

А.С. Бернштейн

**Термоэлектрические
генераторы**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3
ББК 31.352
А11

А11 **А.С. Бернштейн**
Термоэлектрические генераторы / А.С. Бернштейн – М.: Книга по Требованию,
2013. – 50 с.

ISBN 978-5-458-36374-7

В брошюре приводятся основные сведения о термоэлектрическом эффекте и его использовании для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. Описываются различные типы термоэлектрических генераторов и современные материалы термопар, используемых в них. Даются основы расчета термоэлектрического генератора с иллюстрирующими примерами. Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

ISBN 978-5-458-36374-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

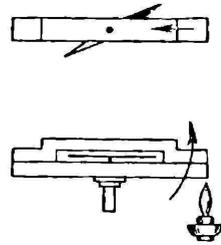
ВВЕДЕНИЕ

Непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую без применения современных генераторов, подвижные части которых сравнительно сложны в изготовлении и снашиваются в работе, имело бы значительные преимущества.

Еще в 1822 г. Зеебек обнаружил, что если нагревать один спай замкнутой цепи, составленной из двух различных металлов, то это вызовет отклонение расположенной поблизости магнитной стрелки (фиг. 1). Явление это, названное впоследствии термоэлектрическим эффектом, выдвигали сначала в качестве доказательства возможности непосредственного перехода тепловой энергии в магнитную и в подтверждение предположения, будто поле земного магнетизма вызывается действием вулканов. Однако вскоре было доказано, что в цепи фиг. 1, называемой термопарой, при нагревании одного из ее спаев протекает слабый электрический ток, магнитное поле которого и отклоняет стрелку.

Уже в 1831 г. при опытах по изучению электролиза в качестве источника тока была применена установка, в которой э. д. с. получалась за счет нагрева спаев термопар из платиновых и железных проводников. В течение второй половины прошлого века был сконструирован целый ряд термоэлектрических генераторов, основанных на том же явлении, но с использованием других материалов.

Термоэлектрические генераторы применялись в качестве источников питания при лабораторных исследованиях, однако делались попытки применять их также и для других целей. Так, например, в «Почтово-Телеграфном Журнале» за 1899 г. была помещена заметка, в которой говорилось об



Фиг. 1. Отклонение магнитной стрелки, расположенной вблизи от термопары, один из спаев которой нагреет.

использовании для питания двух маломощных 16-свечных электрических лампочек, термоэлектрического генератора, представлявшего собой печь с двойными стенками, в пространстве между которыми размещалось большое число термопар из никеля и сплава сурьмы с цинком. Наиболее известным термоэлектрическим генератором того периода является работавшая на газе батарея Гюльхера, выпускавшаяся промышленностью и использовавшаяся для зарядки аккумуляторов (см. фиг. 12 на стр. 37).

Вследствие очень низкого к. п. д. всех существовавших тогда конструкций термоэлектрических генераторов (десятые доли процента) интерес к ним ослабел, как только были изобретены имевшие значительно более высокий к. п. д. электродинамические генераторы, которые и используются с начала века до настоящего времени в установках для получения электрической энергии из тепловой. Коэффициент полезного действия современных крупных электростанций достигает 20—30%, а у самых неэффективных маломощных установок составляет примерно 5%. Насколько экономичнее такие установки термоэлектрических генераторов, видно из того, что по расчету, произведенному в 1922 г., стоимость электроэнергии в городах Европы была в 37 раз ниже стоимости количества газа, которое необходимо было сжечь для получения такого же количества электроэнергии при помощи термоэлектрического генератора, имевшего к. п. д. 0,5%.

Делались попытки применения термоэлектрических генераторов для использования бесполезно теряющегося тепла отходящих газов в различных промышленных установках, однако они не дали существенных результатов. Считалось, что термоэлектрические генераторы целесообразно применять лишь в качестве маломощных источников питания при некоторых лабораторных исследованиях. Особенно привлекала внимание идея использовать термопары для превращения энергии солнечных лучей в электрическую. В 1910 г. было даже организовано для этой цели акционерное общество, но никаких технических данных о соответствующей установке опубликовано так и не было. Насколько малоэффективными оказывались тогда термоэлектрические генераторы, использовавшие солнечную энергию, видно из экспериментальных данных, опубликованных в 1922 г.: генератор, составленный из 105 медно-константановых термопар, за счет поглощения солнечных лучей, падавших на площадь 105 см^2 , давал в полдень солнечного дня не более $0,00061 \text{ вт}$, причем его к. п. д. составлял около 0,008%. По-

нятно, что практического значения такие генераторы иметь не могли.

С развитием радиотехники интерес к термоэлектрическим генераторам возрос. Их стремились использовать в качестве источников питания для радиоприемников в неэлектрифицированных местностях. В 1928 г. в статье, помещенной в газете «Беднота», П. О. Чечик сообщал о работе собранного им термоэлектрического генератора на железо-никелиновых термопарах, источником тепла для которого служила керосиновая осветительная лампа. В 1937 г. А. Г. Ивахненко в статье, помещенной в журнале «Радиофронт», № 13, рекомендовал сходного типа конструкцию в качестве радилюбительского термоэлектрического генератора для питания цепей накала радиоприемника.

Новые сплавы, разработанные в последующее время и оказавшиеся более удобными для использования в качестве материалов для термоэлектрических генераторов, позволили создать образцы генераторов, работавших на жидком топливе. Вес этих генераторов составлял около 1 кг на ватт полезной мощности при к. п. д. порядка десятых долей процента. Во время второй мировой войны такие термоэлектрические генераторы использовались в качестве переносного, бесшумного и надежного источника питания военных радиустановок.

В литературе сообщалось также о создании генераторов, отдававших до 300 *вт* при напряжении 12 *в* и об установке, дававшей до 90 *в*, однако при к. п. д. порядка 0,2%.

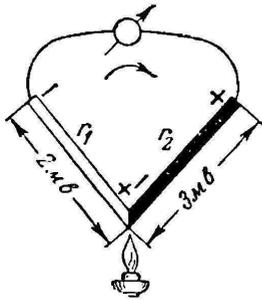
В последнее время снова возник вопрос о возможности непосредственно преобразовывать тепловую энергию в электрическую в промышленных масштабах, так как успехи физики позволили перейти к теоретически обоснованной разработке новых, более эффективных материалов для термоэлектрических генераторов. Такими материалами являются некоторые сплавы и полупроводники, применение которых дало возможность получить опытные образцы термопар с к. п. д. до 5—7%. На основе применения таких новых термопар наша промышленность выпускает теперь термоэлектрические генераторы типа ТГК-3, предназначенные для питания ряда батарейных приемников за счет тепла, отдаваемого 20-линейной керосиновой осветительной лампой.

В связи с появлением новых высокоэффективных термопар снова возник интерес к возможности прямого превращения с их помощью солнечной энергии в электрическую. Экспериментальный генератор, созданный в последние го-

ды, давал за счет поглощения солнечных лучей, падавших на площадь 360 см^2 , до $0,175 \text{ вт}$ полезной мощности, причем его к. п. д. составлял $0,59\%$.

1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Термоэлектрический эффект объясняется следующим образом: при нагревании одного конца стержня из металла или полупроводника, между его горячим и холодным концами возникает разность потенциалов, величина которой и знак могут быть различны. Очевидно, что, соединив два проводника, изготовленных из разных материалов, в замкнутую цепь и нагревая точку соединения проводников, образующих термопару (фиг. 2), получим в цепи э. д. с. (термо-э. д. с.), определяемую разностями потенциалов, возникающих в используемых проводниках при их неравномерном нагреве.



Фиг. 2. Термопара из двух проводников.

Если, как показано на фиг. 2, разность потенциалов между горячим и холодным концами проводника r_1 составляет 2 мв , а проводника $r_2 = -3 \text{ мв}$, то термо-э. д. с. в цепи термопары будет $e_t = 2 - (-3) = 5 \text{ мв}$. Ток, вызываемый ею, будет протекать в направлении, указанном стрелкой. В случае же, если разность потенциалов для проводника r_1 составляет 1 мв , а для проводника r_2 4 мв , термо-э. д. с. будет $e_t = 1 - 4 = -3 \text{ мв}$ и ток, вызванный ею, будет протекать в обратном направлении.

Включение в цепь термопары каких-либо проводников, например проводов, которыми присоединен гальванометр, не будет оказывать влияния на термо-э. д. с., если точки их присоединения имеют одинаковую температуру; предполагается, что оба соединительных провода сделаны из одного и того же материала.

Термо-э. д. с., возникающая в термопаре, зависит не только от разности температур горячего и холодного спаев термопары, но обычно и от абсолютного значения этих температур. Данные, полученные на основании многочисленных измерений термо-э. д. с., различных термопар, удобно представить в виде таблицы, в которой приводятся значения термо-э. д. с., развиваемой различными материалами в комбинации с каким-нибудь одним и тем же материалом (табл. 1).

Термо-э. д. с. различных термопар

$t_2, ^\circ\text{C}$	Термо-э. д. с. при $t_x = 0^\circ\text{C}$, мв					
	Платина-хромель	Платина-алюмель	Платина-медь	Платина-железо	Платина-константан	Платина-манганин
0	0	0	0	0	0	0
100	+2,81	-1,29	+0,76	+1,89	-3,51	+0,61
200	+5,96	-2,17	+1,83	+3,54	-7,45	+1,55
300	+9,32	-2,89	+3,15	+4,85	-11,71	+2,77
400	+12,75	-3,64	+4,68	+5,88	-16,19	+4,25
500	+16,21	-4,43	+6,41	+6,79	-20,79	+5,95
600	+19,62	-5,28	+8,34	+7,80	-25,47	+7,84
700	+22,96	-6,18	+10,49	+9,12	-30,18	—
800	+26,23	-7,08	+12,84	+10,86	-34,86	—
900	+29,41	-7,95	+15,41	+12,84	-39,45	—
1000	+32,52	-8,79	+18,20	+14,30	-43,92	—

В качестве такого общего для всех термопар данной таблицы материала, называемого нормальным электродом, принято брать химически чистую платину. В табл. 1, составленной именно таким образом, приведены значения термо-э. д. с. некоторых металлов и сплавов, применяемых в электротехнике, в комбинации с чистой платиной при температуре холодного спая t_x , равной нулю, и различных температурах горячего спая t_2 .

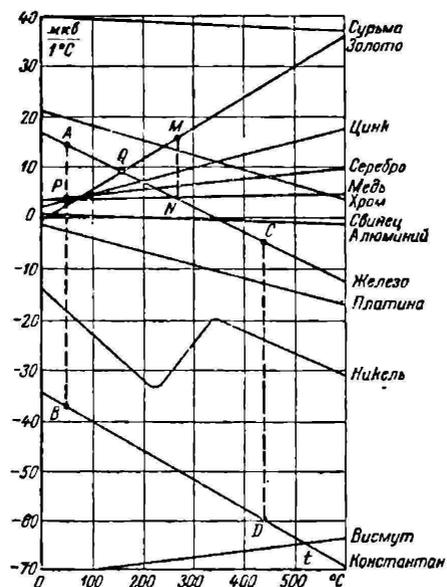
Чтобы определить термо-э. д. с. термопары, составленной из каких-нибудь двух приведенных в табл. 1 материалов, при некоторой заданной температуре их горячего спая и температуре холодного спая, равной нулю, следует взять разность термо-э. д. с., указанных в таблице для этих материалов, развиваемых ими при заданной температуре горячего спая в комбинации с нормальным электродом.

Так, например, можно найти, что при температуре горячего спая $t_2 = 300^\circ\text{C}$ и холодного $t_x = 0^\circ\text{C}$ термопара медь — манганин даст $3,15 - 2,77 = 0,38$ мв, а термопара манганин — константан при тех же температурах даст $2,77 - (-11,71) = 14,48$ мв.

Если требуется определить, какую термо-э. д. с. даст термопара, холодный конец которой имеет температуру, отличную от нуля, то следует найти, какие термо-э. д. с. она даст при температуре холодного спая, равной нулю, и температурах горячего спая, равных действительным температурам ее горячего и холодного спаев, и взять разность меж-

ду полученными значениями. Так, например, термопара манганин — константан при температуре горячего спаев 300°C и холодного 100°C даст $14,48 - [0,61 - (-3,51)] = 10,36 \text{ мв}$.

Другим, более наглядным способом изображения тех же данных о термо-э. д. с., развиваемых различными термопарами, является построение так называемых кривых «термоэлектрической способности» различных материалов.



Фиг. 3. Кривые термоэлектрической способности различных материалов.

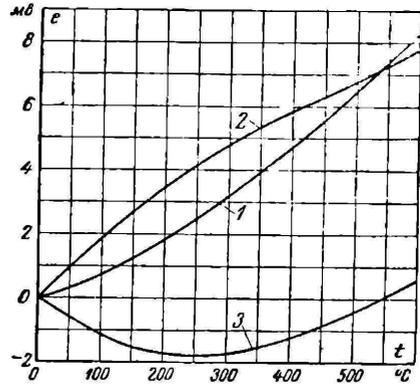
На фиг. 3 приведены такие кривые, построенные для ряда материалов на основании данных, приводимых многими авторами. Кривые эти, практически представляющие собой наклонные прямые, строятся так, что термо-э. д. с., развиваемая термопарой, составленной из каких-нибудь двух материалов, определяется, как площадь, заключенная между отрезками кривых термоэлектрической способности этих материалов и перпендикулярами, восстановленными к оси температур в точках, соответствующих температурам горячего и холодного спаев термопары.

Пользуясь графиком фиг. 3, можно, например, найти, что термо-э. д. с. термопары железо—константан при

температуре нагретого спая $t_z = 450^\circ\text{C}$ и холодного $t_x = 50^\circ\text{C}$ равна площади $ABCD$:

$$e_{50}^{450} = \text{пл. } ABCD = \frac{AB + CD}{2} (450 - 50) = 55 \cdot 400 = \\ = 22\,000 \text{ мкв, или } 22 \text{ мв.}$$

Кривые термоэлектрической способности некоторых материалов пересекаются между собой. Если они пересекаются (фиг. 3) при температуре, лежащей между температурами горячего и холодного спаев термопары, составленной из данных материалов, то термо-э. д. с., развиваемая термопарой, будет равна разности площадей, заключенных между этими кривыми до точки их пересечения и после нее. Например, э. д. с. термопары золото—железо при температурах 275 и 50°C равна разности площадей APQ и MNQ , так что при увеличении температуры горячего спая выше 160°C термо-э. д. с. этой термопары будет уменьшаться. Такое явление наблюдается у целого ряда термопар.

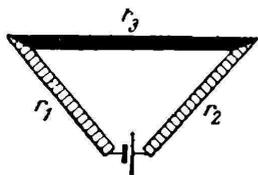


Фиг. 4. Кривые изменения термо-э. д. с. в зависимости от температуры горячего спая при температуре холодного спая 0°C для различных термопар.

1 — платина—медь; 2 — платина — железо; 3 — медь—железо.

На фиг. 4 представлены кривые изменения термо-э. д. с. трех термопар в зависимости от изменения температуры их горячего спая при температуре холодного спая, равной 0°C . Из графика видно, что у термопары медь — железо э. д. с. при температуре 540°C меняет знак. Это явление называется *инверсией*.

С термоэлектрическим эффектом тесно связан по своей природе эффект Пельтье. Протекание электрического тока сопровождается переносом тепла. Если пропускать постоянный ток от внешнего источника через термопару (не нагревая ее специально), то тепло будет переноситься от одного из ее спаев к другому. Ток от внешнего источника, протекающий через спаи в том же направлении, что и ток возникающий, если этот спай нагревать, вызывает охлаждение спая; ток от внешнего источника, пропущенный через тот же



Фиг. 5. Схема опыта для обнаружения эффекта Пельтье.

Для обнаружения эффекта Пельтье. Составлена цепь, составленная, как это показано на фиг. 5, из двух одинаковых проводников r_1 и r_2 и третьего проводника r_3 из другого материала, температуры спаев r_1r_3 и r_3r_2 оказываются неодинаковыми.

2. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОПАРЫ

Для оценки возможностей, представляемых термоэлектрическим генератором, прежде всего интересно выяснить, какой к. п. д. могут иметь различные термопары в качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую.

Обозначим через t_2 температуру горячего и через t_x холодного спаев термопары, выраженные в градусах абсолютной шкалы, а через e — среднее значение приращения термо-э. д. с., развиваемой термопарой при повышении температуры ее горячего спая на 1°C в интервале от t_x до t_2 , выраженное в вольтах на градус; через ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления материалов, из которых составлены термопары, выраженные в $\text{ом мм}^2/\text{м}$; через κ_1 и κ_2 — удельные теплопроводности материалов термопары, выраженные в $\text{вт м}/\text{мм}^2$; через s_1 и s_2 — площади сечения проводников термопары, выраженные в мм^2 ; через l — длину проводника термопары, принимаемую одинаковой для обоих проводников и выраженную в м ; через R — сопротивление нагрузки в ом . Тогда сопротивление термопары

$$r = \frac{\rho_1 l}{s_1} + \frac{\rho_2 l}{s_2}, \quad (1)$$

а теплопроводность

$$\kappa = \frac{\kappa_1 s_1}{l} + \frac{\kappa_2 s_2}{l}, \quad (2)$$

причем, так как удельное сопротивление и теплопроводность материалов зависят от температуры, которая при работе термопары сильно изменяется по длине послед-

ней, то в формулах (1) и (2) следует вставлять значения ρ_1, ρ_2, x_1 и x_2 , соответствующие средней температуре проводников термопары, вычисленной по формуле

$$t = t_x + \frac{t_z - t_x}{2} = \frac{t_z + t_x}{2}. \quad (3)$$

Термо-э. д. с., развиваемая термопарой:

$$e_t = e(t_z - t_x), \quad (4)$$

ток, протекающий в цепи термопары:

$$I = \frac{e_t}{r + R}$$

и мощность, отдаваемая при этом термопарой в нагрузку, включенную вместо гальванометра на фиг. 2;

$$P = I^2 R = \frac{e_t^2 R}{(r + R)^2} \quad (5)$$

При одном и том же значении э. д. с. e_t наибольшая мощность в нагрузке выделяется, если сопротивление нагрузки R равно сопротивлению термопары r . Мощность эта будет равна:

$$P_0 = \frac{e_t^2}{4r}. \quad (6)$$

При этом в цепи термопары будет расходоваться вдвое большая мощность, половина которой будет затрачиваться на нагревание термопары:

$$2P_0 = \frac{e_t^2}{2r}.$$

Согласно законам термодинамики процесс преобразования тепла в электрическую энергию, связанный с его переносом от горячего спая, имеющего температуру t_z , к холодному спая, имеющему температуру t_x , имеет к. п. д., равный $\frac{T_z - T_x}{T_z}$, где температуры T выражены в градусах абсолютной шкалы и равны соответствующим температурам в градусах Цельсия $t^\circ\text{C} + 273^\circ$. Следовательно, для получения электрической мощности $2P_0$ в цепи термопары в последнюю через горячий спай

В единицу времени должно поступать количество тепловой энергии, равное:

$$P_{\tau} = \frac{T_2}{T_2 - T_x} \cdot 2P_0. \quad (7)$$

Кроме того, так как проводники термопары обладают теплопроводностью, через нее неизбежно протекает значительное количество тепловой энергии, не участвующей в процессе преобразования тепловой энергии в электрическую, что очевидно, так как это тепло протекает и через разомкнутую термопару, в которой никакого расхода электрической мощности не происходит. Количество протекающей таким образом энергии определяется по формуле

$$P_x = \kappa(t_2 - t_x). \quad (8)$$

Коэффициент полезного действия термопары равен отношению полезной электрической мощности, выделяющейся в ее нагрузке, к количеству тепловой энергии, поступающей в термопару в единицу времени через ее горячий спай:

$$\eta = \frac{P_0}{P_{\tau} + P_x}. \quad (9)$$

Из формул (6), (8) и (9) видно, что к. п. д. термопары тем меньше, чем больше ее теплопроводность, а следовательно, P_x , и чем больше ее сопротивление, т. е. чем меньше P_0 .

Существует некоторое наивыгоднейшее соотношение между сечениями проводников термопары. Оно определяется формулой

$$s_{\eta} = \frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 \alpha_2}{\rho_2 \alpha_1}} \quad (10)$$

Таким образом, если заданы температуры горячего и холодного спаев термопары t_2 и t_x и выбраны материалы ее проводников, то максимальный к. п. д. она даст при соблюдении двух условий: равенстве сопротивления нагрузки R сопротивлению термопары r и наивыгоднейшем соотношении сечений проводов термопары s_{η} , выбранном по формуле (10). Подставляя в формулу (9) значения P_0 , P_{τ} и P_x из формул (6), (7) и (8), а затем r , κ и s_{η} , по формулам (1), (2) и (10) можно получить