ТХА (тип К)	0,798	7,98
ТХК (тип L)	1,386	13,86

ТПП наименее чувствительна к температуре холодного спая — важное практическое преимущество при высокоточных измерениях.

Задача 12

Условие

Сколько термопар ТХА нужно включить последовательно, чтобы ток при $T = 100$ °С был не менее 0,1 мА? $R_V = 200$ Ом, $R_{\text{термопары}} = 5$ Ом, $R_{\text{проводов+контактов}} = 10$ Ом на каждую.

Теория

При n термопарах: суммарная ЭДС = $n \cdot E$, суммарное сопротивление = $R_V + n \cdot R_{\text{одн}}$.

$$I = \frac{n \cdot E}{R_V + n \cdot R_{\text{одн}}} \geq I_{\text{min}}$$

Откуда:

$$n \geq \frac{I_{\text{min}} \cdot R_V}{E - I_{\text{min}} \cdot R_{\text{одн}}}$$

Решение

$E(100^\circ\text{C}) = 4,096$ мВ = 0,004096 В; $R_{\text{одн}} = 5 + 10 = 15$ Ом.

$$n \geq \frac{0,0001 \times 200}{0,004096 - 0,0001 \times 15} = \frac{0,02}{0,002596} = 7,70$$

$n = 8$ термопар

Проверка: $I = \frac{8 \times 0,004096}{200 + 8 \times 15} = \frac{0,03277}{320} = 0,102$ мА ✓

Задача 13

Условие

При $T_{\text{среды}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ милливольтметр ($R_V = 150 \text{ Ом}$, $R_{\text{вн}} = 15 \text{ Ом}$) показывает 25 мВ. Как изменится показание при $T_{\text{среды}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$? Рамка из меди: $\alpha_T = 0,4\%/K$.

Теория

При нагреве среды до $40 \text{ }^\circ\text{C}$ рамка прибора тоже нагревается, R_V увеличивается. ЭДС термопары неизменна (термопара остаётся в той же среде).

Решение

ЭДС термопары: $E = 25 \cdot \frac{165}{150} = 27,5 \text{ мВ}$.

R_V при $40 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R'_V = 150 \times (1 + 0,004 \times 20) = 162 \text{ Ом}$$

Новое показание:

$$U' = 27,5 \times \frac{162}{162 + 15} = 25,17 \text{ мВ}$$

$$\Delta U = +0,17 \text{ мВ}$$

Задача 14

Условие

$E_{\text{ист}} = 10 \text{ мВ}$, $R_V = 150 \text{ Ом}$, $R_{\text{термопары}} = 10 \text{ Ом}$. Найти показание прибора и максимальное сопротивление проводов, чтобы погрешность $\leq 0,5 \text{ мВ}$.

Решение

Показание прибора:

$$U = 10 \times \frac{150}{150 + 10} = 9,375 \text{ мВ}$$

Погрешность: $\delta U = 10 - 9,375 = 0,625 \text{ мВ} > 0,5 \text{ мВ}$ — уже с одной термопарой превышено.

Максимальное сопротивление соединительных проводов (при пренебрежении $R_{\text{термопары}}$):

$$\delta U = E \cdot \frac{R_{\text{пров}}}{R_V + R_{\text{пров}}} \leq 0,5$$

$$R_{\text{пров}} \leq \frac{0,5 \times 150}{10 - 0,5} = \frac{75}{9,5} \approx 7,9 \text{ Ом}$$

Задача 15

Условие

Температура холодных спаев термопары **ТПШ** равна $50 \text{ }^\circ\text{C}$; температура в точках подсоединения милливольтметра — $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить погрешность из-за влияния температуры холодных спаев при использовании **медных** и **термоэлектродных** соединительных проводов. Диапазон измерения: $0\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дано

Величина	Значение
Тип термопары	ТПШ (тип S)
Т холодных спаев термопары $T_{\text{хс}}$	$50 \text{ }^\circ\text{C}$

Т подключения милливольтметра $T_{пр}$	20 °С
Диапазон измерения	0–100 °С

Теория

По закону промежуточных температур для термопары:

$$E(T_1, T_3) = E(T_1, T_2) + E(T_2, T_3)$$

где $E(T_i, T_j)$ — термоЭДС термопары при температурах спаев T_i и T_j .

Т.к. прибор отградуирован при $T_0 = 0$ °С, он предполагает, что измеряемая ЭДС равна:

$$E_{пр} = E(T_{изм}, 0)$$

Средняя чувствительность ТПП (тип S) в диапазоне 0–100 °С:

$$S_{ср} \approx \frac{E(100,0) - E(0,0)}{100 - 0} \approx 10$$

(для платинородиевой термопары типа S порядок 10 мкВ/°С в области низких температур).

Случай 1 — медные соединительные провода

Медь однородна, поэтому участок из меди ЭДС не создаёт (закон однородного провода и промежуточных металлов). Эффективный холодный спай остаётся там, где заканчиваются термоэлектроды, то есть при $T_{хс} = 50$ °С.

Прибор измеряет:

$$E_{изм} = E(T_{изм}, 50)$$

С точки зрения градуировки (относительно 0 °С) эта ЭДС эквивалентна:

$$E(T_{\text{ИЗМ}}, 50) = E(T_{\text{ИЗМ}}, 0) - E(50, 0)$$

То есть прибор «думает», что:

$$E_{\text{ИЗМ}} = E(T_{\text{ПОКАЗ}}, 0)$$

$$E(T_{\text{ПОКАЗ}}, 0) = E(T_{\text{ИЗМ}}, 0) - E(50, 0)$$

Погрешность по ЭДС (постоянная, не зависящая от $T_{\text{ИЗМ}}$):

$$\Delta E = E_{\text{ИЗМ}} - E_{\text{пр}} = (E(T_{\text{ИЗМ}}, 0) - E(50, 0)) - E(T_{\text{ИЗМ}}, 0) = -E(50, 0)$$

В температурных единицах:

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{S_{\text{ср}}} = - \frac{E(50, 0)}{S_{\text{ср}}}$$

При линейном приближении:

$$E(50, 0) \approx S_{\text{ср}} \cdot 50$$

$$\Rightarrow \Delta T \approx - \frac{S_{\text{ср}} \cdot 50}{S_{\text{ср}}} = -50 \text{ °С}$$

То есть во всём диапазоне 0–100 °С прибор будет занижать показания примерно на 50 °С (почти половина диапазона).

Случай 2 — термоэлектродные (компенсационные) провода

Компенсационные провода выполнены из материалов, эквивалентных термоэлектродам, и «переносят» холодный спай к зажимам прибора при $T_{\text{приб}} = 20 \text{ °С}$.

Эффективный холодный спай теперь при 20 °С, поэтому реальная ЭДС цепи:

$$E_{\text{изм}} = E(T_{\text{изм}}, 20)$$

По закону промежуточных температур:

$$E(T_{\text{изм}}, 20) = E(T_{\text{изм}}, 0) - E(20, 0)$$

Прибор «думает», что:

$$E_{\text{изм}} = E(T_{\text{показ}}, 0)$$

$$E(T_{\text{показ}}, 0) = E(T_{\text{изм}}, 0) - E(20, 0)$$

Тогда постоянная погрешность по ЭДС:

$$\Delta E = E_{\text{изм}} - E_{\text{пр}} = (E(T_{\text{изм}}, 0) - E(20, 0)) - E(T_{\text{изм}}, 0) = -E(20, 0)$$

В температурном эквиваленте:

$$\Delta T = - \frac{E(20, 0)}{S_{\text{ср}}}$$

При линейном приближении:

$$E(20, 0) \approx S_{\text{ср}} \cdot 20$$

$$\Rightarrow \Delta T \approx - \frac{S_{\text{ср}} \cdot 20}{S_{\text{ср}}} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

То есть при использовании термоэлектродных (компенсационных) проводов показания во всём диапазоне будут занижены примерно на 20 °С.

Вывод: термоэлектродные провода значительно точнее медных, так как переносят холодный спай ближе к 0 °С. Для устранения остаточной погрешности необходима **термокомпенсация** холодного спая при $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ — например, автоматическая компенсация в приборе.

Распространённые ошибки при использовании термопар: разбор на практических задачах

Термопары — надёжные, недорогие и точные датчики температуры, применяемые в промышленности, энергетике и лабораторных установках. Однако неправильное подключение, монтаж или интерпретация результатов могут привести к погрешностям в десятки градусов. Ниже разобраны девять наиболее распространённых ошибок — с расчётными примерами из практического решебника.

Ошибка 1. Игнорирование температуры холодного спая

Суть проблемы. Термопара генерирует ЭДС, пропорциональную **разности** температур горячего и холодного спаев. Градуировочные таблицы НСХ составлены для $T_0 = 0$ °С. Если холодный спай находится при другой температуре, показания прибора будут заниженными или завышенными.

Расчётный пример (*Задача 5 решебника*): термопара ТХА показывает 5,5 мВ, но холодный спай находится при $T_0 = 30$ °С, а не при 0 °С. Без поправки прибор показывает **134** °С, тогда как истинная температура — **164** °С. Погрешность составляет **30** °С — больше класса точности любого серийного прибора.

Решение: использовать приборы с автоматической компенсацией холодного спая (встроенный термистор или схема компенсации) либо помещать клеммный блок в термостатированный отсек при 0 °С.

Ошибка 2. Применение медных проводов вместо компенсационных

Суть проблемы. Медный провод — однородный металл, он не создаёт ЭДС, но при этом **не переносит** холодный спай к прибору. Спай остаётся там, где заканчиваются термоэлектроды, — и если там не $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, возникает постоянная систематическая погрешность.

Расчётный пример: термопара ТПП, холодные спаи при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, прибор при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тип проводов	Эффективный T_0	Погрешность δT
Медные	$50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$46,3\text{ }^{\circ}\text{C}$
Термоэлектродные	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
С компенсацией	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Разница между медными и компенсационными проводами — почти **$29\text{ }^{\circ}\text{C}$** . Для высокоточной термопары ТПП это катастрофически много.

Решение: всегда применять компенсационные (термоэлектродные) провода того же типа, что и термопара. Разъёмы имеют уникальные размеры под каждый тип — перепутать невозможно.

Ошибка 3. Неправильное сопротивление измерительной цепи

Суть проблемы. Цепь «термопара + провода + прибор» образует делитель напряжения. Прибор откалиброван под конкретное $R_{\text{вн}}$. Если реальное сопротивление отличается — показания смещаются.

Расчётный пример (*Задача 10 решебника*): милливольтметр с $R_{\text{вн}} = 150\text{ Ом}$ откалиброван при $R_{\text{вн}} = 15\text{ Ом}$. При подключении термопары с $R_{\text{вн}} = 10\text{ Ом}$:

$$\delta E = 10 \times \left(1 - \frac{160}{165}\right) = 0,303 \text{ мВ} \Rightarrow \delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Решение: использовать нормирующие усилители или приборы с высоким входным сопротивлением ($>1 \text{ МОм}$), при котором влияние $R_{\text{вн}}$ пренебрежимо мало. Соединительные провода — минимальной длины и сечения.

Ошибка 4. Путаница в типе термопары

Суть проблемы. Если прибор настроен на один тип термопары (например, ТХА), а подключена другая (ТПП) — погрешность будет огромной, так как НСХ у разных типов кардинально отличаются.

Расчётный пример (Задача 4 решебника): измеренная ЭДС = 1,1 мВ при $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Сравнение с таблицами:

- ТХА (тип К): $E(150^\circ\text{C}) = 6,138 \text{ мВ}$ — не совпадает
- ТХК (тип L): $E(150^\circ\text{C}) \approx 10,22 \text{ мВ}$ — не совпадает
- ТПП (тип S): $E(150^\circ\text{C}) \approx 0,900 \text{ мВ}$ — ближайшее

Если бы прибор был настроен на ТХА, показание составило бы около $18 \text{ }^\circ\text{C}$ при реальных $150 \text{ }^\circ\text{C}$ — разница $132 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение: маркировать термопары и разъёмы согласно ГОСТ и цветовой кодировке ИЕС 60584. Разъёмы ТХА (жёлтый), ТХК (зелёный), ТПП (оранжевый) имеют разные размеры.

Ошибка 5. Неправильное место установки и глубина погружения

Суть проблемы. Если термопара установлена слишком близко к источнику тепла, стенке или входу в печь — она измеряет температуру конструкции, а не рабочей

среды. Недостаточная глубина погружения приводит к теплоотводу через корпус датчика.

Практическое правило: глубина погружения — не менее **8–10 диаметров** защитной трубки. Для зондов малого диаметра — не менее 5 диаметров с плотным контактом со стенкой. Холодный конец термопары должен находиться **не ближе 100 мм** к зоне нагрева.

Ошибка 6. Неправильная полярность подключения

Суть проблемы. Термопара — полярный источник ЭДС. При перепутывании полярности прибор показывает отрицательные значения или температуру ниже T_0 .

Признак ошибки: показания на дисплее стремятся к минусу или ведут себя «зеркально» — при нагреве температура падает. В (*Задача 7 решебника*) это наглядно видно: $E(0, 100) = -6,862 \text{ мВ}$ означает, что рабочий спай холоднее холодного — ЭДС меняет знак.

Решение: соблюдать полярность согласно маркировке на корпусе разъёма. Положительный электрод у ТХА — хромель (цвет: жёлтый), у ТПП — платина-родий.

Ошибка 7. Электромагнитные помехи

Суть проблемы. Сигнал термопары — единицы и десятки милливольт. В условиях промышленного объекта (частотные преобразователи, силовые кабели, сварочные аппараты) наводки могут быть соизмеримы с измеряемой ЭДС.

Расчётный пример (*Задача 14 решебника*): максимально допустимое сопротивление проводов для ограничения погрешности $\leq 0,5 \text{ мВ}$ при $E = 10 \text{ мВ}$ составляет всего **$R_{\text{пров}} \leq 7,9 \text{ Ом}$** . При длинных незаэкранированных линиях добиться этого сложно.

Решение: экранированные компенсационные провода, прокладка в отдельных металлических каналах, скрутка витых пар, подключение экрана к земле прибора с одной стороны.

Ошибка 8. Отсутствие поверки и учёта нелинейности НСХ

Суть проблемы. НСХ термопар нелинейна — чувствительность меняется с температурой. При линейной интерполяции между редкими точками таблицы возникает погрешность аппроксимации.

Расчётный пример (Задача 3 решебника): чувствительность ТХК в диапазоне 0–100 °С составляет **68,6 мкВ/°С**, а в диапазоне 200–300 °С — уже **82,8 мкВ/°С**.

Если использовать одну среднюю константу, погрешность на краях диапазона достигает 2–4 °С.

Решение: использовать интерполяцию по ГОСТ Р 8.585-2001 с шагом 10 °С, а не 100 °С. Современные приборы хранят в памяти полный полином НСХ.

Ошибка 9. Несоответствие класса точности прибора задаче

Суть проблемы. Технический термометр класса 1 допускает погрешность 1% от диапазона — и этого часто не замечают при выборе.

Расчётный пример (Задача 1 решебника): термометр класса 1 со шкалой 0–100 °С при реальной температуре 50 °С показывает 52 °С. Допустимая погрешность — ± 1 °С, фактическая — **2 °С**. Прибор **не соответствует** заявленному классу и подлежит замене.

Решение: регулярная поверка приборов согласно межповерочному интервалу (обычно 1–2 года). Для ответственных применений — термопары класса 1 (ТПП, ТХА) с лабораторной поверкой.

Ошибка	Типичная погрешность	Решение
Нет компенсации холодного спада	10–50 °С	Схема компенсации или термостат
Медные вместо компенсационных проводов	5–50 °С	Термоэлектродные провода того же типа
Несоответствие $R_{вн}$	1–5 °С	Прибор с высоким $R_{вх}$
Неправильный тип термопары	50–200 °С	Маркировка, цветовой код
Малая глубина погружения	5–30 °С	Погружение ≥ 8 –10 диаметров
Перепутана полярность	Знак показания	Соблюдать маркировку
ЭМП-помехи	1–20 °С	Экранирование, разделение кабелей
Линейная интерполяция НСХ	0,5–4 °С	Таблицы с шагом 10 °С
Просроченная поверка	1–10 °С	Регулярная поверка

Главный вывод: большинство ошибок при работе с термопарами — не конструктивные дефекты, а нарушение правил монтажа и эксплуатации. Понимание физических основ термоэлектрического эффекта, разбираемых в задачах решебника, позволяет заранее предвидеть и устранить источники погрешностей ещё на этапе проектирования системы измерения.

Школа для электрика: <https://electricalschool.info/>

Канал в Telegram: <https://t.me/electricalschool>