УДК 338.552, 620.97

Маник Т.О., к.ф.-м.н.,
Буковинський державний
фінансово-економічний університет,
м. Чернівці;
Білинський-Слотило В.Р.,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
м. Чернівці

Економічні та термоелектричні характеристики рекуператорів тепла, як альтернативних джерел електроенергії

Представлено порівняльну характеристику виробленої електроенергії та аналіз альтернативних джерел. Відмічено значну роль термоелектричних перетворювачів надлишкової теплової енергії автомобільного транспорту, відходів промисловості та ін. Приведено моделі відомих термоелектричних рекуператорів та спроектованих секційних, каскадних структур з розрахунком їх економічних та термоелектричних характеристик. Встановлено, що вартість матеріалів для виготовлення секційного модуля в 1,6 разів менша порівняно з каскадним, проте коефіцієнт корисної дії останнього більший. Розраховані параметри проектованих структур вказують на можливість ефективного використання термоелектричних рекуператорів теплових відходів.

Ключові слова: *рекуператор, термоелектричний модуль, ефективність, вартість.*

Представлено сравнительную характеристику производимой электроэнергии и анализ альтернативных источников питания. Отмечено значительную роль термоэлектрических преобразователей избыточной тепловой энергии автомобильного транспорта, отходов промышлености и др. Приведены модели известных термоэлектрических рекуператоров и спроектированных секционных, каскадных структур с расчетом их экономических и термоэлектрических характеристик. Установлено, что стоимость материалов для изготовления секционного модуля в 1,6 раза меньше по сравнении с каскадным, однако коэффициент полезного действия последнего больший. Рассчитанные параметры проектируемых структур указывают на возможность эффективного использования термоэлектрических рекуператоров тепловых отходов.

Ключевые слова: *рекуператор, термоэлектрический модуль, эффективность, стоимость.*

The comparative characteristic of the electricity produced and analysis of alternative power sources are presented. A significant role of thermoelectric converters excess heat energy of automobile transport, industrial wastes, etc. is noted. Models of known thermoelectric recuperators and designed of sectional and cascade structures with the calculation of their economic and thermoelectric properties are given. Established that the cost of materials for the manufacture of sectional module is less than 1.6 times when compared with a cascade, but the efficiency of the latter is greater. The calculated parameters of designed structures indicate the possibility of the effective use of thermoelectric recuperators of waste heat.

Key words: *recuperator, thermoelectric module, efficiency, cost.*

Постановка проблеми. Отримання і перетворення енергії – один з найважливіших напрямків діяльності сучасної цивілізації, що лежить в основі її

існування. Оскільки для практичних застосувань зручною і універсальною формою енергії є електрична, то особливе значення має розробка ефективних методів її отримання.

У сучасному суспільстві, коли постійно зростають ціни на енергоносії і є очевидним дефіцит землі для будівництва нових електростанцій, колишній шлях розвитку енергетики стає неефективним. У той же час поновлювані джерела енергії практично не вимагають додаткових площ; ресурси, що на них витрачаються – практично невичерпні, а собівартість кіловат-години стрімко прямує до значень, типових для традиційних технологій генерації електроенергії.

Використання відновлюваних джерел є одним з перспективних напрямків, а сам їх розвиток останнім часом викликає багато дискусій та є надактуальним питанням енергоресурсозбереження. Перехід на альтернативну енергетику в свою чергу сприяє вирішенню й екологічних проблем.

Світові екологічні проблеми, особливо глобальне потепління, спричинене виділенням вуглекислого газу, визнані серйозними та важливими. Для зменшення їх впливу на навколишнє середовище, найважливішим вважається ефективне використання енергії, одним із практичних шляхів якого є використання в енергетичних системах надлишкового тепла з промислового, приватного і транспортного секторів. Проте ефективно використовувати скидне тепло не завжди легко через неузгодженості по температурі, місцю і часу між споживанням і подачею тепла. Оскільки електрика є найкориснішим джерелом енергії, тому вигідно перетворювати скидне тепло саме в електрику. Проте, ефективне перетворення різних видів маломасштабного, нестабільного і розсіяного скидного тепла – проблема непроста.

Таким чином, технологіям термоелектричного генерування приділяється значна увага завдяки їх високому потенціалу. Однак, невисока ефективність генераторних модулів, зумовлена насамперед низькою добротністю використаних матеріалів, стримує масове використання термоелектричних генераторних пристроїв для рекуперації надлишкового тепла. Тому, актуальним є розгляд вже існуючих термоелектричних генераторних модулів випущених різними компаніями, вартість 1 Вт вихідної потужності в максимальному діапазоні робочих температур та можливість створення нових ефективних, дешевих термоелектричних структур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Усе більшу увагу науковців привертають дослідження і розробка термоелектричних перетворювачів, як альтернативних джерел енергії [1, 2]. Тим не менше, оцінка можливостей підвищення ефективності даних перетворювачів проводиться шляхом використання матеріалів з вищою добротністю та вибором конструкції термогенераторних модулів [3].

Постановка завдання. Вирішення поставленої проблеми, в нашій роботі, передбачає: розгляд перспектив для використання альтернативних джерел електроенергії, зокрема і перетворення скидного тепла автомобільного транспорту, промисловості, та ін.; встановлення доступності 1 Вт рекуперованої електроенергії термоелектричними модулями різних компаній;

розрахунок вартості 1 Вт виробленої електроенергії спроектованих секційних та каскадних структур, що володіють достатньо високими термоелектричними параметрами, з врахуванням ціни вихідних елементів термоелектричних матеріалів віток термоелементів без оцінки технологічних особливостей їх виготовлення.

Виклад основного матеріалу. До традиційних джерел електроенергії відносять теплові (вугілля, газ, нафта), гідро- і атомні електростанції. З усієї одержуваної світовою економікою первинної енергії всього 11 % (рис. 1) припадає на відновлювані джерела (вітер, сонячне випромінювання, морські припливи, геотермальні джерела), дещо більше 6 % виробляється атомною енергетикою і майже 80 % світових потреб в первинній енергії забезпечують непоновлювані природні ресурси (нафта, вугілля, газ) [4].

Рис. 1. Відсотки виробленої світової електроенергії різними джерелами

Сьогодні, в Україні потенціал альтернативних джерел енергії використовується на 2 % [5]. Однією з причин такого стану є слабкий розвиток вітчизняного ринку виробництва необхідного обладнання.

Термоелектрика є перспективним науково-технічним напрямком, який заснований на використанні прямого, безмашинного перетворення теплової енергії в електричну, шляхом використання термоелектричних ефектів. Термоелектричні перетворювачі енергії мають ряд привабливих властивостей, серед яких: відсутність рухомих частин, можливість функціонування без обслуговування, незалежність роботи від орієнтації в просторі та за умови відсутності земного тяжіння, практично необмежений ресурс роботи, стійкість до екстремальних навантажень.

Найбільш перспективним застосуванням термоелектрики із наслідками для «зелених технологій», безсумнівно, є рекуперація теплових втрат, зокрема автомобільного транспорту й інших відходів для повторного їх застосування (перетворення в електричну енергію), з метою економії палива та зменшення

викидів парникових газів [1, 6]. Рівень температур таких джерел тепла становить 500-600°С. Типовий автомобіль використовує 25 % спожитої енергії палива для охолодження двигуна, 40 % корисної енергії передається валу, а 35 % втрачається у вихлопній системі [7]. Один із способів підвищення ефективності двигуна полягає у поверненні тієї частини енергії, яка втрачається у вихлопній системі. Згідно з цим принципом відпрацьоване тепло, як правило від вихлопних газів, перенаправляється до термоелектричного генератора для отримання електрики, котра є альтернативою енергії виробленої генератором змінного струму (її отримання передбачає витрату певної потужності двигуна). У результаті цього отримується більша потужність для приведення в рух автомобіля і при цьому генерується електрика. Одним з центральних питань підвищення ефективності термоелектричних генераторів – збільшення ефективності, показників ресурсної і циклічної стійкості термоелектричних модулів.

Термоелектричні генераторні модулі з однорідних матеріалів виробляються такими компаніями світу:

- «Hi-Z Technology, Inc.» (США);
- «Global Thermoelectrics» (Канада);
- «НПП Біапос» (Росія);
- «Кріотерм» (Росія);
- «Кристал» (Росія);
- «KELK Ltd (Komatsu Ltd)» (Японія) та інші.

Ефективність серійних модулів цих компаній не перевищує 5,8 %. Так, наприклад, ефективність модулів компанії Hi-Z, виготовлених з матеріалу на основі Bi_2Te_3 за умови $T_{гар}$=230ºС, $T_{хол}$=30ºС знаходиться в межах 4,5–5,0 %, електрична потужність модулів – від 2,5 до 20 Вт, вартість – відповідно від 46 до 154 $. Максимальна ефективність генераторних модулів виробництва «Біапос» та «Кріотерм» складає відповідно 4,0 та 5,8 %. Деякі характеристики модулів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри термоелектричних модулів деяких компаній та ціна вата електроенергії

№ п/п	Виробник	Модель	Ефективність, %	Потужність, Вт	Вартість 1 Вт, $
1.	Кріотерм	TGM-199-1,4-1,5	2,4	2,39	25,25
2.	Komatsu Ltd	50x50x4.2 мм^3	7,2	24	11,25
3.	Hi-Z Technology, Inc.	Hi-Z - 20	4,5	19	11
4.	Кристал	G-127-1.4-1.6-L-S	4,2	2,42	16,5

Однак широке використання термоелектричних генераторів стримується тим, що в даний час вони мають недостатньо високу ефективність та високу вартість. Тому є актуальним постановка таких досліджень і розробка технологій, якими б розв’язувались проблеми підвищення ефективності

модулів, зниження їх вартості до рівня рентабельності їх широкого практичного використання.

Значну частку досліджень займає проектування і розрахунок характеристик генераторних модулів, за допомогою програмних пакетів скінченно-елементного моделювання. Наприклад, в роботах [8; 9] проведена оцінка можливості збільшення ефективності термоелектричних модулів, шляхом використання секційних і каскадних структур в програмному комплексі Comsol Multiphysics. Вартість матеріалів, використаних в якості термоелементів генераторних модулів приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вартість вихідних термоелектричних матеріалів

№ п/п	Матеріал термоелементу	Ціна, $/кг
1.	n - $Bi_2(Te_{0,8}Se_{0,2})_3$	81,5
2.	p-$(Bi_2Te_3)_{0,24}(Sb_2Te_3)_{0,76}$	95,84
3.	n - $Sb_{0,004}Pb_{0,996}Te_{0,88}S_{0,12}$	55,5
4.	p- PbTe+2mol%Na+4mol%SrTe	61,37

Слід відмітити, що дані таблиці 2 обчислено з використанням вартості вихідних елементів [10] і їх вмісту в твердих розчинах без врахування затрат на виготовлення та підготовку кристалів.

Спроектовано двосекційний модуль (схема якого приведена на рис. 2 а) з 56 пар термоелементів, висотою віток – 5,6 мм і площею їх поперечного перерізу – 4,3×1,8 мм^2 [8]. Визначення оптимальних висот секцій двосекційного термоелемента на основі Bi_2Te_3 / PbTe дало можливість розрахувати основні характеристики двосекційного модуля, що працює в температурному інтервалі 30–500ºС: максимальний коефіцієнт корисної дії складає 13,4 %, а електрична потужність – 17 Вт. При цьому вартість вихідних компонентів термоелектричних матеріалів на 1 Вт потужності модуля становить 0,17 $.

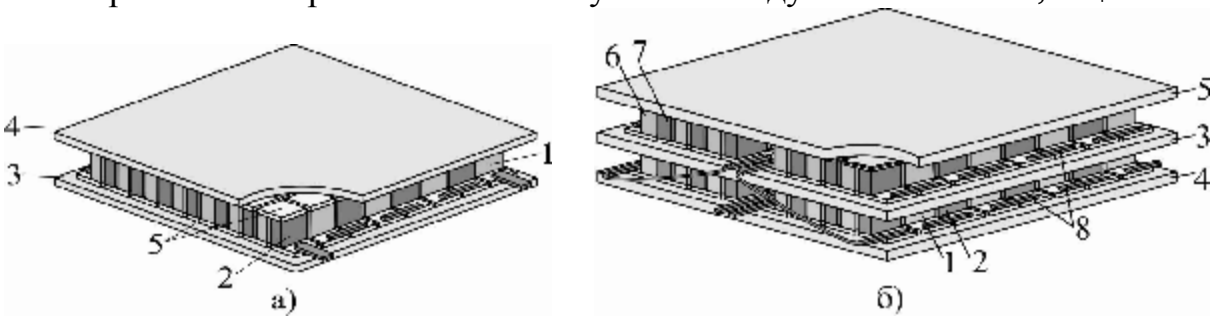

Рис. 2. Схема термоелектричного: а) двосекційного модуля (1, 2 –вітки n- і p-типу провідності, 3, 4 – холодна і гаряча кераміка, 5 – електрична комутація); б) двокаскадного модуля(1, 2 – вітки n- і p-типу провідності холодного каскаду, 3 – теплопровідна пластина, 4, 5 – холодна і гаряча кераміка, 6,7 – вітки n- і p-типу гарячого каскаду, 8 – електрична комутація).

Розраховано двокаскадний модуль для температурного інтервалу 30-500ºС (схема якого приведена на рис.2 б), кількість пар термоелементів – 48, площа поперечного перерізу віток в обох каскадах – 4,3×1,8 мм^2, висота віток якого –

3,3 мм для холодного та 2,7 мм для гарячого каскадів. Ефективність такого модуля складає 15,1 %, а електрична потужність – 9,8 Вт. В той же час, вартість вихідних компонентів термоелектричних матеріалів на 1 Вт потужності модуля приймає значення 0,27 $.

Отримана величина ефективності проектованих секційних та каскадних структур вказує на можливість збільшення ефективності термоелектричних рекуператорів теплових відходів.

Висновки. У роботі представлено порівняльну характеристику виробленої світової електроенергії різними джерелами та висвітлено вклад альтернативної енергетики. Слід відмітити, що значну роль у збереженні екологічної ситуації відіграють перетворювачі надлишкової теплової енергії зумовленої викидами автомобільного транспорту, промисловості, робота яких ґрунтується на використанні термоелектричних ефектів.

Приведено моделі термоелектричних модулів різних компаній світу, їх параметри та вартість 1 Вт вихідної потужності. Зображено приклади спроектованих секційних і каскадних структур, з розрахунком їх вартісних характеристик. Встановлено, що вартість затрат на матеріали для вироблення 1 Вт електроенергії секційного модуля в 1,6 раз менша в порівнянні з каскадним модулем. Проте ефективність каскадного модуля складає 15,1 %, в той час, як секційний – 13,4 %. Тому, враховуючи необхідні конструктивні особливості і вихідні параметри проводять вибір тієї чи іншої структури для конкретних потреб.

Список використаних джерел

1. Коржуев М.А. О конфликте двигателей внутреннего сгорания и термоэлектрических генераторов при рекуперации тепловых потерь в автомобилях / М.А. Коржуев // Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, № 4. – С. 8–15.
2. LaGrandeur J. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications / J. LaGrandeur // FY 2006 Progress Report for Advanced Combustion Engine Technologies. – 2006. – P. 232–237.
3. Михайловский В.Я. Термоэлектрические каскадные модули из материалов на основе Bi_2Te_3–PbTe–TAGS / В.Я. Михайловский, В.Р. Билинский-Слотыло // Термоэлектричество. – 2012. – № 4. – С. 71–78.
4. Швецов Д. Автоматизация на службе альтернативной энергетики – перспективный альянс / Дмитрий Швецов // Современные технологии автоматизации. – 2011. – № 1. – С. 48–53.
5. Славута Е.И. Перспективы и проблемы развития альтернативной энергетики в Украине / Е.И. Славута, В.В. Звягина // Экономические проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального хозяйства на современном этапе: II международная научно-практическая конференция, 20–22 октября 2010 г.: тезисы докл. – Х., 2010. – С. 393–396.
6. Сакр К.М. Тепловой расчет термоэлектрических генераторов, работающих на выхлопных газах автомобилей: цели и задачи / К.М. Сакр, М.К. Мансур, М.Н. Мусса // Термоэлектричество. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
7. Rhonda R. Willigan Cost-Effective Fabrication Routes for the Production of Quantum Well Structures and Recovery of Waste Heat from Heavy Duty Trucks / R. Willigan Rhonda // FY 2006 Progress Report for Advanced Combustion Engine Technologies. – 2006. – P. 237–241.

8. Manyk T.O. Modelling of thermoelectric modules for low-grade heat recovery / T.O. Manyk, V.R. Bilynskyj-Slotylo // Фізика невпорядкованих систем (PDS-2013): V міжнародна конференція, 14–17 жовтня 2013 р. : тези допов. – Львів, 2013. – С. 49.

9. Маник Т.О. Проектирование секционных генераторных модулей из материалов на основе Bi_2Te_3 и PbTe / Т.О. Маник, В.Р. Билинский-Слотыло // Современные информационные и электронные технологи: 14 международная научно-практическая конференция, 27–31 мая 2013 г.: тезисы докл. – Одесса, 2013. – С. 112–114.

10. Mineral commodity summaries 2013. U.S. Geological Survey. – Reston : Virginia, 2013. – 198 p.