

УДК 536.24



*Анатичук Л.І.*

**Анатичук Л.І.,** *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

## КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕПЛОВІ ВІДХОДИ

---

*У роботі проведено аналіз критерію ефективності термоелектричних перетворювачів енергії, що використовують відходи тепла (термоелектричних рекуператорів). Зроблено висновки, в яких випадках є економічно доцільним використання таких рекуператорів. Бібл. 7, рис. 2.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, утилізація відходів тепла.

### **Вступ**

*Загальна характеристика проблеми.*

Використання термоелектрики для утилізації відходів тепла з метою отримання електричної енергії протягом останніх майже трьох десятиріч було і залишається предметом інтересу спеціалістів, що займаються термоелектрикою. Серед них відходи тепла від двигунів внутрішнього згорання, металоплавильних печей, цементних печей, хімічної на нафтопереробної промисловості і багато іншого, де значна частина відпрацьованого тепла просто викидається у навколишнє середовище. Значне місце займають і відходи тепла у побуті [1, 2].

У зв'язку з всенаростаючою тенденцією боротьби з викидами CO<sub>2</sub> багато країн почали робити оцінку потенціалу своїх теплових відходів [3, 4]. У роботі [5] проаналізовано доступні статистичні дані і зроблено висновок, що у розвинутих країнах на долю промисловості приходить від 50 % до 80% енергії, споживаної країною в цілому. При цьому, в середньому 20 % від спожитої енергії втрачається з тепловими відходами, а в деяких країнах, таких як Ірландія, Туреччина, Іспанія, Кіпр, ця величина сягає 50 – 70 %.

Тому *актуальним* є створення термоелектричних генераторів (ТЕГ), які будуть використані в якості рекуператорів теплових відходів і повертати частину теплових втрат у вигляді електричної енергії.

Класична теорія термоелектричних генераторів визначає основним критерієм їх якості коефіцієнт корисної дії. Відмінністю у використанні термогенератора в ролі рекуператора є те, що відходи тепла є безкоштовними, і отже коефіцієнт корисної дії генератора не відіграє вирішальної ролі. *Актуальним* стає питання, яким критерієм варто оцінювати термоелектричні перетворювачі енергії, що будуть використовувати теплові відходи. Отже, виникає принципово нова ситуація щодо опису якості термоелектричного рекуператора.

*Метою даної роботи* є визначення критерію ефективності термоелектричного рекуператора, що використовує теплові відходи.

### Критерій якості ТЕГ в ролі рекуператора теплових відходів

В умовах, коли коефіцієнт корисної дії не є визначальним фактором для оцінки якості термоелектричного рекуператора, на перше місце має бути поставлено економічну доцільність використання ТЕГ в ролі рекуператора.

Виходячи з того, що результатом роботи ТЕГ є додаткова електрична енергія, його доцільно буде використовувати, якщо вартість виробленої ним електричної енергії буде економічно раціональною для її використання у кожному конкретному випадку, а при наявності електричної мережі має бути нижчою за вартість промислової електричної енергії. Зрозуміло, що у цю вартість у режимі рекуперації не входить ціна теплової енергії, яка визначається вартістю енергоносіїв, таких як вуглеводні, ядерне паливо і інше, оскільки відходи тепла безкоштовні.

Тому вартість електричної енергії  $m_0$ , що виробляє термоелектричний рекуператор визначатиметься наступним чином:

$$m_0 = \frac{S_0}{N}, \quad (1)$$

де  $S_0$  – питома вартість термоелектричного рекуператора,  $N$  – ресурс роботи.

Отже, у випадку використання ТЕГ в якості рекуператора відходів тепла на перше місце виходять вимоги до його мінімальної питомої вартості  $S_0$  та максимального ресурсу його роботи  $N$ .

У питому вартість рекуператора входять вартість самого генератора  $s_1$ , витрати на його установку і обслуговування  $s_2$ , витрати на відведення тепла від генератора  $s_3$  та витрати на стабілізацію напруги  $s_4$  (рис. 1). В залежності від умов експлуатації можуть мати місце і інші витрати.

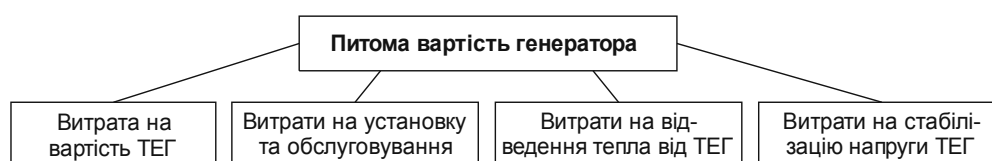


Рис. 1. Складові питомої вартості генератора.

Сукупність цих витрат формує питому вартість рекуператора  $S_0$  (\$/W), що є відношенням усіх витрат до його електричної потужності  $W$  :

$$S_0 = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4}{W}. \quad (2)$$

Оцінки показують, що у даний час ця величина складає біля 25 \$/W [6]. Згідно (1) цю величину потрібно мінімізувати.

З іншого боку, чим більший ресурс роботи генератора  $N$  (години), тим нижча вартість виробленої ним електричної енергії  $m_0$ .

Ресурс роботи термоелектричного рекуператора переважним чином залежить від ресурсу термоелектричних модулів, що використані в ТЕГ. Кращі зразки термоелектричних генераторних модулів, що спеціально розроблені для термоелектричних рекуператорів, мають ресурс роботи біля 100 000 годин [6].

Звідси можна оцінити мінімальну вартість електричної енергії термоелектричного рекуператора. Вона складатиме біля 0.25\$ за кВт·год. при умові забезпечення оптимальної температури на модулях ТЕГ.

При наявності промислових електричних мереж економічна доцільність використання ТЕГ в якості рекуператора досягається, коли вартість виробленої ним електричної енергії є нижчою, за вартість промислової електричної енергії, тобто при умові, коли

$$\frac{m}{m_0} > 1, \quad (3)$$

де  $m$  – вартість промислової електричної енергії,  $m_0$  – вартість електричної енергії, виробленої термоелектричним рекуператором.

Підставивши (3) в (1) отримуємо критерій ефективності термоелектричного рекуператора  $A$ , який повинен бути більше одиниці:

$$A = \frac{mN}{S_0} > 1. \quad (4)$$

Цей критерій і буде характеризувати доцільність використання термоелектричного генератора в якості рекуператора відходів тепла та визначатиме термін його окупності.

Термін окупності термоелектричного рекуператора  $N_0$  складатиме

$$N_0 = \frac{N}{A}. \quad (5)$$

Решту часу  $(N - N_0)$  рекуператор буде приносити прибуток. Чистий прибуток  $P$  від

використання термоелектричного рекуператора визначатиметься

$$P = mW(N - N_0). \quad (6)$$

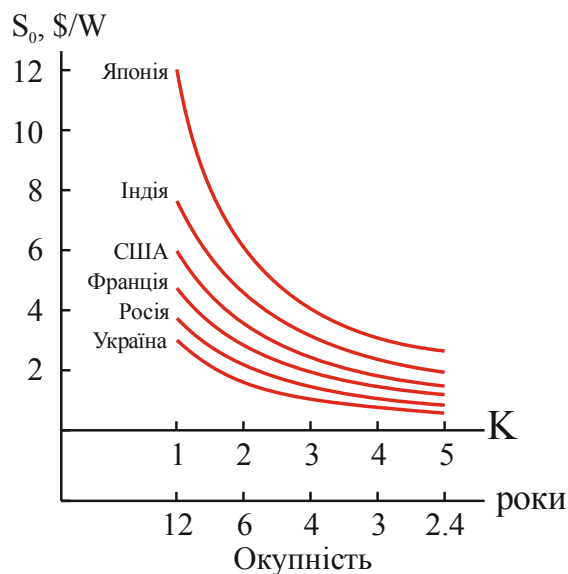


Рис. 2. Доцільна питома вартість ТЕГ у залежності від терміну окупності.

До прикладу, на рис. 2 наведено розрахунки доцільної питомої вартості термоелектричного рекуператора у залежності від часу окупності для різних країн. Питома вартість генератора визначалася, виходячи з ціни на електроенергію у тій чи іншій країні [7].

Як видно з рис. 2, на даний час для досягнення економічної доцільності застосування термоелектричних рекуператорів потрібно працювати у напрямку значного зниження його питомої вартості. Більш доцільним є використання термоелектричних генераторів у країнах, де електрична енергія є найдорожчою.

## Висновки

1. Отримано універсальний критерій А ефективності термоелектричних рекуператорів, у яких використовують відходи тепла. Ним визначається економічна доцільність використання рекуператора, термін окупності та прибуток, отриманий завдяки його використанню.
2. Встановлено, що економічно доцільним використання термоелектричного генератора є тоді, коли критерій  $A > 1$ .
3. Показано, що для зменшення терміну окупності термоелектричного рекуператора, і відповідно, збільшення чистого прибутку, необхідно збільшувати критерій А, тобто працювати у напрямку зниження питомої вартості рекуператора та збільшення його ресурсу роботи.
4. Економічно ефективніше застосування термоелектричних рекуператорів у країнах, де електрична енергія дорожча.

## Література

1. Neild Jr. A.B. "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.
2. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles. – 2017. – Vol. 6, № 2. – P. 1119-1124.
3. A. Heghmanns, S. Wilbrecht, M. Beitelschmidt, K. Geradts. Parameter Optimization and Operating Strategy of a TEG System for Railway Vehicles // Journal of Electronic Materials. DOI: 10.1007/s11664-015-4145-2
4. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator // Journal of Electronic Materials, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.
5. R. Kuz Dreams and realities of the use of thermoelectric generators in automobile transport. XVII International Forum on Thermoelectricity. Belfast, May 15-18, 2017.
6. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. - Berlin: Expert Verlag, 2011, P. 191 - 208.
7. <http://worldwideenergy.com>

Надійшла до редакції 20.08.2020

**Анатычук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут термоелектричества НАН и МОН України,

ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,

*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,

Черновцы, 58012, Украина

## **КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕПЛОВЫЕ ОТХОДЫ**

*В работе проведен анализ критерия эффективности термоэлектрических преобразователей энергии, использующих отходы тепла (термоэлектрических рекуператоров). Сделаны выводы, в каких случаях экономически целесообразно использование таких рекуператоров. Библ. 7, рис.2.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, утилизация отходов тепла.

**L.I. Anatyshuk** *acad. National Academy of  
Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS  
and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

*e-mail:* [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com)

## **EFFICIENCY CRITERION OF THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTERS USING WASTE HEAT**

*The paper analyzes the efficiency criterion of thermoelectric energy converters using waste heat (thermoelectric recuperators). Conclusions are drawn in which cases it is economically feasible to use such recuperators. Bibl/ 7, Fig. 2.*

**Key words:** thermoelectric generator, waste heat recovery.

### **References**

1. Neild Jr. A.B. (1963). *Portable thermoelectric generators*. Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A.
2. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. (2017). Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 6(2), 1119-1124.
3. Heghmanns A., Wilbrecht S., Beitelschmidt M., Geradts K. (2016). Parameter optimization and operating strategy of a TEG system for railway vehicles. *Journal of Electronic Materials*. DOI: 10.1007/s11664-015-4145-2
4. Bosch Henry (2016). From modules to a generator: An integrated heat exchanger concept for car applications of a thermoelectric generator (2016). *Journal of Electronic Materials*, 45(3). DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.
5. Kuz R. (2017). Dreams and realities of the use of thermoelectric generators in automobile transport. *XVII International Forum on Thermoelectricity* (Belfast, May 15-18, 2017).
6. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2011). Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. *Thermoelectrics goes automotive*. Berlin: Expert Verlag, P. 191 - 208.
7. <http://worldwideenergy.com>

Submitted 20.08.2020