

# Термопара - термоэлектрический преобразователь.

## Теория, устройство, характеристики, принцип работы термопар.

**Термоэлектрические преобразователи - термопары**, как и термопреобразователи сопротивления, являются наиболее распространенными средствами измерения температуры.

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой **термопарой** от температуры ее рабочего конца. ТермоЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников (электродов) А и В (рис. 1, а), если значения температуры мест соединения  $t$  и  $t_0$  не равны (при равенстве температур термоЭДС равна нулю). Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Первый связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, причем величина ЭДС зависит от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах. Развиваемая термоЭДС зависит от значения обеих температур  $t$  и  $t_0$ , причем она увеличивается с ростом разности  $(t - t_0)$ . В силу этого термоЭДС термопары условно обозначается символом  $E(t, t_0)$ .

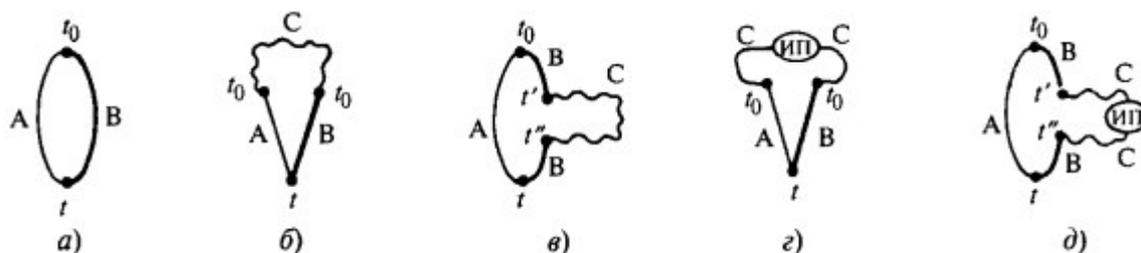


Рис. 1. Цепи термопар:

**а** — соединение двух проводников; **б, в** — варианты включения третьего проводника; **г, д** варианты включения измерительного прибора ИП

Очевидно, что **температуру с помощью термопары можно измерить**, если выполнить следующие условия:

- рабочий конец термопары поместить в контролируемую среду, а температуру другого спая (свободных концов) стабилизировать;
- измерить термоЭДС, развиваемую термопарой;
- иметь градуировочную характеристику  $E(t, t_0)$  термопары — зависимость термоЭДС от температуры рабочего конца (т.е. измеряемой температуры) при определенном значении  $t_0$ .

Для понимания дальнейшего материала обратимся к «теореме о третьем проводнике». Суть ее (без доказательства) следующая: включение в цепь термопары третьего проводника из любого материала «С» (на всех схемах он изображен волнистой линией) не вызывает искажения термоЭДС, если температуры мест присоединения этого проводника одинаковы. Поэтому термоЭДС, развиваемые в схемах (рис. 1, б, в), будут одинаковыми, если только будут равны между собой температуры  $t'$  и  $t''$ , т.е. при соблюдении условия  $t' = t''$ . На основании изложенного можно представить два способа включения измерительного прибора (ИП) в цепь термопары: в разрыв свободных концов (рис. 1, г) или в разрыв электрода (рис. 1, д). Два любых разнородных проводника могут образовать термопару, но не любая термопара может использоваться для практических температурных измерений. К

материалам для термопар (термоэлектродным материалам) предъявляется ряд требований: жаропрочность, химическая стабильность, воспроизводимость материалов (для обеспечения взаимозаменяемости термопар), заключающаяся в одинаковой зависимости термоЭДС термопары от температуры. Теперь обратимся к терминологии. **Термопара** — это соединение двух разнородных проводников — электродов. Для практического использования термопары ее электроды должны быть изолированы и помещены в защитную арматуру. Такая конструкция называется термоэлектрическим преобразователем. По определению «**термоэлектрический преобразователь**» (ТЭП) — это термопреобразователь, действие которого основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры.

**Термопара** является основным элементом средств измерения температуры — термоэлектрических преобразователей (ТЭП). В соответствии с ГОСТ Р50431-92 в табл. 1 приведены пределы длительного (кратковременного) применения для различных термопар ТЭП, имеющих следующие обозначения:

**ТВР (А)** — вольфрамений-вольфрамениевые;

**ТПР (В)** — платинородий-платинородиевые;

**ТПП (S, R)** — платинородий платиновые;

**ТХА (К)** — хромель-алюмелевые;

**ТХК (L)** — хромель-копелевые;

**ТХК (Е)** — хромель-константановые;

**ТНН (N)** — никросил-нисилловые;

**ТМК (Т)** — медь-константановые;

**ТЖК (J)** — железо-константановые.

**Таблица 1. Стандартные термоэлектрические преобразователи - термопары**

Подгруппа ТЭП (термопары)	Условное обозначение НСХ	Диапазон длительного (кратковременного) применения, °С	Коэффициент преобразования мВ/°С * 10 <sup>3</sup>
<b>ТВР</b>	ВР(А)-1 (А-1)	0...2200 (2500)	12,1...9,2
	ВР(А)-2 (А-2)	0...1800 (2500)	11,8...11,4
	ВР(А)-3 (А-3)	0...1800 (2500)	11,9...11,3
<b>ТПР</b>	ПР(В)	300...1600 (1800)	3,1...5,9
<b>ТПП</b>	ПП(S)	0...1300 (1600)	5,5...12,1
	ПП(R)	0...1300 (1600)	5,4...14,1
<b>ТХА</b>	ХА(К)	-200...1000 (1300)	16,1...39,0
<b>ТХК</b>	ХК (L)	-200...600 (800)	28,5...87,8
	ХК (Е)	-200...700 (900)	26,3...79,8
<b>ТНН</b>	НН(N)	-270...1300(1300)	0,9...36,2
<b>ТМК</b>	МК(Т)	-200...700 (900)	16,4...61,7
<b>ТЖК</b>	ЖК (J)	-200...700 (900)	23,1...62,0

Зависимость развиваемой термопреобразователем термоЭДС от температуры рабочего спая  $t$  при нулевой температуре свободных концов  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  (т.е.  $E(t,0) = f(t)$ ) называется **номинальной статической характеристикой преобразования (НСХ)**. Она задается в виде таблиц (градуировочных) или формул и обозначается условным символом в русском и международном обозначении. В соответствии с **ГОСТ Р50431-92** в настоящее время для обозначения НСХ должны использоваться только латинские буквы (приведены в скобках). В обозначениях преобразователей первым указывается положительный электрод (например, у преобразователя термопары ТХК положительный электрод — хромелевый, отрицательный — копелевый). На условных графических изображениях положительный электрод обозначается тонкой линией, отрицательный — толстой. При небольших диаметрах электродов верхний предел измерения может быть уменьшен. Термопреобразователь (термопара) ТПП (В) не развивает термоЭДС, если температура рабочего спая не превышает  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  (при температуре свободных концов  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Зависимости термоЭДС от температуры для термопар нелинейны, поэтому в пределах диапазона применения изменяется их коэффициент преобразования (чувствительность). В табл. 1 приведены округленные значения чувствительности в начале и конце диапазона применения. Существуют другие разновидности термопреобразователей, статические характеристики которых могут быть не стандартизованы: например, сплав молибдена с рением МР 5/20, термопары на основе неметаллических материалов — графита и тугоплавких соединений (карбидов, нитридов и т.п.). В табл. 2 и на рис. 2, а приведены статические характеристики термопар ХА, ХК, ПП. Из графиков видно, что наибольшую термоЭДС развивает термопара ХК, наименьшую (из этих трех) термопара ПП. Поэтому при невысоких температурах целесообразнее использовать термопреобразователи типа ТХК.

Таблица 2. **Номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей (термопар)**

$t \text{ }^\circ\text{C}$	ТЭП, E, мВ			$t \text{ }^\circ\text{C}$	ТЭП, E, мВ		
	ПП(S)	ХА (К)	ХК(L)		ПП(S)	ХА (К)	ХК(L)
-240	-	-6,344	-	650	5,751	27,022	53,484
-200	-	-5,892	-9,488	700	6,274	29,128	57,856
-160	-	-5,141	-8,207	750	6,805	31,214	62,200
-120	-	-4,138	-6,575	800	7,345	31,277	66,469
-80	-	-2,92	-4,431	850	7,892	35,314	-
-40	-	-1,527	-2,500	900	8,448	37,325	-
0	0,000	0,000	0,000	950	9,012	39,310	-
50	0,299	2,022	3,306	1000	9,585	41,269	-
100	0,645	4,095	6,860	1050	10,165	43,202	-
150	1,029	6,137	10,621	1100	10,754	45,108	-
200	1,440	8,137	14,557	1150	11,348	46,985	-
250	1,873	10,151	18,639	1200	11,947	48,828	-
300	2,323	12,207	22,839	1250	12,550	50,633	-
350	2,786	14,292	27,132	1300	13,155	52,398	-
400	3,260	16,395	31,488	1400	14,368	-	-
450	3,743	18,513	35,882	1500	15,576	-	-
500	4,234	20,640	40,292	1600	16,771	-	-
550	4,732	22,772	44,700	1700	17,942	-	-
600	5,237	24,902	49,098	-	-	-	-

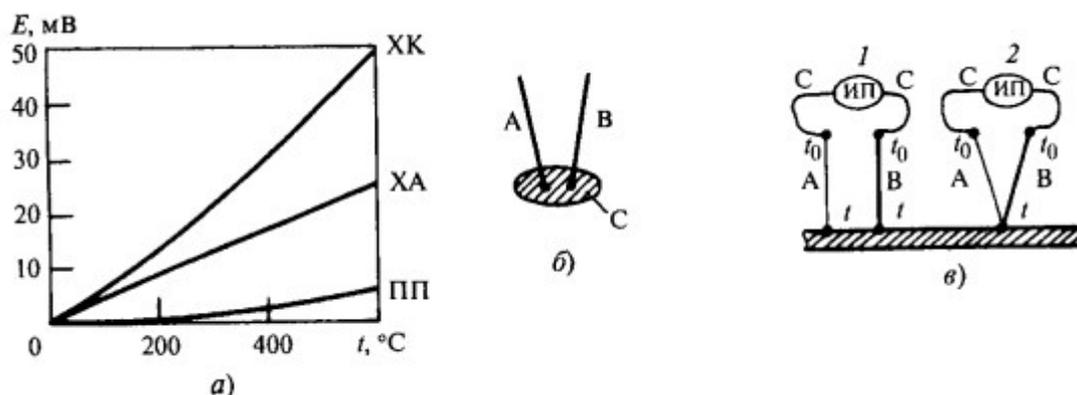


Рис. 2. Номинальные статические характеристики преобразователей (я), схема изготовления рабочего спая (б) и способы измерения температуры пластины (в)

Наиболее линейная характеристика у термопар ХА. Наиболее точной из этих трех является термопара ПП. Отклонение реальной градуировочной характеристики от номинальной определяются классом термоэлектрических преобразователей (термопар). Классы обозначаются цифрами 1, 2, 3 (в порядке увеличения погрешности), причем внутри класса погрешность может зависеть от измеряемой температуры (табл. 3). Коэффициентом преобразования (чувствительностью) термопары называется отношение изменения термоЭДС, вызванной изменением температуры рабочего конца к значению этого изменения  $S = \Delta E / \Delta t$  (мВ/град) при небольших значениях  $\Delta t$ . Для получения численных значений измеряемой температуры к термопреобразователю необходимо подключить показывающий прибор, измеряющий термоЭДС термопары (вторичный прибор), шкала которого должна быть в градусах. Такое соединение называется термоэлектрическим термометром. В дальнейшем будут использоваться все эти термины. Чтобы температурная шкала вторичного прибора была равномерной, желательно, чтобы коэффициент преобразования термопары (преобразователя)  $S$  не зависел бы от измеряемой температуры  $t$  в пределах диапазона измерения, в противном случае возникает необходимость в применении линеаризации. При оценке зависимости  $S = f(t)$  температурный интервал  $\Delta t$  в выражении  $S = \Delta E / \Delta t$  следует брать возможно малым — теоретически нужно использовать производную  $S = dE/dt$ . Вернемся к «теореме о третьем проводнике» — включение в цепь термопары «АВ» третьего проводника «С» из любого материала не вызовет искажений термоЭДС, если температуры мест присоединения этого проводника одинаковы. Из этой теоремы вытекает ряд важных практических положений. Рабочий спай термопары может быть образован сваркой любым материалом, если только температура во всех точках сварного слоя будет одинаковой (рис. 2, б).

Таблица 3. Пределы допускаемых отклонений для температуры  $t$

Подгруппа ТП термопар	Класс точности	Диапазон измеряемых температур, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t$ , °С
ТМК(Т)	3	-200...-66	0,015* t
		-66...40	1,0
		-40... 135	1,0
	1	135...400	0,0075* t
		-40. .125	0,5
		125...350	0,004* t

<b>BP(A)</b>	3	1000...2550	0,007* t
	2	1000...2550	0,005* t
<b>ТПР(B)</b>	3	600... 800	4,0
	2	800...1800	0,005* t
		600... 1800	0,0025* t
<b>ТПП(S,R)</b>	2	0...600	1,5
		600... 1600	0,0025* t
	1	0...1100	1,0
		1100...1600	1,0 + 0,003(t - 1100)
<b>ТХА(K)</b> <b>ТНН(H)</b>	3	-250...-166,7	0,015* t
		-166,7...40	2,5
		-40...333,4	2,5
	2	333,4...1350	0,0075* t
	1	-40...375	0,5
		375...1350	0,004* t
<b>ТХК(L)</b>	3	-200...-100	0,015* t
		-100... 100	2,5
		-40... 300	2,5
	2	300...800	0,7 + 0,005* t
<b>ТХК(E)</b>	3	-200...-166,7	0,015* t
		-166,7...-40	2,5
		-40...333,4	2,5
	2	333,4...900	0,0075* t
		-40...375	1,5
	1	375...800	0,004* t
<b>ТЖК(J)</b>	2	-40...333,4	2,5
		333,4...900	0,0075* t
	1	-40...375	1,5
		375...750	0,004* t
<b>ТХАУ 4...20 мА</b>		0...1000	0,5; 1 % (приведенная)
<b>Метран 281 выход 4...20 мА, HART протокол</b>		0...1000	0,75 % по аналоговому сигналу 0,5 % по цифровому (приведенные)

Теорема о третьем проводнике имеет ряд практических выводов (рис. 2, в). Температуру массивного металлического бруска можно измерить по схеме 1 — прикрепив к металлу каждый электрод в отдельности, если температура во всех точках поверхности бруска одинакова, или по схеме 2 — прикрепив к металлу рабочий спай термопары. ТермоЭДС термопары  $E(t, t_0)$  зависит от температуры рабочего  $t$  и свободных  $t_0$  концов термопреобразователя. Поэтому, чтобы отградуировать шкалу вторичного прибора в единицах температуры, необходимо задаться каким-то определенным значением  $t_0$ . Например, для милливольтметров задаются расчетным значением  $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , для милливольтметров  $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ . Номинальные статические характеристики задаются при  $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому в дальнейшем примем в качестве исходной  $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ . Что делать, если реальное значение  $t_0$  отличается от нуля? Предположим  $t_0 > 0\text{ }^\circ\text{C}$ . Существует общая формула учета зависимости термоЭДС от значения  $t_0$ :

$E(t, t_0) = E(t, 0) - E(t_0, 0)$ , т.е. при  $t_0 > 0\text{ }^\circ\text{C}$  термоЭДС термопары уменьшается на значение, равное значению термоЭДС, которое развивает термопара при температуре рабочих концов  $t_0$  и температуре свободных концов  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом, если при известном значении  $t_0$ , известна (например, измеряется прибором) развиваемая термопарой термоЭДС  $E(t, t_0)$ , то порядок использования номинальной статической характеристики для определения значения  $t$  следующий (рис. 3, а):

- находится значение  $E(t_0, 0)$  (по нижней штриховой линии);
- прибавить к  $E(t_0, 0)$  измеренное значение  $E(t, t_0)$ ;
- суммарная ордината соответствует  $E(t, 0)$ ,

по которой можно определить  $t$  (верхняя штриховая линия). Каким образом практически вводится поправка на отличие температуры свободных концов от нуля? Если значение  $t_0$  постоянно, то такую поправку можно ввести простым смещением указателя вторичного прибора. Но в реальных условиях ( $0$  — это температура концов термопары, находящихся вне контролируемого объекта, при температуре окружающей среды, которая изменяется. В таком случае поправка вводится автоматическим устройством, выполненным либо в виде отдельного блока, либо встроенным в измерительную схему прибора. Чтобы измерять температуры свободных концов автоматические компенсаторы содержат термочувствительный элемент, температура которого равна  $t_0$ . Для обеспечения этого компенсатор располагается рядом со свободными концами термопреобразователя. Теперь представим ситуацию: температура в трубе измеряется термопреобразователем длиной 1 м (т.е. длина электродов термопары 1 м), причем головка термопреобразователя (и концы электродов термопары) имеет температуру  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . Компенсатор встроен во вторичный прибор, где температура  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . В данном случае компенсатор вырабатывает напряжение  $U = E(20)$  (поскольку его термочувствительный элемент имеет температуру  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), а поправку нужно вводить на  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. иметь  $U = E(60)$ . Что делать? В этом случае термопреобразователь необходимо подключать к компенсатору специальными проводами, называемыми термоэлектродными удлиняющими проводами (ТЭ-проводами). По своим свойствам ТЭ-провода должны быть термоидентичными удлиняемым электродам, т.е. каждый электрод должен удлиняться своим проводом.

Таким образом, подключение к термоэлектрическому преобразователю (термопаре) удлиняющих проводов аналогично удлинению электродов, т.е. концы ТЭ-проводов становятся свободными, и их температура — той температурой  $t_0$  свободных концов, которая определяет действующую в цепи ЭДС  $E(t, t_0)$ . Если к электродам подключены два одинаковых монтажных провода, то температурой свободных концов будет температура концов электродов термопары. Например, если на участке I (рис. 3, б) проложить удлиняющие провода, то температура свободных концов будет равной  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , если на участке I будут проложены два одинаковых монтажных провода, то температура свободных концов будет равной  $30\text{ }^\circ\text{C}$ .

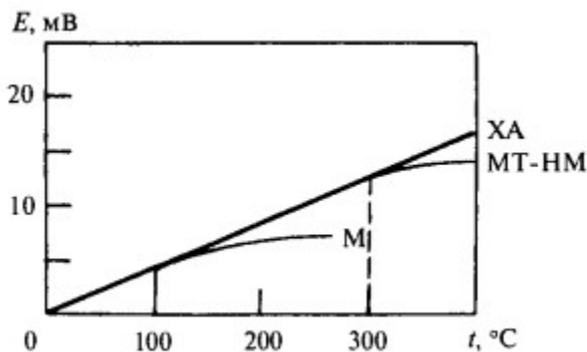


Рис. 3. График введения поправки на изменение температуры свободных концов (а) и схемы цепи термопары (б)

Но что означает идентичность? Все ясно, если, например, у преобразователя ТХК хромелевый электрод удлинить проводом из хромеля, а копелевый — проводом из копеля. В этом случае по сути тем же материалом наращиваются электроды, т.е. удлиняется термопара. Но возможен и другой подход, в соответствии с которым: пара проводов может быть использована для удлинения термопары, если в паре между собой они имеют такую же градуировочную характеристику, что и удлиняемая термопара (в диапазоне возможного изменения температуры мест соединения). На рис. 4 изображена номинальная статическая (градуировочная) характеристика термопары XA и аналогичные характеристики двух других термопар. Одна из них медь - константан (М) и другая — (MT-НМ) составлена из электродов «медь + титан» — «никель + медь». У первой из них градуировочная характеристика совпадает с характеристикой термопары XA в диапазоне (0...100) °С, а затем они расходятся. В соответствии с правилом пара проводов «медь + константан» (условное обозначение М) может быть использована в качестве удлиняющих для термопары XA, если температура мест соединения не будет превышать 100 °С. При этом медным проводом удлиняется хромелевый электрод, а константановым — алюмелевый. Пара проводов MT-НМ также используется в качестве удлиняющих, но температурный диапазон (температура мест присоединения) применения расширяется до 300 °С.

**При использовании удлиняющих проводов очень важно соблюдать правило подключения (полярность подключения).** Например, нельзя хромелевый электрод удлинять константановым, а алюмелевый медным.

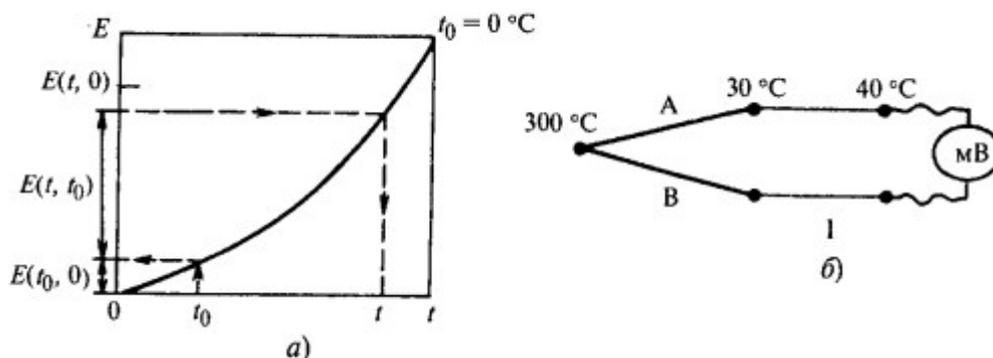


Рис. 4. Характеристики термоэлектродных удлиняющих проводов

Из-за неполного совпадения градуировочных характеристик термопары и удлиняющих ее проводов возникает дополнительная погрешность (табл. 4). Эту погрешность следует учитывать при оценке общей погрешности измерения температуры.?

Таблица 4. Характеристика удлиняющих проводов

НСХ ТЭП	Наименование пары жил	Обозначение	Максимальная рабочая температура, °С	Погрешность °С
ХА(К)	медь-константан	М	100	5,5
ХА(К)	медь -титан/ медь- никель	МТ-НМ	300	4,9
ХК(L)	хромель/копель	ХК	100	3,3
ПП(R)	медь/сплав ТП	П	100	2,4
МК(M)	медь/копель	МК	100	3,3
ВР(A)	медь/медь-никель	М-МН	100	4,2

Примечание. Термопреобразователи ПР применяются без удлиняющих проводов.

Необходимость применения удлиняющих проводов отпадает при использовании термопар со встроенным в головку нормирующим преобразователем, в котором вводится поправка на изменение температуры свободных концов термопары и создается на выходе унифицированный токовый или цифровой сигналы. К таким преобразователям относятся ТХАУ, Метран 281 (интеллектуальный), в последнем используется термопара ТХА. Характеристики этих термопреобразователей приведены в табл. 3. С преобразователями температуры SITRANS T работают и термоэлектрические преобразователи. Компенсация влияния температуры свободных концов может быть с внутренним сенсором Pt100 и внешняя. Допускается подключение двух термопар для вычисления разности температур или с целью резервирования. При использовании различных термопар измерения производятся в диапазоне температур от -200 до 2300 °С с погрешностью  $\pm(1...3)$  °С.