

## НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕНЕРГІЇ

*Розраховано основні параметри нового пристрою – напівпровідникового термоелектромеханічного перетворювача енергії (ТЕМП), призначеного для перетворення низькопотенціальної теплової енергії в механічну. В основу роботи пристрою покладено принцип взаємодії термоелектричного струму, який генерується короткозамкнутим термоелектричним генератором з магнітним полем. У моторному режимі ТЕМП може працювати в якості механічного привода в автономних енергетичних системах. Обчислено механічну потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора і здійснено їх оптимізацію. Показано принципову можливість роботи в термopідігрівному і термоохолоджувальному режимах.*

**Вступ.** У природі існують практично невичерпні ресурси низькопотенціальної теплової енергії (енергія Сонця, океанічний тепловий градієнт, геотермальні викиди тощо), які на сьогодні ще мало використовуються. Інтерес до проблеми перетворення цієї енергії в інші корисні форми зростає, оскільки це надзвичайно важливо як з економічної, так і екологічної точки зору. За умови створення відповідних перетворювачів, використання навіть малої частки низькопотенціальної енергії могло б значно зменшити паливно-енергетичний дефіцит і залежність економіки від викопного палива, ресурси якого обмежені.

У даний час існують два типи таких перетворювачів. Принцип дії перших базується на використанні ефекту пам'яті форми і ефекту Пельтьє [2, 7, 10], других – на пондеромоторній взаємодії короткозамкнутого термоелектричного струму з магнітним полем [6, 7]. Внаслідок складності виготовлення, низької надійності і ряду конструктивних недоліків перетворювачі першого типу не знайшли застосування. У перетворювачах другого типу використовують рідке робоче тіло, тому вони можуть працювати лише в режимі термоелектричного насоса. Крім того, такі перетворювачі ефективні лише при великих градієнтах температури.

Слід зазначити, що низькопотенціальну теплову енергію можна безпосередньо перетворювати в електричну за допомогою термоелектричних генераторів (ТЕГ) [1, 5]. Однак можливості ТЕГ, які працюють при малому перепаді температур між нагрівачем і охолоджувачем (декілька десятків градусів), обмежені. Адже для того щоб на виході ТЕГ отримати придатну для практичного використання напругу (від одиниць до десятків вольт), необхідно з'єднати послідовно декілька тисяч термоелементів. Щоб термоелементи не замикалися металевими поверхнями нагрівача і охолоджувача, вони на гарячій і холодній сторонах повинні мати електроізоляцію з високою теплопровідністю. У зв'язку з цим необхідно зменшувати її товщину і збільшувати поверхню теплового контакту. Остання обставина поряд із великою кількістю термоелементів призводить до зниження загального електричного опору електроізоляції і появи витікання струму. Втрати електричної потужності, спричинені витіканнями струму, описуються співвідношенням [6]

$$P_0 = P \frac{M}{2} \frac{r_0}{r_i} n^2, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність ТЕГ;  $M$  – відносне навантаження;  $r_0$  – внутрішній опір термоелемента;  $r_i$  – опір його ізоляції;  $n$  – кількість термоелементів у ТЕГ.

Поки  $n^2 r_0 / r_i \ll 1$ , електричні втрати корисної потужності невеликі. Коли  $n^2 r_0 / r_i > 1$ , втрати потужності і зниження ККД будуть настільки значними, що не рахуватися з ними не можна. Тому термоелектричний генератор має обмеження на число послідовно з'єднаних елементів.

У цьому зв'язку стають очевидними переваги короткозамкнутої конструкції ТЕГ [1, 5]. Це, у першу чергу, збільшення внаслідок відсутності комутаційних та ізоляційних шарів

термодинамічного ККД, висока надійність і простота виготовлення термобатареї в цілому. Проте й короткозамкнуті ТЕГ застосовуються рідко. В основному через малу генеровану ними напругу і неможливість передачі без значних втрат до споживача струмів великої сили (десятки і сотні ампер). У світлі сказаного, найбільш перспективними, з точки зору ефективного перетворення низькопотенціальної енергії, міг би стати ТЕМП з твердим робочим тілом, запропонований у [8, 9]. У ньому процеси генерації, передачі і споживання термоелектричного струму інтегровані в одному пристрої.

**Розрахунок електромеханічних параметрів ТЕМП.** Схема ТЕМП представлена на рис. 1, де 1 – колектор, який замикає вітки ТЕГ по гарячій стороні, 2 – вітки ТЕГ  $n$ - і  $p$ -типу провідності, 3 – комутаційна шина, 4 – струмопровідна вісь, 5 – рідкометалеві низькоомні контакти, 6 – циліндричний корпус (статор), 7 – феромагнітний диск (ротор). Магнітна система, яка забезпечує необхідну магнітну індукцію в роторі, на схемі не показана. В циліндричному корпусі (статорі) рухомо, на провідній осі, в магнітному полі встановлений феромагнітний диск (ротор).

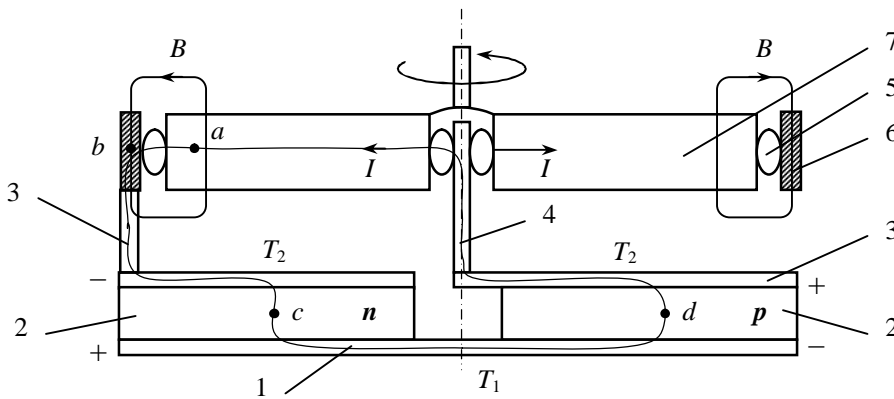


Рис. 1

Електричний струм, який генерується короткозамкнутим ТЕГ, по комутаційній шині надходить на вісь, з якої по рідкометалевих низькоомних контактах на ротор розтікається радіально. Оскільки ротор знаходиться в зовнішньому магнітному полі, то

сила Ампера обертатиме його у напрямку, який визначається напрямками струму і магнітної індукції.

ТЕМП працюватиме доти, поки від джерела до колектора буде підводитися тепла енергія. ТермоЕРС, що виникає, пропорційна різниці температур між гарячими і холодними спаями ТЕГ і величині коефіцієнтів термоЕРС віток.

Роботу ТЕМП у стаціонарному режимі можна описати за допомогою другого рівняння Максвелла і узагальненого закону Ома [4]:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}; \quad (2)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \sigma \alpha \nabla T, \quad (3)$$

де  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля;  $\vec{B}$  – магнітна індукція;  $\vec{j}$  – густина струму;  $\alpha$ ,  $\sigma$  – відповідно коефіцієнти термоЕРС і електропровідності;  $\nabla T$  – градієнт температури.

Розв'язуючи спільно рівняння (2), (3) і здійснюючи інтегрування по замкнутому контуру  $a-b-c-d-a$  (рис.1), отримаємо

$$I r_{pn} (1 + m_{\sigma}) - \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{(1 + m_{\kappa})} = -\Phi n, \quad (4)$$

де  $I$  – струм;  $m_{\sigma} = r_0 / r_{pn}$ ,  $m_{\kappa} = R_0 / R_{pn}$ ;  $r_{pn} = r_p + r_n$  – електричний опір  $p$ - $n$  пари;  $r_p$  і  $r_n$  – електричний опір віток  $n$ - і  $p$ -типу провідності;  $r_0$  – різниця між повним опором електричного кола і  $r_{pn}$ ;  $R_{pn} = R_p R_n / (R_p + R_n)$  – тепловий опір  $p$ - $n$  пари;  $R_p$  і  $R_n$  – тепловий опір віток  $n$ - і  $p$ -типу провідності;  $R_0$  – різниця між повним опором теплового кола і  $R_{pn}$ ;  $\alpha_{pn}$  – коефіці-

ент термоЕРС  $p$ - $n$  пари,  $\Delta T = T_1 - T_2$ ;  $T_1$  – температура нагрівача;  $T_2$  – температура охолоджувача;  $\Phi$  – магнітний потік через ротор пристрою.

З виразу (4) для струму отримаємо

$$I = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{r_{pn}} \frac{1}{(1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)} s, \quad (5)$$

де

$$s = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}}, \quad (6)$$

– ковзання (аналогічний параметр введено в теорії електричних машин [10]);  $n$  – кількість обертів ротора;  $n_{\max}$  – кількість обертів ротора в неробочому режимі.

Механічну потужність визначимо як добуток ЕРС індукції  $\varepsilon_f = -\Phi n$ , що виникає при обертанні ротора, на струм

$$P = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn} (1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)^2} s(1 - s). \quad (7)$$

Оскільки  $M = P/2\pi n$ , то для електромагнітного моменту отримаємо

$$M = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{2\pi r_{pn} (1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)} s. \quad (8)$$

Очевидно, що максимальний момент досягається при повній зупинці ротора ( $s = 1$ ). Для частоти обертання ротора отримаємо

$$n = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi(1 + m_\kappa)} (1 - s). \quad (9)$$

Частота обертання досягає максимальної величини в режимі неробочого ходу ( $s = 0$ ).

З виразів (8) і (9) видно, що електромагнітний момент знаходиться у прямій залежності від магнітного потоку, а частота обертів ротора – в оберненій. Тому в рамках зроблених припущень величина потужності ТЕМП від величини  $\Phi$  не залежить.

Ковзання, при якому досягається максимальна потужність, знайдемо з умови  $dP/ds = 0$ . При  $s = 1/2$  отримаємо

$$P_{\max} = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{4r_{pn} (1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)^2}. \quad (10)$$

Очевидно, що в режимі максимальної потужності оптимальний струм, оптимальний електромагнітний момент та оптимальна частота обертання будуть описуватися такими співвідношеннями:

$$I_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2r_{pn} (1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)}; \quad (11)$$

$$M_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{4\pi r_{pn} (1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)}; \quad (12)$$

$$n_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2\Phi(1 + m_\kappa)}. \quad (13)$$

У режимі максимальної потужності величини основних параметрів ТЕМП, вітки якого виготовлені з типових термоелектричних матеріалів вагою  $Bi_2Te_3$  з площею поперечного перерізу  $S_p = S_n = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  і висотою  $L_p = L_n = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , з радіусом ротора  $r = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  і товщиною  $h = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , при індукції магнітного поля  $B = 5 \cdot 10^{-1} \text{ Тл}$  і середній температурі  $T = 300 \text{ К}$ , наведено в таблиці. Як бачимо, при перепаді температури  $\Delta T = 20 \text{ К}$  механічна

потужність складає  $P = 11,2 \cdot 10^{-2}$  Вт. При збільшенні розмірів ТЕМП, а отже, і площі колектора в  $n$  разів, а перепаду температури в  $m$  разів потужність зросте в  $m^2 n$  разів. Зокрема, при  $S=1$  м<sup>2</sup> і  $\Delta T = 80$  К механічна потужність зросте до  $P = 597,3$  Вт.

Для забезпечення ефективної роботи термоелектрогенеруючої і теплової систем ТЕМП термоелектричний матеріал має задовольняти вимогам, які співпадають із вимогами для матеріалів термоелектричних генераторів [1].

Внаслідок термодинамічної зворотності термоелектричних ефектів перетворювач може працювати в трьох основних режимах. Схеми, які демонструють ці режими зображені на рис. 2, зокрема, *a* – моторний, *б* – термоохолоджуючий; *в* – термopідігрівний режими.

При  $0 \leq s \leq 1$  ТЕМП здійснює перетворення підведеної від зовнішнього джерела теплової енергії в механічну. Моторний режим реалізується внаслідок дії ефектів Зеебека і Ампера.

При обертанні ротора в напрямку, коли виникаючий індукційний струм буде протікати від вітки *n*-типу до вітки *p*-типу, внаслідок дії ефекту Пельтьє здійснюватиметься перенесення тепла  $Q_0$  від колектора з температурою  $T_0$  до термостата з температурою  $T_i$ . При цьому температура колектора знижується, і реалізується термоохолоджуючий режим ( $1 < s < \infty$ ). При обертанні ротора у протилежному напрямку, індукційний струм, що виникає, буде протікати від вітки *p*-типу до вітки *n*-типу, і здійснюватиметься перенесення тепла  $Q_1$  від термостата з температурою  $T_i$  до колектора з більш високою температурою  $T_2$ . При цьому температура колектора буде збільшуватися, і в результаті реалізуватиметься термopідігрівний режим ( $-\infty < s < 0$ ).

Перенесення тепла з більш низького на більш високий температурний рівень є спільною ознакою режимів *в* і *с*, адже в обох випадках ТЕМП працюватиме як тепловий насос.

ТЕМП може застосовуватись у діючих від сонячної енергії сільськогосподарських іригаційних насосах і допоміжних вузлах електричних генераторів як аварійне резервування. Простота системи в цілому, а також умови монтажу та експлуатації, можливо, також будуть важливими критеріями, особливо в місцях, де потреба в енергії не може бути забезпечена традиційними джерелами енергії. Крім чисто енергетичних застосувань, перетворювач може використовуватися для створення автономних лічильників енергії [10].

$\Delta T, (K)$	$m_\sigma$	$m_\kappa$	$P_{\max} \cdot 10^2, (Bm)$	$I_P, (A)$	$M_P \cdot 10^2, (H \cdot m)$	$n_P, (c^{-1})$
5	0,0	0,0	1,21	11,24	0,76	0,30
10	-	-	4,82	22,33	1,51	0,50
15	-	-	10,10	34,02	2,30	0,80
20	-	-	19,30	44,37	3,00	1,00
5	0,1	0,1	0,90	9,17	0,62	0,20
10	-	-	3,62	17,75	1,20	0,50
15	-	-	8,15	28,10	1,90	0,70
20	-	-	14,50	36,98	2,50	0,90
5	0,2	0,2	0,70	7,40	0,50	0,20
10	-	-	2,80	14,79	1,00	0,40
15	-	-	6,30	23,66	1,60	0,60
20	-	-	11,20	31,06	2,10	0,80

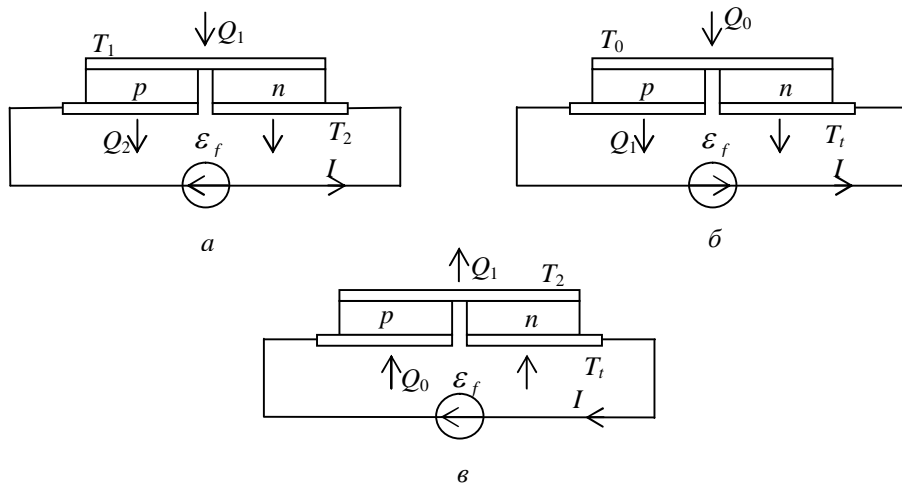


Рис. 2

**Висновки.** Наведений аналіз показує, що перспективним напрямком енергозберігаючих технологій могли б стати ТЕМП, в яких процеси генерації, передачі і споживання термоелектричного струму інтегровані в одному пристрої.

Потужність ТЕМП прямо пропорційна квадрату різниці температур між нагрівачем і охолоджувачем і буде збільшуватися при покращенні характеристик матеріалів та зменшенні непродуктивних втрат теплової енергії. Оскільки електромагнітний момент ТЕМП знаходиться в прямій залежності від магнітного потоку, а частота обертів ротора – в оберненій, то величина потужності пристрою від величини магнітного потоку не залежить.

Потужність ТЕМП і його енерговагові характеристики будуть покращуватися при збільшенні його лінійних розмірів.

*Рассчитаны основные параметры нового устройства – полупроводникового термоэлектромеханического преобразователя энергии (ТЭМП), предназначенного для преобразования низкопотенциальной тепловой энергии в механическую. В основу работы устройства положен принцип взаимодействия термоэлектрического тока, который генерируется короткозамкнутым термоэлектрическим генератором с магнитным полем. В моторном режиме ТЭМП может работать в качестве механического привода в автономных энергетических системах. Вычислены механическая мощность, электромагнитный момент, частота вращения ротора и осуществлена их оптимизация. Показана принципиальная возможность работы в термоподогревном и термоохлаждающем режимах.*

*The basic parameters of new device, that is semiconductor thermoelectromechanical energy converter (TEMC) meant for the conversion of low-potential heat energy into mechanical one, are calculated. The principle of interaction of thermoelectrical current generated by short-circuit thermoelectrical generator with magnetic field, is assumed as basis of the device operation. In the motor mode TEMC can operate as a mechanical drive in island utilities. Mechanical output, electromagnetic torque, rotor speed are calculated and their optimization is carried out. The principle possibility of operation in thermoheating and thermocooling modes is shown.*

1. *Анатычук Л.И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
2. *Бэнкс Р.* Тепловые двигатели из нитинола. Эффект памяти формы в сплавах. – М.: Металлургия, 1979. – 442 с.
3. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 60 с.
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. Т.2. – М.: Наука, 1973. – 502 с.
5. *Термоэлектрические генераторы / Под ред. А.Р. Регеля.* – М.: Атомиздат, 1976. – 320 с.
6. *Черкасский А.Х.* Термоэлектрический насос. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
7. *А. с. 1394348 СССР, Л.П. Булат, Д.Д. Гуцал,* 1988.
8. *А. с. 1670723 СССР, В.С. Закардонец,* 1991.
9. *Bulat L.P., Zakordonets V.S.* Semiconductors thermal mechanical energy converter // Cold fusion source book, Hal Fox, USA, 1994. – P. 230–242.
10. *Peters F.* Thermoelemente und Nhermosoulen. Halle, 1998.
11. *Пат. 28983А, G01K17/10* Україна, В.С. Закардонец, 2000.

Надійшла 19.05.2010