

©1995 г.

## КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

*Л.П.Булат, В.С.Закордонец, В.Ю.Аркадьев*

Тернопольский приборостроительный институт,  
282001, Тернополь, Украина  
(Получена 2 августа 1994 г. Принята к печати 29 марта 1995 г.)

Предложена конструкция короткозамкнутого термомеханического преобразователя тепловой энергии в механическую, использующего эффект Зеебека и закон Ампера. Вычислены мощность, механический момент и коэффициент полезного действия преобразователя при различных режимах работы. Преобразователь может работать на низкопотенциальной тепловой энергии и использоваться в автономных системах.

В настоящее время растет потребность в автономных нетрадиционных системах преобразования энергии, в которых использовались бы естественные источники тепла. Особый интерес в этой связи представляет преобразование низкопотенциальной тепловой энергии в механическую, так как подобные источники энергии практически неисчерпаемы и экологически чисты.

На сегодняшний день можно выделить два типа таких двигателей: принцип действия первых основан на использовании эффекта памяти формы и эффекта Зеебека [1,2], вторых — на эффекте Зеебека и принципе магнитоэлектромеханического преобразования энергии [3,4]. Вследствие низкого коэффициента полезного действия (КПД) и ряда конструктивных недостатков такие двигатели не нашли применения. Как показал сравнительный анализ, наиболее перспективными с энергетической точки зрения при малых перепадах температур  $\Delta T$  могли бы стать преобразователи второго типа, использующие преимущества короткозамкнутых [5,6] термоэлектрических генераторов. Нами предложен короткозамкнутый полупроводниковый термоэлектрический преобразователь тепловой энергии в механическую [7], схема которого представлена на рисунке. В цилиндрическом корпусе (статоре) подвижно на проводящей оси в магнитном поле установлен ферромагнитный диск (ротор). Электрический ток, генерируемый батареей термоэлементов, поступает по токопроводящей шине на ось и через жидкометаллический контакт — на ротор, по которому растекается радиально. Силы Ампера приводят ротор во вращательное движение.

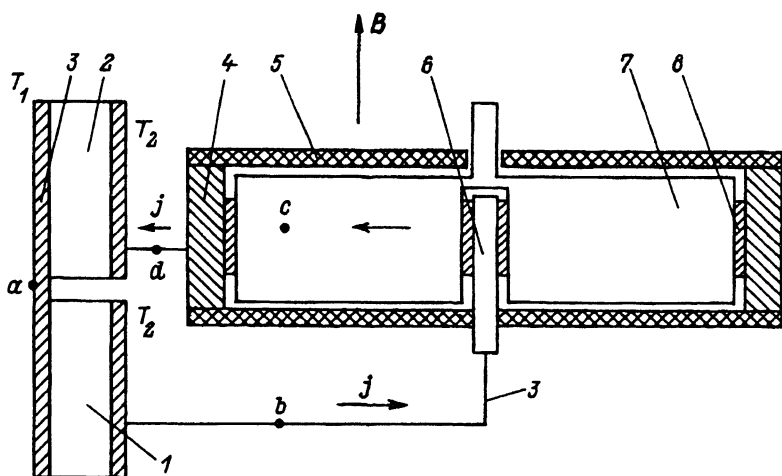


Схема термомеханического двигателя. 1 — ветвь термоэлемента  $p$ -типа проводимости; 2 — ветвь термоэлемента  $n$ -типа проводимости; 3 — коммутационная щетка; 4 — статор, 5 — электроизоляционная пластина; 6 — ось; 7 — ротор; 8 — жидкометаллические контакты.

Работу двигателя в стационарном режиме можно описать с помощью одного из уравнений Максвелла и обобщенного закона электропроводности [5]

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}, \quad (1)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} - \sigma \alpha \nabla T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$  — напряженность электростатического поля,  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция,  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\sigma$ ,  $\alpha$  — соответственно коэффициенты электропроводности и термоэдс,  $\nabla T$  — градиент температуры.

Решая совместно уравнения (1), (2) и производя интегрирование по контуру  $a-b-c-d$  (рис. 1), для механической мощности преобразователя можно получить

$$P = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn}(1 + \rho)} s(1 - s), \quad (3)$$

где  $\rho = r_0/r_{pn}$ ,  $\alpha_{pn}$  и  $r_{pn}$  — коэффициент термоэдс и электросопротивление  $p$ - $n$ -пары,  $r_0$  — суммарное сопротивление ротора, жидкометаллических контактов, токопроводящих и коммутационных шин,  $S = (n_{\max} - n)/n_{\max}$  — параметр, именуемый в теории электрических машин [8] скольжением,  $n$  — частота вращения ротора,  $n_{\max}$  — частота вращения ротора в режиме холостого хода,  $\Delta T = T_1 - T_2$ ,  $T_1$  и  $T_2$  — температуры горячего и холодного спаев соответственно.

Очевидно, что максимальная мощность преобразователя достигается при  $s = 1/2$  и составляет

$$P_{\max} = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{4r_{pn}(1 + \rho)}. \quad (4)$$

С помощью (3) для электромагнитного момента можно получить

$$M = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{2\pi r_{pn}(1 + \rho)} s, \quad (5)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток через ротор устройства.

Легко видеть, что максимальный момент (5) достигается в режиме короткого замыкания при  $s = 1$ . Для частоты вращения ротора можно получить выражение

$$n = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi} (1 - s), \quad (6)$$

которое принимает максимальное значение в режиме холостого хода (при  $s = 0$ ).

Пренебрегая потерями механической мощности на трение и учитывая выражение для КПД термоэлектрического генератора [6] в применении к КПД рассматриваемого преобразователя, получим

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{s(1 - s)}{(z_d T_1)^{-1} + s - s^2(\Delta T/2T_1)}, \quad (7)$$

где  $z_d = z_m(1 + \rho)^{-1}$ , а  $z_m$  — термоэлектрическая добротность  $p$ - $n$ -пары [5],

$$z_m = \alpha_{pn}^2 / \left[ (\kappa_p / \sigma_p)^{1/2} + (\kappa_n / \sigma_n)^{1/2} \right]^2.$$

Оптимальное значение  $s_0$ , при котором достигается максимальный КПД устройства, найдем из условия  $d\eta/ds = 0$  и формулы (7):

$$s_0 = \frac{1}{(z_d T_d + 1)^{1/2} + 1},$$

где  $T_d = (T_1 + T_2)/2$  — средняя температура.

Максимальное значение КПД, соответствующее  $s_0$ , определяется выражением

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{1}{1 + 2[(z_d T_d + 1)^{1/2} + 1](z_d T_1)^{-1}}. \quad (8)$$

Оценка показывает, что при использовании типичных термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута при средней температуре  $T_d = 300$  К и при перепаде температур  $\Delta T = 20$  К КПД преобразователя составляет несколько процентов, что примерно в 5 раз меньше, чем КПД идеальной тепловой машины при тех же температурах нагревателя и холодильника. Эффективность устройства будет возрастать с увеличением перепада температур и улучшением термоэлектрических характеристик материала.

Кроме чисто энергетических применений в автономных системах, предлагаемый преобразователь может быть использован для создания автономных счетчиков тепловой энергии.

## Список литературы

- [1] Р. Бенкс. *Тепловые двигатели из нитинола. Эффект памяти формы в сплавах* (М., Металлургия, 1979) с. 442.
- [2] Л.П. Булат, Д.Д. Гуцал. А.с. СССР № 1394348 (1988).
- [3] F.Peters. *Thermoelemente und Thermosoulen* (Halle, 1908).
- [4] В.С. Поздняков, Е.А. Коптеков. *Термоэлектрическая энергетика* (М., 1974).
- [5] Л.И. Анатычук. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства* (Киев, 1979).
- [6] А.С. Охотин и др. *Термоэлектрические генераторы* (М., 1976).
- [7] В.С. Закордонец. А.с. СССР № 1670723 (1991).
- [8] И.П. Копылов. *Электрические машины* (М., 1986).

Редактор Л.В. Шаронова

## **A short-circuited semiconductor thermomechanical energy convertor**

*L.P. Bulat, V.S. Zakordonets, V.Yu. Arkad'ev*

Device Making Institute, 282001, Ternopol, the Ukraine

---