

## Виробництво електроенергії з джерел тепла в польових умовах за допомогою термоелектричних модулів Пельтьє

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*У цій роботі проводиться аналіз різних аспектів використання термоелектричних модулів, включаючи вибір оптимальних матеріалів, оптимізацію геометрії модулів та ефективність перетворення теплової енергії в електричну на основі армії США. Експериментальні результати підтверджують можливість виробництва електроенергії з джерел тепла на полі бою за допомогою термоелектричних модулів Пельтьє та демонструють потенціал цієї технології для забезпечення стабільного живлення електроніки та різних пристроїв на полі бою.*

**Ключові слова:** Виробництво електроенергії, джерела тепла, термоелектричні модулі Пельтьє, поле бою, альтернативні джерела енергії, оптимізація, ефективність, експериментальні результати, стабільне живлення, електроніка, пристрої.

### *Abstract*

*This study conducts an analysis of various aspects of utilizing thermoelectric modules, including the selection of optimal materials, module geometry optimization, and the efficiency of converting thermal energy into electrical energy with taking into account the U. S. army. Experimental results confirm the feasibility of electricity generation from heat sources on the battlefield using Peltier thermoelectric modules and demonstrate the potential of this technology in providing stable power supply to electronics and various devices on the battlefield.*

**Keywords:** Electricity generation, heat sources, Peltier thermoelectric modules, battlefield, alternative energy sources, optimization, efficiency, experimental results, stable power supply, electronics, devices.

## Вступ

Впровадження термоелектричної системи малого форм-фактора для солдатів має потенціал змінити парадигму енергетичного забезпечення на полі бою та покращити бойові можливості.

Подальша робота в галузі розробки та вдосконалення термоелектричних систем принесе значний внесок у військову технологію та забезпечить перевагу на полі бою.

Завдяки новим подібним технологіям, ми зможемо забезпечити солдатів ефективним джерелом енергії на полі бою, зменшити залежність від традиційних джерел палива та полегшити їх навантаження. Крім того, впровадження термоелектричних систем у військові операції може мати великий вплив на екологічний аспект, зменшуючи викиди шкідливих речовин і зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Дане рішення вироблення енергії також має потенціал для цивільного застосування, особливо у віддалених районах або в екстремальних умовах. Наприклад, він може бути використаний для забезпечення енергії віддаленим поселенням, допомогти урядовим агентствам у наданні допомоги під час стихійних лих або створити ефективні енергетичні рішення для аварійних ситуацій.

Впровадження цих технологій відкриває нові можливості у сфері енергетичного забезпечення на полі бою, сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел палива та має потенціал для широкого застосування як у військовій, так і в цивільній сферах [1].

## Результати дослідження

Збройні сили США використовують велику кількість палива під час розгортання та операцій на полі бою. Тому, метою стала ідея розробити легкий прототип удосконаленої термоелектричної (ТЕ) системи малого форм-фактора, переносної для солдатів, для рекуперації та перетворення відпрацьованого тепла від різного розгорнутого військового обладнання (тобто дизельних генераторів/двигунів, сміттєспалювальних установок, транспортних засобів і потенційно мобільних кухонь), з кінцевою метою виробництва енергії для заряджання солдатських акумуляторів, розширеного заряджання конденсаторів та інших застосувань живлення на полі бою.

Технічний підхід використовує технологію мікроканалів, унікальний підхід до «панелі живлення» для інтеграції системи теплообміну/ТЕ та нові характерні матеріали LAST (свинець-сурма сріблястий телурид) і LASTT (свинець-сурма-срібло-олов'яний телурид) ТЕ, сегментовані за допомогою ТЕ-матеріали телуриду вісмуту при розробці силового модуля ТЕ з сегментованими елементами та системи [2].

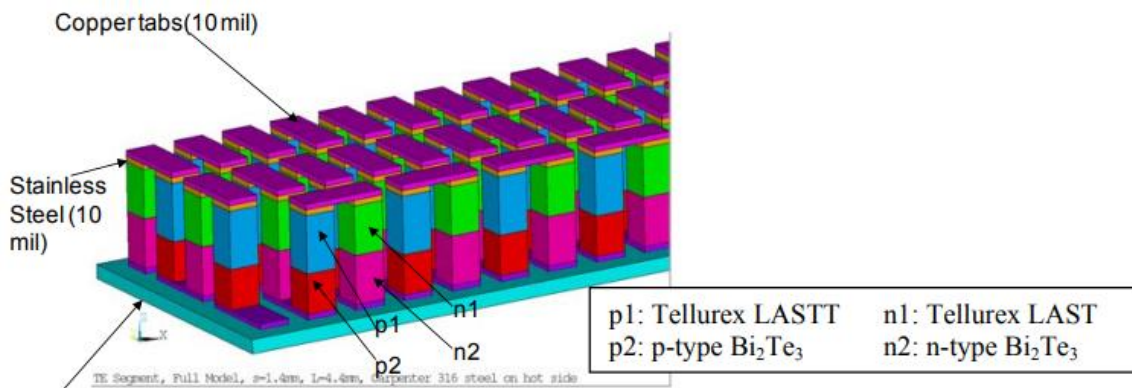


Рисунок 1 - Структурна модель ANSYS дизайну модуля Tellurex ТЕ (конфігурація 49 пари) [2].

Основні проблеми системної інтеграції при проектуванні компактного прототипу ТЕ системи, є чергування шарів тонких мікроканалних теплообмінників (гарячих і холодних), що містять тонкі сегментовані ТЕ генератори електроенергії.

Властивості ТЕ, структурні властивості та поведінку термічної втоми гарячепресованих і спечених (НПС) матеріалів LAST і LASTT, так що були виготовлені та випробувані перші сегментовані ТЕ модулі з використанням матеріалів LAST / LASTT. Матеріали р-типу LASTT мають значення ZT 1,0 при 700 K, тоді як мета для цих матеріалів р-типу становила приблизно 1,2 при 700 K. Коефіцієнти потужності LASTT р-типу, хоча й покращилися під час розробок приблизно до 17 мкВт/см<sup>2</sup>-K<sup>2</sup> при 600-700 K не виправдав очікуваних 20-22 мкВт/см<sup>2</sup>-K<sup>2</sup> при 600-700 K.

Матеріали LAST n-типу демонструють значення ZT 1,0 при 700 K порівняно з цільовим значенням 1,5 при 700 K. Хоча коефіцієнти потужності матеріалу LAST n-типу були значно покращені до 16-26 мкВт/см<sup>2</sup>-K<sup>2</sup> при 700 K, теплова провідність цих матеріалів LAST n-типу залишається занадто високою для досягнення мети ZT n-типу [3].

Матеріали НПС (гарячого пресування та спекання) LAST і LASTT демонструють хороші характеристики термічної втоми, де модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона залишалися незмінними протягом 200 термічних циклів від 40 °C до 400 °C. Усі матеріали LAST n-типу показують поверхневі вклучення, які часто призводять до розколювання поверхні, що потребує подальшого дослідження.

Міцність кільця на кільці (ROR) для готових (не термічно втомлених) LAST і LASTT порівнянню з міцністю ROR, виміряною на комерційно доступному Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (~ 30 МПа) не значна. Злам «кільце на кільце» для LASTT (р-тип) показує діапазон значень міцності на розрив приблизно від 25 МПа до 40 МПа протягом до 200 циклів термічної втоми та не погіршується суттєво під час термічного циклу. Уточнені дані про руйнування LAST демонструють діапазон значень міцності приблизно від 15 МПа до 38 МПа протягом від 0 до 200 циклів термічної втоми [4].

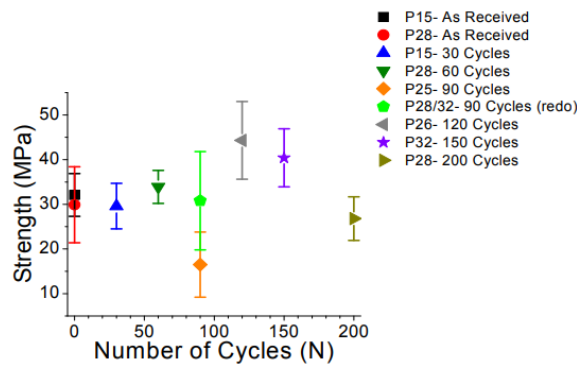
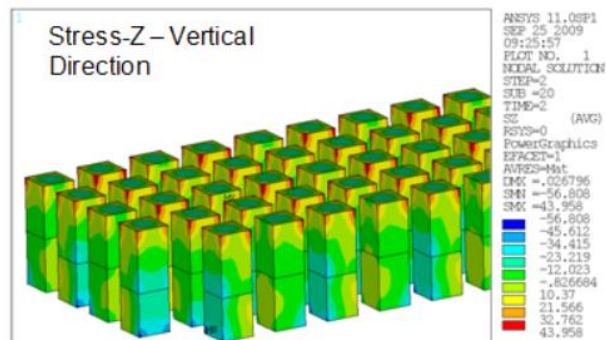
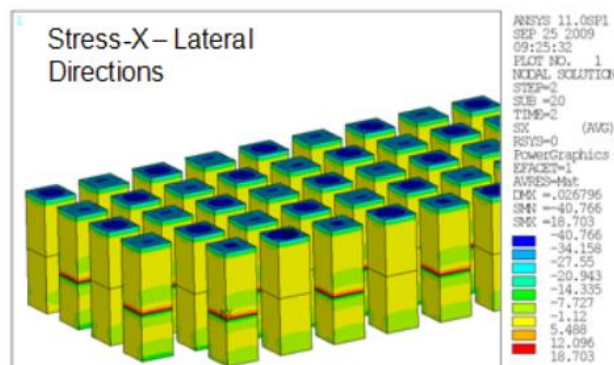


Рисунок 2 - Міцність кільця на руйнування (ROR) як функція кількості циклів термічної втоми для LASTT р-типу, циклічно проведених у великій камері термічної втоми. Для чисел у дужках біля графічних символів (i,j), перше число «i» вказує на кількість отриманих дійсних руйнувань, а друге число «j» вказує на загальну кількість зразків, руйнованих під час даної термічної обробки [4].

Одна з останніх удосконалених моделей – LAST (N37) зберігає механічну міцність близько 30 МПа (26 МПа  $\pm$  4 МПа) після 200 циклів термічної втоми. Термоелектричний, термічний і структурний аналіз зрештою приводить до успішного сегментування цих матеріалів LAST і LASTT з телуридом вісмуту та електрично з'єднані між собою матеріалами дифузійного бар'єру та мідною стрічкою в межах робочих модулів ТЕ. Ці ТЕ модулі були успішно випробувані при  $T_h = 400\text{ }^\circ\text{C}$  і  $T_c \approx 40\text{ }^\circ\text{C}$  без структурних пошкоджень. Остаточний тестований модуль ТЕ досяг ефективності перетворення 6,56% при температурі холодної сторони  $95\text{ }^\circ\text{C}$ , подальші аналізи показують, що він міг би досягти ефективності перетворення значно вище 7% при  $T_c \approx 40\text{ }^\circ\text{C}$ . Цільова ефективність конструкції модуля ТЕ у 9% важко досягнути головним чином через те, що сторонні внутрішні опори інтерфейсу, хоча й зменшуються з кожною новою збіркою модуля, все ще занадто високі [5].



А) Конструкційні напруги в напрямку X-Y (бічні).



Б) Конструкційні напруження в напрямку Z (вертикальні).

Рисунок 3 - Структурні напруги елемента в бічних напрямках X-Y і вертикальному напрямку Z для ТЕ-елементів 4,4 мм X 1,4 мм X 1,4 мм (одиниці напруги — МПа) [5].

Компактна конструкція системи ТЕ була розроблена для виробництва 1,4-1,5 кВт електричної енергії (трохи нижче початкової мети в 1,6 кВт) з використанням цих нових модулів ТЕ (з ефективністю перетворення 9%) з відпрацьованого тепла вихлопних газів тактичних тихих генераторів 60 кВт як демонстраційні автомобілі [6].



Рисунок 4 - Перші модулі ТЕ з використанням нових сегментованих елементів LAST / LASTT / телуриду вісмуту [6].

Конструкція системи включає високоефективні мікроканалні теплообмінники з гарячою стороною, розроблені для забезпечення теплового потоку 5,6-12 Вт/см<sup>2</sup> до модулів ТЕ, причому цей тепловий потік з гарячої сторони значно перевищує цільове початкове проектування 2,9 Вт/см<sup>2</sup>. Конструкція системи також включає високоефективні мікроканалні теплообмінники холодної сторони, здатні поглинати тепловий потік 11 Вт/см<sup>2</sup> під час охолодження системи ТЕ. Корисні, гнучкі та модульні конструкції систем ТЕ були розроблені для тактичних тихих генераторів потужністю 30 кВт і 60 кВт [7].

### Пропозиція

На основі вище викладеного матеріалу виникла пропозиція створювати пічки із термо електричними генераторами на основі елементів Пельть'є, для забезпечення бійців ЗСУ джерелом енергії, що допоможе в польових умовах підзарядити обладнання.

Для даного завдання можна використати термоелектричний генераторний модуль вітчизняного виробництва MTG1,3-1,7-275T2GS від науково-виробничої фірми "Модуль". Характеристики даного модуля:

**Теплові та електричні параметри:**

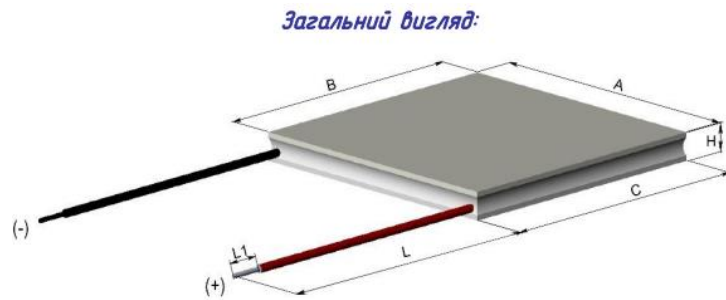
Температура гарячої сторони ( $T_h$ )	°C	200	150	100
Температура холодної сторони ( $T_c$ )	A	50	50	50
Напруга розімкненого кола ( $V_{oc}$ )	B	17,9	11,8	5,8
Сила струму короткого замикання ( $I_{sc}$ )	A	1,6	1,1	0,6
Опір узгодженого навантаження ( $R_{opt}$ )	Ом	11,4	10,5	9,5
Сила струму через опір узгодженого навантаження ( $I_{opt}$ )	A	0,8	0,6	0,3
Потужність на узгодженому навантаженні ( $P_{max}$ )	Вт	7,0	3,3	0,9
Ефективність при узгодженому навантаженні ( $\eta$ )	%	5,0	3,8	2,1
Тепловий опір модуля, ( $R_t$ )	°C/Вт	1,42	1,62	1,72
Електричний опір модуля при температурі навколишнього середовища 27 °C ( $R$ )	Ом	7,8		
Максимальна робоча температура	°C	200		
Температура розплавлення	°C	227		

Допуск на теплові та електричні параметри:  $\pm 10\%$ .

Рисунок 5 – Теплові та електричні параметри термоелектричного генераторного модуля MTG1,3-1,7-275T2GS [8].

Як можна побачити із параметрів, при температурній різниці між гарячою та холодною стороною в 150°C потужність при узгодженому навантаженні буде становити 7 Ват. Проте, для стабільної та довшої роботи даного модуля потрібно дотримуватися різниці робочої температури в 100°C.

Для розміщення на пічці, розглянемо розміри та загальний вигляд термоелектричного генератора:



**Геометричні параметри:**

Ширина (розмір A)	мм	$40+0,5/-0,1$
Довжина (розмір B)	мм	$40+0,5/-0,1$
Довжина (розмір C)	мм	$40+0,5/-0,1$
Товщина (розмір H)	мм	$4,3\pm 0,3$
Паралельність	мм	0,1
Площинність	мм	0,1

Рисунок 6 – Загальний вигляд та геометричні розміри термоелектричного генераторного модуля MTG1,3-1,7-275T2GS [8].

Можемо зробити висновок, що на пічці із довжиною в 1100 мм, можна розмістити 8 елементів на стінці із проміжком в 100 мм та початковим відступом від краю в 40 мм. Так як даний елемент працює на різниці температур, для холодної сторони потрібне охолодження під час використання. Тому пропонуються різні варіанти:

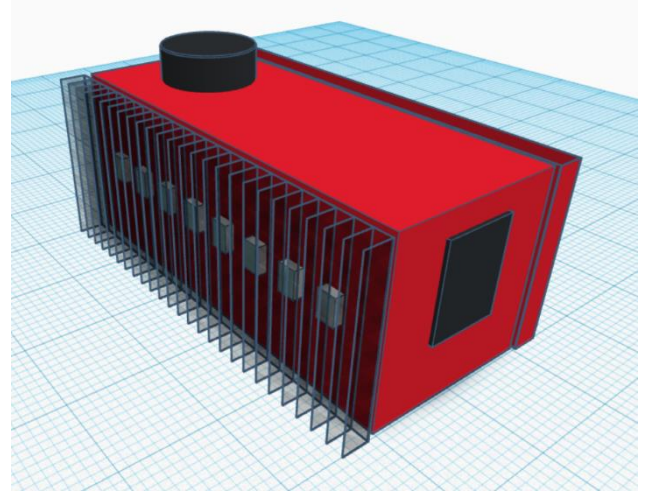
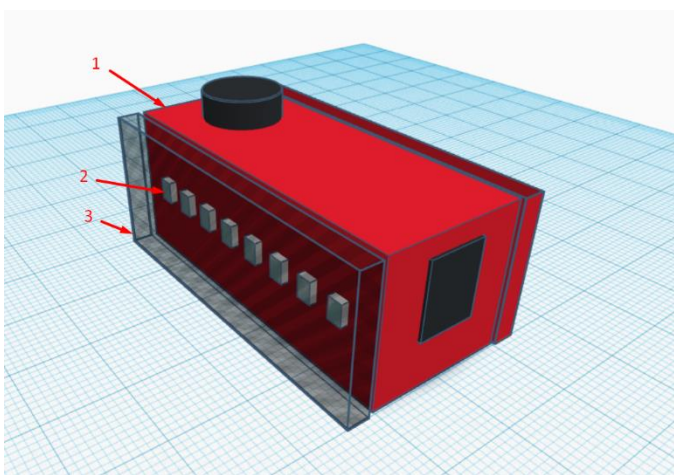


Рисунок 7 – 3D представлення пічки із термоелектричними елементами: 1) Пічка; 2) Термоелектричний генераторний модуль MTG1,3-1,7-275T2GS; 3) Контейнер для води (в теплу пору року)/ снігу (в холодну пору року).

Рисунок 8 – Пічка із радіаторним охолодженням.

На рисунку 7 зображено розміщення термоелектричних модулів, а також контейнери по боках стінок для охолодження. Наповнення контейнерів залежить від пори року. Між контейнером та термогенератором потрібно наносити термопасту, для збільшення тепловідведення та підвищення

ефективності елемента. На рисунку 8 зображений ще один можливий варіант пасивного охолодження – поздовжній радіатор із нанесеною термопастою в місцях прилягання термогенераторів.

Кабелі, що будуть йти поруч із гарячою поверхнею печі (вихідні кабелі термогенераторів) можна захистити трубкою із кембрику термостійкого із скловолокна, що відмінно захищає кабель при максимальній робочій температурі 250°C

Для використання генерованої енергії можна з'єднати елементи послідовно та під'єднати їх до регульованого DC-DC підвищуючого перетворювача напруги і під'єднувати пристрої напряму, або із використанням USB хаба на декілька вихідних портів. Також, за потреби можна додати акумулятори, щоб згенеровану енергію можна було використати при потребі.

## Висновки

Впровадження термоелектричної системи малого форм-фактора для солдатів має потенціал змінити парадигму енергетичного забезпечення на полі бою та покращити бойові можливості. Подальша розробка та вдосконалення таких систем може допомогти забезпечити солдатів ефективним джерелом енергії, зменшити залежність від традиційних джерел палива та полегшити їх навантаження. Такі технології можуть мати великий вплив на екологічний аспект військових операцій та мати потенціал для застосування в цивільній сфері. Впровадження термоелектричних систем відкриває нові можливості у сфері енергетичного забезпечення та має потенціал для широкого застосування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Z.H. Dughaiash, "Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation," Physica B, vol. 322, pp. 205-223, (2002).
2. V.N. Kaliakin, Introduction to Approximate Solution Techniques, Numerical Modeling, and Finite Element Methods, Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.
3. Laws, N. and Brockenbrough, J.R., The effect of micro-crack systems on the loss of stiffness of brittle solids, Int.J. Solids Structures, 23 (9): 1247-1268, 1987.
4. Budiansky, B. and O'Connell, R.J., Elastic moduli of a cracked solid, Int. J. Solids Structures, 12: 81-97, 1976.
5. "Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexure Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperatures," ASTM C 1499, Vol. 15.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2007.
6. A. A. Wereszczak, T. P. Kirkland, O. M. Jadaan, and H. Wang, Strength of Bismuth Telluride, Ceramic Engineering and Science Proceedings, Wiley InterScience, New York, preprint, to be published 2009.
7. E. D. Case, "The Saturation of Thermomechanical Fatigue in Brittle Materials", 137 – 208 in ThermoMechanical Fatigue and Fracture, WIT Press, Southampton, UK, 2002.
8. Термоелектричний генераторний модуль MTG1,3-1,7-275T2GS Специфікація [Електронний ресурс] // Науково-Виробнича Фірма "Модуль" – Режим доступу до ресурсу: <https://spf-modul.com.ua/ua/p1653173189-mtg13-275t2gs-40h40.html>.

**Онiщук Микола Олександрович** — студент групи РТ – 22м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [onisukmikola3@gmail.com](mailto:onisukmikola3@gmail.com).

**Томчук Микола Антонович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Чернишов Костянтин Андрійович** — аспірант кафедри програмного забезпечення, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Onishchuk Mykola O.** — student of RT – 22m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [onisukmikola3@gmail.com](mailto:onisukmikola3@gmail.com).

**Tomchuk Mykola A.** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Life Safety and safety pedagogy, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Konstantin Chernyshov. A.** — Vinnytsia National Technical University, Postgraduate Student of Software Department, Vinnytsia