

Физическая аппаратура

УДК 621.315.5:537.32

Выбор материалов для терморных контроллеров температуры и радиации

А. Б. Опаричев, М. А. Каримбеков

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Е. Б. Опаричев

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

В. Н. Вигдорович

Институт химических проблем микроэлектроники, Москва, Россия

Предложены модельные представления для графоаналитического выбора материалов термоэлектрических преобразователей измерительного назначения в согласии с параметрами электроизмерительной системы по точности (чувствительности) и/или обнаружительной способности и по токометрическому или потенциометрическому способу измерения выходного сигнала термоэлектрического преобразователя.

Выбор материалов для термоэлектрических преобразователей измерительного назначения

Эффективность материалов для измерительных термоэлектрических преобразователей (ТЭП) зависит от метода измерения сигнала и параметров электроизмерительного прибора (ЭИП).

Рассмотрим термоэлектрическую измерительную систему (ТЭИС), которая состоит из датчика-преобразователя, включающего ТЭП, и из ЭИП, предназначенного для измерения некоторой величины X .

Пусть ТЭП характеризуется следующими параметрами:

K_{TX} — коэффициентом преобразования входной величины (отношение изменения температуры T рабочих спаев ТЭП к вызвавшему его изменению входной величины X);

K_{VT} — коэффициентом преобразования температуры (отношение изменения термоЭДС V к изменению температуры T рабочих спаев ТЭП) и электросопротивлением R_T .

Важными параметрами для измерения ЭИП являются:

K_{YI} — коэффициент преобразования тока (отношение изменения состояния Y индикатора к изменению величины электрического тока I) или K_{YV} — коэффициент преобразования разности потенциалов на входном резисторе (отношение изменения состояния индикатора Y к изменению разности потенциалов V);

градация индикатора ΔY_{\min} (наименьшее обнаруживаемое визуально смещение стрелки относи-

тельно шкалы или дискретность последовательно-го разряда цифрового индикатора показаний);

R_d — входное электросопротивление.

Примем, что основным видом "шумов" в ТЭИС являются тепловые [1], среднее квадратичное значение ЭДС которых определяется формулой Найквиста для резистивных элементов

$$Y_{nois} = \sqrt{4 k T_{mid} R \Delta f},$$

где k — постоянная Больцмана;

T_{mid} — средняя абсолютная температура;

R — полное электросопротивление;

Δf — интервал частот пропускания ТЭИС.

Для обнаруживания изменения входной величины на ΔX с помощью ТЭИС необходимо, чтобы состояние индикатора изменилось на величину ΔY , большую его градации

$$\Delta Y \geq \Delta Y_{\min}. \quad (1)$$

Очевидно, что измерение величины X будет тем более надежным, чем больше соотношение между изменением состояния индикатора ΔY , вызванным действительным изменением сигнала, и изменением состояния ("мерцанием") индикатора ΔY_{\min} , происходящим из-за шумов в системе,

$$\frac{\Delta Y}{\Delta Y_{nois}} \geq m_0, \quad (2)$$

где величина m_0 задается исходя из требуемой надежности измерения.

При измерении выходного сигнала ТЭП по величине электрического тока в цепи ЭИП и ТЭП соединяются последовательно. При этом амплитуда изменения состояния индикатора за счет шумового тока может быть равна

$$\Delta Y_{nois} = 2K_{YI} \sqrt{\frac{k T_{mid} \Delta f}{R_T + R_d}},$$

в то же время изменение состояния индикатора за счет изменения входной величины на ΔX составит

$$\Delta Y = \frac{K_{YI} K_{VT} K_{TX} \Delta X}{R_T + R_d}.$$

Условия (1) и (2) в этом случае будут иметь вид

$$\frac{K_{YI} K_{VT} K_{TX} \Delta X}{R_T + R_d} \geq \Delta Y_{min} \quad (3)$$

и

$$\frac{K_{VT} K_{TX} \Delta X}{2 \sqrt{k T_{mid} \Delta f} \sqrt{R_T + R_d}} \geq m_0. \quad (4)$$

Совокупность значений K_{VT} и R_T для ТЭП, удовлетворяющую этим двум условиям, удобно и полезно определить на диаграмме $K_{VT}-R_T$ (рис. 1, а) с графиками их предельных зависимостей, определяемых выражениями (3) и (4) (при знаке равенства)

$$K_{VT}^* = \frac{\Delta Y_{min}}{K_{YI} K_{TX} \Delta X} (R_T + R_d) \quad (5)$$

и

$$K_{VT}^{**} = \frac{2 m_0}{K_{TX} \Delta X} \sqrt{k T_{mid} \Delta f (R_T + R_d)}.$$

Графики зависимостей $K_{VT}^*(R_T)$ и $K_{VT}^{**}(R_T)$ делят диаграмму $K_{VT}-R_T$ на области (см. рис. 1, а): I — область достаточной чувствительности и достаточной обнаружительной способности; II — область недостаточной способности; III — область недостаточной чувствительности; IV — область недостаточной чувствительности и недостаточной обнаружительной способности.

Видно, что способность системы к измерению входной величины с заданной точностью ограничивается при $R_T \leq R_T^*$,

где
$$R_T^* = \frac{4 m_0^2 k T_{mid} \Delta f K_{YI}^2}{\Delta Y_{min}^2} - R_d,$$

шумами системы (маловероятный случай), а при $R_T > R_T^*$ — недостаточной чувствительностью прибора (более реальный случай).

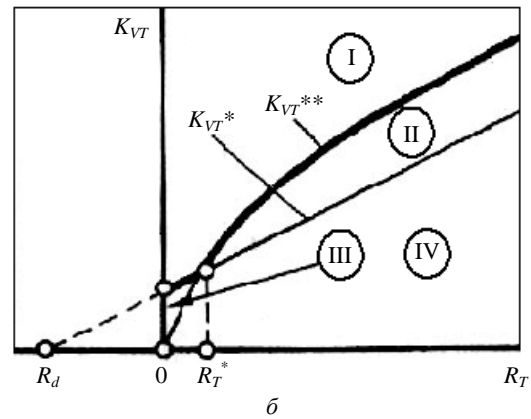
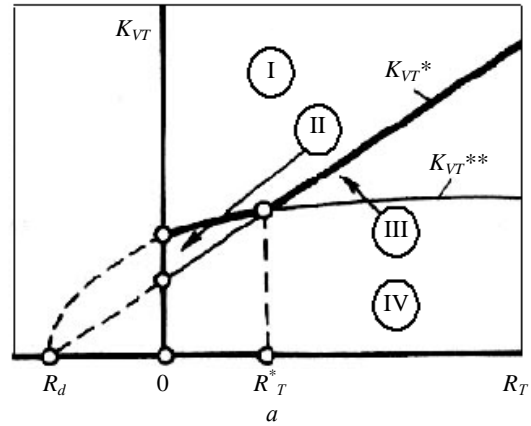


Рис. 1. Схемы диаграмм $K_{VT}-R_T$ для выбора материалов термоэлектрических преобразователей измерительных систем при использовании: а — токометрического и б — потенциометрического методов

Используя диаграмму $K_{VT}-R_T$, можно оценить пригодность существующих ТЭИС для проведения тех или иных измерений, провести сравнение различных систем по метеорологическим возможностям, определить графическим методом некоторые важные параметры ТЭП проектируемых ТЭИС. Очевидно, что пригодным для измерения входной величины с заданной точностью будут ТЭИС, точка параметров ТЭП которых лежит выше пороговой линии, а предпочтительной из сравниваемых является такая ТЭИС, точка параметров ТЭП которой имеет максимальное относительное превышение над пороговой линией.

На рис. 2, а—в для примера приведены диаграммы $K_{VT}-R_T$ для некоторых реальных термоэлектрических измерительных систем. Фигуративные точки соответствуют пленочным термопарам и соответствующим типичным для них значениям коэффициента термоЭДС α_T и электросопротивления r_T при длине ветвей 1 см и ширине ветвей 1 мм (т. е. длиной в десять квадратов при толщине ветвей 1 мкм) (таблица).

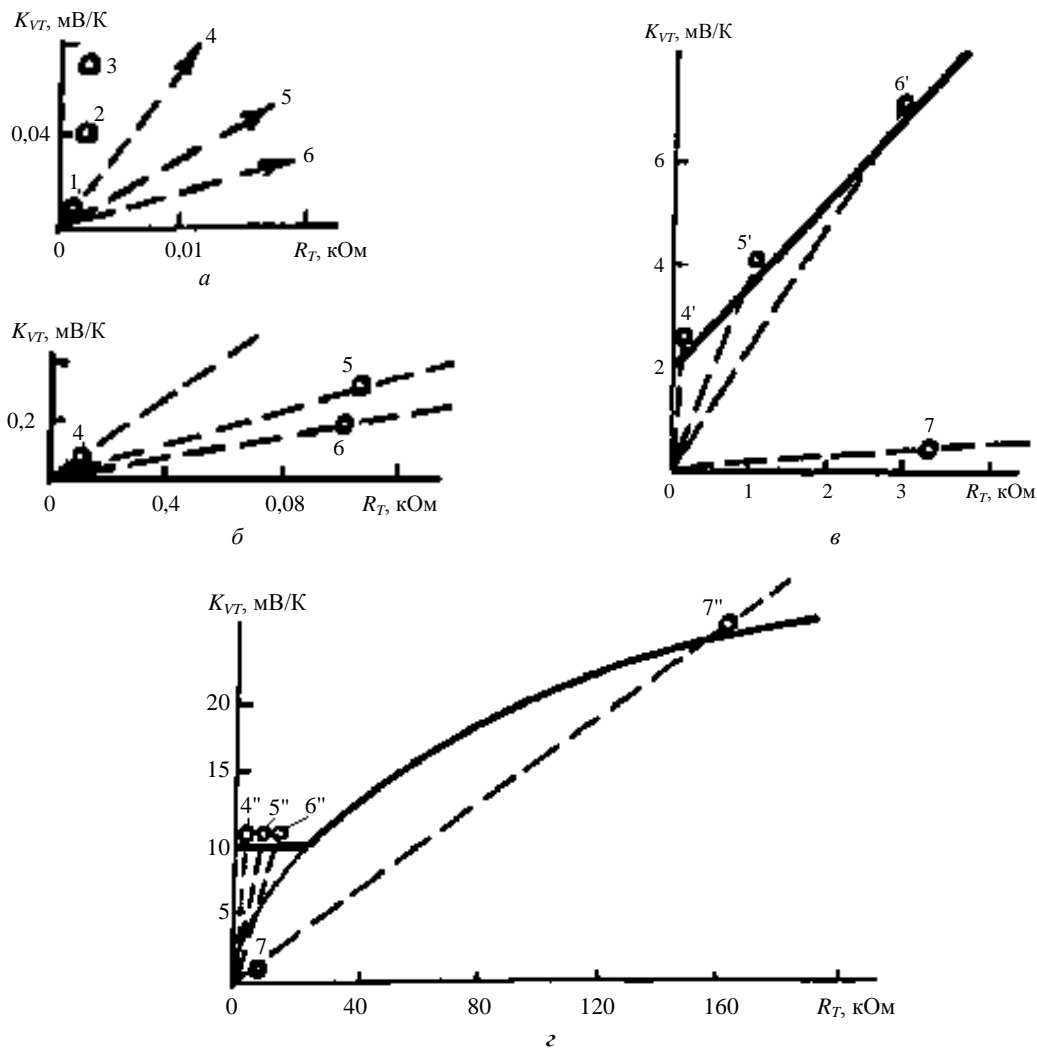


Рис. 2. Диаграммы $K_{VT}-R_T$ для термоэлектрическую измерительных систем с современными приборами: а-в — токометрическим, г — потенциометрическим (см. табл. 1).

Фигуративные точки 1—7 соответствуют термопарам: 1 — ППР; 2 — ХА; 3 — ХК; 4 — Sb—Bi; 5 — $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3-Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$; 6 — Sb—PbTe; 7 — Te—Bi;

Фигуративные точки 4'—6' соответствуют термопарам: 4' — Sb—Bi; 5' — $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3-Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$; 6' — Sb—PbTe с числом термопар 25, 10 и 24, соответственно;

Фигуративные точки 4''—7'' соответствуют термопарам: 4'' — Sb—Bi; 5'' — $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3-Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$; 6'' — Sb—PbTe и 7'' — Te—Bi с числом термопар 100, 25, 36 и 52, соответственно

Иллюстрация применения предложенного графоаналитического определения принципиальной и практической применимости термоэлектрических материалов для измерительного назначения на восьми термопарах и двух системах измерения (см. рис. 2, а—г)

Термоэлектрическая пара	ППР	ХА	ХК	Sb—Bi	$Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3-Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$	Sb—PbTe	Te—Bi	Ge(p)—Ge(n)
Токометрическая система ($m_0 = 10$) ($\Delta T = 0,1$ К; $\Delta Y_{min}/K_{VT} = 1$ мкА; $R_d = 1$ кОм; $\Delta f = 1$ Гц) [2]								
Комментарий к одиночной термопаре. Фигуративная точка (рис. 2, а—в)	Непригодны							
Необходимое число термопар. Фигуративная точка (рис. 2, в)	1	2	3	4	5	6	7	—
	500	95	45	25	10	24	Непригодны*	
	—	—	—	4'	5'	6'		
Потенциометрическая система ($m_0 = 10$) ($\Delta T = 0,001$ К; $\Delta Y_{min}/K_{VT} = 1$ мкВ; $R_d = 10$ МОм и $\Delta f = 25$ Гц) [2]								
Комментарий к одиночной термопаре. Фигуративная точка (рис. 2, г)	—	—	—	—	—	—	Непригодна**	—
Необходимое число термопар. Фигуративная точка (рис. 2, г)	—	25	15	100	25	36	52	2
	—	—	—	4''	5''	6''	7''	—

* Не пригодна при любом числе термопар.

** Несмотря на большую термоЭДС термопары Te—Bi, она непригодна в виде одиночной термопары и в виде термопар из 52 термопар для $\Delta T = 0,001$ К при $m_0 = 10$.

Рассмотрим измерение температуры с точностью $\Delta T = 0,1$ К при $m_0 = 10$, при характерных для современных токометрических приборов магнитоэлектрического типа со стрелочной индикацией и параметрах: $\Delta Y_{\min} = 0,2$ мм, $K_{YI} = 1$ мм/мкА, $R_d = 1$ кОм и $\Delta f = 1$ Гц [2] (см. рис. 2, а—в).

Можно видеть, что измерение температуры с указанной точностью не может быть выполнено при использовании одиночных термопар, однако оно принципиально может быть осуществлено при применении многоэлементных ТЭП, составленных из термопар, для которых

$$\frac{\alpha_T}{r_T} \geq A^*, \quad (6)$$

где A^* — угловой коэффициент графика зависимости (5), в общем случае равный

$$A^* = \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YI} K_{TX} \Delta X},$$

или для данного примера, учитывая, что $\Delta T = \Delta X$ и $K_{TX} = K_{TT} = 1$, равный

$$A^* = \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YI} \Delta T}.$$

Соотношение (6) можно назвать критерием принципиальной пригодности ТЭП из данных материалов для данной ТЭИС и предъявляемых к ней требованиях.

На диаграмме $K_{VT} - R_T$ конкретный n -элементный ТЭП отображается фигуративной точкой с координатами:

$$K_{VT} = n \alpha_T; \quad (7)$$

$$R_T = n r_T. \quad (8)$$

Минимально необходимое число термоэлементов n_{\min} для выполнения измерений с заданной точностью может быть найдено графоаналитическим путем, определяя числа элементарных участков длиной $\sqrt{\alpha_T^2 + r_T^2}$, укладываемых на характеристической прямой ТЭП с угловым коэффициентом α_T/r_T до точки пересечения с пороговой линией.

Минимально необходимое число термоэлементов можно найти аналитически, подставив значения (7) и (8) в выражение (5),

$$n \alpha_T = \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{TX} K_{YI} \Delta X} + \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{TX} K_{YI} \Delta X} n r_T. \quad (9)$$

Решая (9) относительно n , получим

$$n_{\min} = \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{TX} K_{YI} \Delta X \alpha_T - \Delta Y_{\min} r_T}.$$

Видно, что измерение температуры с указанной точностью не может быть выполнено при использовании одиночных термопар. Заданную точность измерения принципиально могут обеспечить системы с термобатареями из термопар ППР, ХА, ХК, Sb—Bi, $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 - Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$ и Sb—PbTe с числом элементов 500, 95, 45, 25, 10 и 24, соответственно. Термопары Te—Bi и Ge(p)—Ge(n), несмотря на большой коэффициент термоЭДС, в данном случае принципиально непригодны, так как не могут обеспечить измерение температуры с заданной точностью при сколь угодно большом числе элементов.

Следует учитывать, что число рабочих спаев термоэлементов, которые можно разместить на объекте измерения или на приемной площадке, ограничено. Как правило, число спаев стремятся сделать равным максимально допусаемому (n_{ad}) конструкционными и технологическими возможностями. В связи с этим среди принципиально пригодных для изготовления ТЭП практически непригодными являются ТЭП, для которых $n_{\min} \geq n_{ad}$. Например, практически непригодными для рассматриваемого случая являются ТЭП из термопар ППР, так как для обеспечения измерений с заданной точностью они должны содержать неприемлемо большое число термоэлементов. Аналогичное может быть сказано и в отношении термопар ХА.

Подставив в выражение (9) значение n_{ad} , получим, что практически пригодными для изготовления ТЭП данной ТЭИС являются термопары, параметры которых α_T и r_T удовлетворяют соотношению

$$\alpha_T - \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{TX} K_{YI} \Delta X} \cdot r_T \geq \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{TX} K_{YI} \Delta X n_{ad}}. \quad (10)$$

Как отмечалось выше, наиболее эффективным, т. е. предпочтительным для данной ТЭИС является ТЭП, для которого отношение величины K_{VT} к минимально необходимой для выполнения измерений с заданной точностью величине K_{VT}^* максимально. Имея в виду, что для ТЭП из данных материалов с данными конструкционными параметрами

$$K_{VT} = n_{ad} \alpha_T$$

и

$$K_{VT}^* = \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{TX} K_{YI} \Delta X} R_d + n_{ad} r_T,$$

получим

$$\frac{K_{VT}}{K_{VT}^*} = \frac{K_{TX} K_{YI} \Delta X}{\Delta Y_{\min}} \cdot \frac{n_{ad} \alpha_T}{R_d + n_{ad} r_T}. \quad (11)$$

Для сопоставления эффективности термоэлектрических материалов для данного ТЭП предпо-

ложим, что одна его ветвь выполнена из термоэлектрического материала, а другая — из гипотетического, имеющего $\alpha = 0$, $\rho = 0$ и $\kappa = 0$. В этом случае параметры ТЭП с одной ветвью будут определяться свойствами материала, поскольку $\alpha_T \equiv \alpha$, $r_T = \rho L/S$, а выражения (6), (10) и (11), записанные для такого ТЭП, можно считать критериями принципиальной и практической пригодностей и предпочтительности термоэлектрических материалов ТЭП для данной конкретной системы (L и S — длина и площадь сечения ветви)

$$\frac{\alpha}{\rho} \geq \frac{\Delta Y_{\min} L}{K_{TX} K_{YV} \Delta X S}; \quad (12)$$

$$\alpha - \frac{\Delta Y_{\min} L}{K_{TX} K_{YV} \Delta X} \cdot \rho \geq \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{TX} K_{YV} \Delta X n_{ad}}; \quad (13)$$

$$\frac{\alpha}{\rho + \frac{R_d S}{L n_{ad}}} = \max. \quad (14)$$

Видно, что критерий предпочтительности материалов (14) не является безотносительным к системе, и в каждом конкретном случае при выборе материалов ТЭП следует учитывать его допустимые конструкционные параметры и параметры ЭИП. В предельном случае ($R_d S/L n_{ad} \gg \rho$) предпочтительным для ТЭП является материал с максимальным коэффициентом термоЭДС, однако, если $R_d S/L n_{ad} \ll \rho$, то более предпочтителен материал, для которого максимальна величина α/ρ .

Проведем аналогичное рассмотрение ТЭИС с потенциометрическим прибором. ТЭП и входное сопротивление ЭИП при потенциометрическом способе измерения выходного сигнала оказываются включенными параллельно. В этом случае эффективное электросопротивление ТЭИС в целом составит

$$R = \frac{R_T R_d}{R_T + R_d}.$$

Среднеквадратическое напряжение шумов на входе ЭИП будет равно

$$Y_{nois} = \sqrt{\frac{4 k T_{mid} \Delta f R_T R_d}{R_T + R_d}},$$

изменение разности потенциалов на входе ЭИП за счет изменения входной величины на ΔX будет составлять

$$\Delta Y = \frac{K_{YV} K_{VT} K_{TX} R_d \Delta X}{R_T + R_d},$$

а условия измерения входной величины с заданной точностью будут иметь вид

$$\frac{K_{YV} K_{VT} K_{TX} R_d \Delta X}{R_T + R_d} \geq \Delta Y_{\min}; \quad (15)$$

$$\frac{K_{VT} K_{TX} \Delta X}{\sqrt{4 k T_{mid} \Delta f}} \cdot \sqrt{\frac{R_d}{R_T R_T + R_d}} \geq m_0. \quad (16)$$

Эти два условия также целесообразно рассматривать на диаграмме $K_{VT}-R_T$ (см. рис. 1, б) с предельными зависимостями между этими параметрами согласно (15) и (16).

$$K_{VT}^* = \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YV} K_{TX} \Delta X} \cdot \frac{R_d + R_T}{R_d},$$

$$K_{VT}^{**} = \frac{2 m_0 \sqrt{k T_{mid} \Delta f}}{K_{TX} \Delta X} \cdot \sqrt{\frac{R_T + R_d}{R_d} \frac{R_T}{R_d}}. \quad (17)$$

Обозначенные на диаграмме области I–IV характеризуются аналогично соответствующим областям на диаграмме для ТЭИС с токометрическим прибором.

Как и для систем с токометрическим прибором, для систем с потенциометрическим прибором могут иметь место и одинаково реальные случаи ограничения возможности измерения входной величины с заданной точностью как чувствительностью прибора при $R_T \leq R_T^*$,

$$\text{где } R_T^* = \frac{\Delta Y_{\min}^2 R_d}{4 m_0^2 K_{YV}^2 k T_{mid} \Delta f R_d - \Delta Y_{\min}^2},$$

для которого

$$n_{\min} = \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{YV} K_{TX} \Delta X R_d \alpha_T - \Delta Y_{\min} r_T},$$

так и шумами системы при $R_T > R_T^*$, для которого

$$n_{\min} = \frac{4 m_0^2 k T_{mid} \Delta f}{K_{TX}^2 \Delta X^2} \cdot \frac{r_T}{\alpha_T^2}.$$

Применение потенциометрических приборов обеспечивает ТЭИС несомненно более высокие метрологические качества, чем применение токометрических приборов, и, кроме того, расширяет круг пригодных для проведения измерений термоэлементов, уменьшает необходимое число последних и упрощает конструирование ТЭП.

При характерных для современных цифровых вольтметров значениях: $\Delta Y_{\min}/K_{YV} = 1$ мкВ, $R_d = 10$ МОм и $\Delta f = 25$ Гц [2] с помощью ТЭП вполне

возможно надежное ($m_0 = 10$) определение изменения температуры на 0,001 К (см. рис. 2, з).

Принципиально это может быть обеспечено использованием ТЭП из термоэлементов, для которых

$$\frac{\alpha_T}{r_T} \geq B^*, \quad (18)$$

где B^* — угловой коэффициент асимптоты к кривой зависимости (17), равный

$$B^* = \frac{2 m_0 \sqrt{k T_{mid} \Delta f}}{K_{TX} \Delta X \sqrt{R_d}},$$

а практически — из термоэлементов, для которых при $n_{ad} r_T \leq R_T^*$

$$\alpha_T - \frac{\Delta Y_{min}}{K_{YV} K_{TX} \Delta X R_d} \cdot r_T \geq \frac{\Delta Y_{min}}{K_{YV} K_{TX} \Delta X n_{ad}}, \quad (19)$$

а при $n_{ad} r_T > R_T^*$

$$\frac{\alpha_T^2}{r_T} \geq \frac{4 m_0^2 k T_{mid} \Delta f}{K_{TX}^2 \Delta X^2}. \quad (20)$$

Измерение температуры системой с современными цифровыми потенциометрическими приборами с точностью 0,001 К может быть обеспечено не только с помощью ТЭП из термопар ХА, ХК, Sb—Bi и $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ — $Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$ и к тому же меньшим числом элементов (25, 15, 10 и 3, соответственно), чем ТЭП систем с токоизмерительным прибором, но и с помощью ТЭП из термопар Te—Bi и $Ge(p)$ — $Ge(n)$, выполненных из двух и трех элементов, соответственно.

Примем за меру эффективности ТЭП степень превышения его максимально возможного значения

$$K_{VT} = n_{ad} \alpha_T$$

над его пороговым значением

$$K_{VT}^* = \frac{\Delta Y_{min}}{K_{YV} K_{TX} \Delta X} \cdot \frac{R_d + n_{ad} r_T}{R_d}$$

при $n_{ad} r_T \leq R_T^*$ или

$$K_{VT}^{**} = \frac{2 m_0 \sqrt{k T_{mid} \Delta f}}{K_{TX} \Delta X} \cdot \sqrt{\frac{R_d + n_{ad} r_T}{R_d} \frac{n_{ad} r_T}{R_d}}$$

при $n_{ad} r_T > R_T^*$. Тогда при $n_{ad} r_T \leq R_T^*$ предпочтительной из практически пригодных для измерительных ТЭП является термопара, для которой

$$\left(1 + \frac{n_{ad} r_T}{R_d}\right) \alpha_T = \max, \quad (21)$$

или в наиболее типичном случае $n_{ad} r_T \ll R_T^*$ — термопара из материалов с максимальным коэффициентом термоЭДС. При $n_{ad} r_T > R_T^*$ предпочтительной является термопара, для которой

$$\frac{\alpha_T^2}{R_d + n_{ad} r_T} = \max \quad (22)$$

или, поскольку обычно $n_{ad} r_T \leq R_T^*$, термопара с максимальным коэффициентом термоэлектрической мощности α_T^2/r_T .

Выражения (18)—(22), записанные для гипотетического ТЭП с одной рабочей ветвью, примут вид, который для материалов ТЭП систем с потенциометрическим прибором является критерием принципиальной пригодности

$$\frac{\alpha}{\rho} \geq \frac{2 m_0 L \sqrt{k T_{mid} \Delta f}}{K_{TX} \Delta X S \sqrt{R_d}}, \quad (23)$$

практической пригодности

$$\frac{n_{ad} L \rho}{S} \leq R_T^*,$$

$$\alpha - \frac{\Delta Y_{min} L}{K_{YV} K_{TX} \Delta X R_d S} \cdot \rho \geq \frac{\Delta Y_{min}}{K_{YV} K_{TX} \Delta X n_{ad}}, \quad (24)$$

$$\frac{n_{ad} L \rho}{S} > R_T^*, \quad \frac{\alpha^2}{\rho} \geq \frac{4 m_0^2 k T_{mid} \Delta f L}{K_{TX}^2 \Delta X^2 S n_{ad}} \quad (25)$$

и предпочтительности

$$\frac{n_{ad} L \rho}{S} \leq R_T^*, \quad \left(1 + \frac{L n_{ad}}{S R_d} \cdot \rho\right) \alpha = \max,$$

$$\frac{n_{ad} L \rho}{S} > R_T^*, \quad \frac{1}{S R_d + n_{ad} L \rho} \cdot \frac{\alpha^2}{\rho} = \max.$$

Как видно, в реальном случае $n_{ad} L \rho / S \leq R_d$ при $n_{ad} L \rho / S \leq R_T^*$, предпочтительным является материал с максимальным коэффициентом термоЭДС, а при $n_{ad} L \rho / S \leq R_T^*$ — материал с максимальным коэффициентом термоэлектрической мощности.

Выбор материалов для измерителей температуры и радиации

Если ТЭП работает как измеритель температуры, то, заменяя $\Delta X = \Delta T$ и $K_{TX} = K_{TT} = 1$, получим критерий для оценки материалов термометрического назначения.

Рассмотрим ТЭП радиометрического назначения, т. е. работающих как преобразователь излучения. В этом случае измеряемой входной величиной (X) является интенсивность излучения q , падающего на рабочие спаи ТЭП. Изменение интенсивности излучения Δq вызовет изменение температуры рабочих спаев на величину, которая при допущении, что термоэлементы состоят из одной рабочей ветви и их теплообмен с окружающей средой несущественен, будет равна

$$\Delta T = \frac{L}{k} \Delta q.$$

Очевидно, что коэффициент пропорциональности между ΔT и Δq представляет собой параметр $K_{ТХ}$

$$K_{ТХ} = \frac{L}{k}. \quad (26)$$

Для ТЭП радиометрического назначения $K_{ТХ}$ зависит от удельной теплопроводности материала ветвей, и ее величина, таким образом, будет входить в критериальные соотношения.

Так, подставляя выражение (26) в критериальные соотношения (12) и (13), получим, что для ТЭП радиометрического назначения с токометрическим прибором принципиально пригодны термоэлементы из материалов, для которых

$$\frac{\alpha}{\rho k} \geq \frac{Y_{\min}}{K_{YI} \Delta q S},$$

из принципиально пригодных практически пригодны термоэлементы из материалов, для которых

$$\frac{\alpha}{k} - \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YI} \Delta q S} \cdot \rho \geq \frac{\Delta Y_{\min} R_d}{K_{YI} L \Delta q n_{ad}},$$

а согласно (11) предпочтителен из практически пригодных термоэлемент из материалов, для которых

$$\frac{\alpha}{k} \cdot \frac{1}{R_d S + L n_{ad} \rho} = \max.$$

Поскольку, как правило, $n_{ad} L \rho / S \gg R_d$, то предпочтительным для ТЭП радиометрического назначения с токоизмерительным прибором будет материал, для которого величина $\alpha / \rho k$ максимальна.

Подставляя выражение (26) и соотношения (23)—(25), получим критерий принципиальной пригодности для ТЭП радиометрического назначения с потенциометрическим прибором

$$\frac{\alpha}{\rho k} \geq \frac{2 m_0 \sqrt{k T_{mid} \Delta f}}{\Delta q S \sqrt{R_d}},$$

критерий практической пригодности при $n_{ad} L \rho / S \leq R_T^*$ записывается в виде

$$\frac{\alpha}{k} - \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YI} R_d \Delta q S} \cdot \rho \geq \frac{\Delta Y_{\min}}{K_{YI} L \Delta q n_{ad}},$$

а при $n_{ad} L \rho / S > R_T^*$ в виде

$$\frac{\alpha^2}{\rho k^2} \geq \frac{4 m_0 k T_{mid} \Delta f}{L S n_{ad} (\Delta q)^2}.$$

Согласно (21) и (22) предпочтительным из практически пригодных является материал, для которого:

при $n_{ad} L \rho / S \leq R_T^*$

$$\frac{\alpha}{k} \left(1 + \frac{n_{ad} L}{R_d S} \cdot \rho \right) = \max,$$

а при $n_{ad} L \rho / S > R_T^*$

$$\frac{1}{R_d S - n_{ad} L \rho} \cdot \frac{\alpha^2}{\rho k^2} = \max.$$

Практически $n_{ad} L \rho / S \ll R_d$, поэтому можно считать, что предпочтительными для изготовления ТЭП радиометрического назначения с потенциометрическим прибором являются материалы с максимальной величиной α / k при $n_{ad} L \rho / S \leq R_T^*$ и с максимальной величиной $\alpha^2 / \rho k^2$ при $n_{ad} L \rho / S > R_T^*$.

Заключение

Кроме критерия эффективности термоэлектрических материалов $\alpha^2 / \rho k$, известного как термоэлектрическая добротность, может быть рекомендован набор комплексных критериев: α / ρ , α^2 / ρ , $\alpha / \rho k$, $\alpha^2 / \rho k$ и $\alpha^2 / \rho k^2$ — в зависимости от функционального использования материала (охлаждение, стабилизация температуры, генерирование электроэнергии, измерение) и условий (решение задач принципиальной и практической пригодности, предпочтительности, решение задачи электрического измерения различными методами).

Применение полученных аналитических выражений и графоаналитического метода подтверждает возможность применения в термоэлектрической технике простых металлов, переходных d - и f -элементов (d - и f -металлов), полуметаллов, бесщелевых и узкозонных полупроводников и открывает возможность рационализировать их техническое применение.

Свойства материалов могут определять не только K_{YI} и R_T , но и другие параметры ТЭП. Если учитывать прямое или косвенное влияние свойств

материалов на прочие параметры ТЭП, то критерийные соотношения могут измениться, в соответствии с этим материалы переранжируются по эффективности для ТЭП.

Л и т е р а т у р а

1. Сухов И. В. Шумы электрических цепей. — М.: Связь, 1975. — 352 с.

2. Справочник по электроизмерительным приборам/ Под ред. К. К. Илюнина. — Л.: Энергия, 1977. — 832 с.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2006 г.

Choice of materials for thermocoupler controllers of temperature and radiation

A. B. Oparichev, M. A. Karimbekov

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

E. B. Oparichev

Moscow Technical University of Communication and Information, Moscow, Russia

V. N. Vigdorovich

Institute for Chemical Problems of Microelectronics, Moscow, Russia

Included are model representations for pictorial and analytical choice of materials for measuring thermoelectric converters, which are compounded with parameters of an electric system on sensitivity and detectivity, and also on currentmetric or potentiometric expedient of measuring an output signal of a thermoelectric converter.

* * *