

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-37-48>

УДК 621.3.082.62:629.1.04

АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПЕЛЬТЬЄ З ЕПОКСИДНИМ КОМПАУНДОМ ДЛЯ СУДНОВИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ

Кириченко О.С.

ANALYSIS OF THE PELTIER DEVICE WITH EPOXY COMPOUND FOR SHIP AUTOMATED COOLING AND THERMOSTABILIZATION SYSTEMS

Kyrychenko O.S.

У суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації важливо забезпечити ефективний контроль теплових режимів в умовах підвищеної вологості та механічних навантажень. Через це в даних суднових системах використовуються пристрої Пельтьє на основі термоелектричних модулів, які є перспективними завдяки компактності, надійності та відсутності рухомих частин. Ефективність роботи зазначених пристроїв значною мірою залежить від їх конструктивних особливостей, вибору матеріалів і теплових характеристик. Дослідження спрямоване на аналіз впливу модифікованого епоксидного компаунду на експлуатаційні властивості пристроїв Пельтьє, що може забезпечити їхню довговічність і стабільність роботи в морських умовах.

Проведено аналіз електричних, теплових і механічних процесів у пристроях Пельтьє через систему диференціальних рівнянь у матричній формі. Для моделювання й оптимізації конструкції чисельно виконано розрахунок, що дозволив встановити розподіл температурних і механічних параметрів у матеріалах пристрою. Проаналізовано вплив епоксидного компаунду на ефективність відведення тепла, а також робочі характеристики розглянутого пристрою, включно з теплопередачею, структурною цілісністю і механічною стабільністю. Встановлено ефективність і доцільність використання пристроїв Пельтьє у суднових системах охолодження електронного обладнання, такого як радары, навігаційні прилади, блоки зв'язку та сервери управління судном, холодильних установках для медичних вантажів, термостабілізації оптичних систем і автономних енергетичних комплексах.

Розроблено мініатюрний пристрій Пельтьє ($8 \times 8 \times 3$ мм) з 21-ю термоелектричною парою. Використано структуру П-подібного ланцюга для рівномірного розподілу теплових навантажень. Розміри кожного напівпровідника було ретельно підібрано для забезпечення оптимального теплового режиму: при висоті 1,5 мм об'єм кожного напівпровідника складає 1 мм³. Тепловідведення з гарячої поверхні корпусу пристрою Пельтьє здійснено за рахунок вимушеної (примусової) конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі $h = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і теплового випромінювання $\epsilon_{\text{тв}} = 0,9$ для зменшення механічних напружень і збільшення терміну служби пристроїв у складних експлуатаційних умовах. Встановлено, що модифікований епоксидний компаунд з наповнювачем покращує робочі характеристики термоелектричних модулів у морських умовах. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій термоелектричних модулів та розробки нових систем термостабілізації для водного транспорту.

Ключові слова: пристрій Пельтьє, термоелектричний ефект, епоксидний компаунд, напівпровідники, суднові системи охолодження, термостабілізація.

Вступ. Сучасні суднові автоматизовані системи охолодження та термостабілізації потребують високої ефективності, надійності та стійкості обладнання та його компонентів з урахуванням ймовірної роботи в жорстких і несприятливих експлуатаційних умовах. Тому в подібних системах використовують пристрої Пельтьє, що забезпечують достатню точність

контролю температури без рухомих частин та складних механічних контурів охолодження [1-3]. Однак ефективність і довговічність цих термоелектричних пристроїв значною мірою залежать від їхнього захисту від агресивних факторів морського середовища, таких як волога, соляний туман, перепади температур та механічні навантаження.

У цьому контексті застосування епоксидного компаунду як захисного покриття або заливного матеріалу для модулів Пельтьє стає пріоритетним рішенням. Епоксидний матеріал забезпечує високу герметичність і захист від корозії, запобігаючи деградації електричних з'єднань та втраті термоелектричних властивостей пристрою. Крім того, даний тип компаунду забезпечує ефективний розподіл механічних навантажень, а тому зменшує ризики утворення мікротріщин і пошкоджень через вплив вібрацій, які є неминучими в умовах експлуатації на судні [4]. Не зважаючи на ці переваги, використання епоксидного компаунду має і певні конкретні обмеження. Теплопровідність даного компаунду нижча у порівнянні з теплопереносом у металевими з'єднаннями, що відобразиться на загальній ефективності тепловідведення. Сучасні модифіковані компаунди, в які додають спеціальні термопровідні наповнювачі компенсують вказаний недолік та забезпечують оптимальний баланс між термостабільністю, механічною міцністю та довговічністю.

Пристрої Пельтьє з епоксидним компаундом знаходять широке застосування в суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, особливо у критично важливих компонентах електричного та електронного обладнання. Вони використовуються для підтримки стабільної температури в бортових комп'ютерних системах, навігаційних пристроях, серверних модулях та блоках зв'язку, запобігаючи їх перегріву під час тривалих рейсів. Також, такі модулі ефективні у системах охолодження датчиків і приладів, що працюють в умовах високої вологості та соляного туману, де традиційні охолоджувальні системи можуть виявитися ненадійними. Крім того, пристрої Пельтьє з епоксидним покриттям застосовуються у термоконтрольованих відсіках, зокрема в холодильних камерах для зберігання медикаментів або чутливих до температури матеріалів, забезпечуючи точний контроль і герметичний захист від впливу

підвищеної вологості та корозійних процесів на водному транспорті. Ще одним важливим напрямком їх використання є охолодження акумуляторних батарей, які піддаються значним температурним навантаженням під час роботи суднових енергосистем. Використання пристроїв Пельтьє дозволяє уникнути процесу перегрівання акумуляторів, продовжуючи їх термін служби та підвищуючи безпеку експлуатації, що є особливо важливим для суден з гібридними або електричними силовими установками.

Таким чином, дане дослідження щодо застосування пристроїв Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом для суднових систем охолодження є актуальним, оскільки воно направлене на підвищення ефективності та надійності автоматизованих систем температурного контролю на водному транспорті.

Метою роботи є дослідження ефективності використання пристрою Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом у суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, аналіз його характеристик.

Основний матеріал. Пристрої Пельтьє широко застосовуються у транспортній галузі на різних видах транспорту [5-8], зокрема як рекуператори [9-11] та термоелектричні джерела тепла й електроенергії для високопотужних транспортних засобів [12, 13]. Для комплексного аналізу складних фізичних процесів у пристроях Пельтьє з епоксидним компаундом, що використовуються в суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, необхідно врахувати їх електричні, теплові та механічні аспекти [1, 2]. Основне рівняння для електричного струму базується на законі Ома та законі збереження заряду:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}; \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (1)$$

де $\mathbf{J}$ – вектор густини електричного струму, А/м²; γ – питома електропровідність, См/м; $\mathbf{E}$ – вектор напруженості електричного поля, В/м.

Рівняння для теплопровідності з термоелектричними ефектами, що враховує ефект Джоуля, теплопровідності та зворотний ефект Пельтьє:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (I \mathbf{J}) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); T – температура, К; Π – коефіцієнт Пельтьє, В; ρ – густина матеріалу, кг/м³; c_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); $\frac{\partial T}{\partial t}$ – зміна температури з часом; $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ – джоулеве тепловиділення.

При зміні температури виникають термомеханічні напруження, що описуються рівнянням механічної рівноваги, де зв'язок напружень із деформаціями та температурою виражається законом Гука як скалярний добуток тензорів з урахуванням термічних деформацій:

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{F} = 0; \sigma = C : (\varepsilon - \alpha_T \Delta T), \quad (3)$$

де σ – тензор механічних напружень, Па; $\nabla \cdot \sigma$ – дивергенція тензора напружень, Н/м³; C – тензор пружних констант, Па; ε – тензор деформацій; α_T – коефіцієнт теплового розширення, 1/К; ΔT – зміна температури, К; $\alpha \Delta T = \varepsilon_T$ – тензор термічних деформацій; $\mathbf{F}$ – вектор масових сил, Н/м³.

Загальна система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \\ \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\Pi \mathbf{J}) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}; \\ \nabla \cdot \sigma + \mathbf{F} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Загальну системи рівнянь для електрики, тепла та механіки модуля можна представити у вигляді матричних рівнянь, які можна використати для чисельного розрахунку як пристроїв Пельтьє, так і іншого електрообладнання [14].

З виразів (1) після підстановки співвідношення для закону Ома у формулу закону збереження заряду

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla V) = 0 \quad (5)$$

отримується рівняння у матричній формі:

$$[K_v] \{V\} = \{0\}, \quad (6)$$

де $[K_v]$ – матриця електричної провідності; $\{V\}$ – вектор вузлових значень потенціалу; $\{0\}$ – граничні умови.

З рівняння для температури (2), що враховує теплопередачу з ефектом Пельтьє, Джоуля-Ленца та теплопровідністю знаходимо матричне рівняння:

$$[C_T] \frac{d\{T\}}{dt} + [K_T] \{T\} = \{Q_{\text{Джоуля}} + Q_{\text{Пельтьє}}\}, \quad (7)$$

де $[C_T]$ – матриця теплоємності; $[K_T]$ – матриця теплопровідності; $\{T\}$ – вектор вузлових температур; $\{Q_{\text{Джоуля}}\}$, $\{Q_{\text{Пельтьє}}\}$ – вектори відповідно джоулевого нагріву та нагріву на основі ефекту Пельтьє.

З рівняння для рівноваги з урахуванням закону Гука та термомеханічними ефектами (3) формується рівняння в матричній формі:

$$[K_M] \{u\} = \{F_T\}, \quad (8)$$

де $[K_M]$ – матриця жорсткості; $\{u\}$ – вектор вузлових переміщень; $\{F_T\}$ – вектор термічних навантажень.

Загальна система рівнянь у вигляді блочної матриці, що є об'єднанням трьох фізичних процесів у єдину матричну систему має вигляд:

$$\begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & C_T \frac{d}{dt} + K_T & 0 \\ 0 & 0 & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{\text{Джоуля}} + Q_{\text{Пельтьє}} \\ F_T \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Дана матрична система рівнянь включає ефект Пельтьє та записана в класичному вигляді. При роботі термоелектричних модулів у режимі активного охолодження потрібно врахувати, що тепловий потік $\nabla \cdot (\Pi \mathbf{J})$ у рівнянні теплопередачі (2) може змінювати напрямок залежно від знаку « $\pm$ » струму. Змінене теплове рівняння (7) з урахуванням напряму « $\pm$ » струму

$$[C_T] \frac{d\{T\}}{dt} + [K_T] \{T\} = \{\pm Q_{\text{Пельтьє}}\} + \{Q_{\text{Джоуля}}\}, \quad (10)$$

формує наступну повну систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & C_T \frac{d}{dt} + K_T & 0 \\ 0 & 0 & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm Q_{\text{Пельтьє}} + Q_{\text{Джоуля}} \\ F_T \end{bmatrix}.$$

Дану матричну систему рівнянь можна розв'язувати чисельно, наприклад, методом скінченних елементів. При розрахунку пристроїв Пельтьє необхідно враховувати геометрію напівпровідників [15, 16], особливості 3D-моделювання [17] і специфіку деяких систем [18].

На плані розміщення 22 напівпровідникових елементів розміром

0,82×0,82 мм пристрою Пельтьє (рис. 1, а) відображена їх вертикальна симетрія у структурі з 4 рядків і 6 стовпців. Всі елементи інтегровані в ізоляційний корпус термоелектричного модуля, який має габарити 8×8 мм, що дозволяє віднести його до класу мініатюрних модулів. Завдяки компактним розмірам і малій масі, цей модуль придатний для використання в пристроях із обмеженим простором. Габарити напівпровідників були ретельно підібрані: при висоті 1,5 мм їх об'єм становить 1 мм³. Відстань від краю корпусу до найближчих напівпровідникових елементів дорівнює 0,44 мм по горизонталі та 0,94 мм по вертикалі. Аналогічні проміжки збережені між самими елементами: 0,44 мм у горизонтальному напрямку та 0,94 мм у вертикальному.

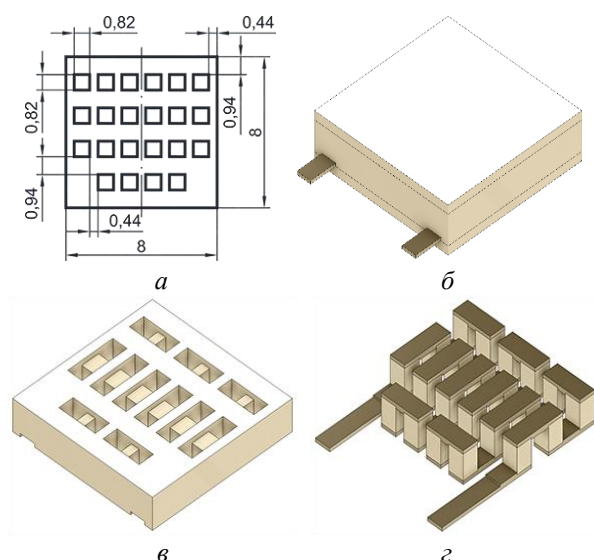


Рис. 1. Геометрія пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом:

- а – габаритно-встановлювальне креслення пристрою; б – пристрій у зібраному вигляді;
в – епоксидний компаунд; г – *П*-подібний термоелектричний ланцюг

Сконструйований термоелектричний модуль з габаритами 8×8×3 мм (категорії малих, мініатюрних модулів) включає 11 напівпровідників *P*-типу та 11 *N*-типу, а також 23 металеві контактні пластини. Це забезпечує формування ланцюга з 21-ї напівпровідникової термоелектричної пари. Габаритні параметри *П*-подібного ланцюга в складі модуля дорівнюють 6,11×7,12×1,9 мм. Вибір структури з'єднання у вигляді класичного *П*-подібного ланцюга був зумовлений низкою переваг: рівномірний розподіл тепла й електропровідність між елементами, ефективне відведення тепла завдяки оптимальному теплообміну між

контактними пластинами, а також мінімізація енергетичних втрат завдяки правильному напрямку електричного струму. При проектуванні конструкції, визначенні габаритних параметрів і кількості напівпровідникових елементів було взято за основу термоелектричний модуль TEC1-01102.

Кожен термоелектричний елемент складається з напівпровідникової *P-N*-термопари, що має геометрично однакові паралелепіпедні форми напівпровідників розмірами 0,82×0,82×1,5 мм. Поздовжні та поперечні контактні пластини, що використовуються для комутації, мають однакову товщину 0,2 мм і ширину 0,82 мм, але різняться за довжиною: 2,58 мм для поздовжніх та 2,08 мм для поперечних. У центрі кожної пластини знаходиться спеціальний виступ висотою 0,1 мм, з площею 0,94×0,82 мм для поздовжніх пластин та 0,44×0,82 мм для поперечних. Ці виступи сприяють поліпшеному з'єднанню напівпровідників модуля з металевими пластинами, забезпечуючи надійний контакт та рівномірний розподіл електричного струму. В якості матеріалу [19, 20] напівпровідників використано телурид вісмуту (Bi_2Te_3) [21-24], металеві контактні пластини виконано з міді (*Cu*). Корпус пристрою Пельтьє складається з двох керамічних пластин, виготовлених з оксиду алюмінію (Al_2O_3). Між пластинами корпусу розташовано заповнювач – епоксидний компаунд.

Епоксидні компаунди відіграють ключову роль у пристроях Пельтьє:

1. Ізоляція елементів. Створюють надійний електроізоляційний шар, запобігаючи коротким замиканням.

2. Механічна фіксація. Міцно з'єднують елементи модуля, забезпечуючи його стабільність.

3. Теплопередача. Підвищують ефективність охолодження, підтримуючи оптимальні умови по температурі.

4. Захист. Оберігають модуль від вологи, пилу та зовнішніх впливів, подовжуючи його ресурс.

Таким чином, епоксидні компаунди є важливими для забезпечення необхідних експлуатаційних режимів роботи пристроїв Пельтьє, покращуючи їх електричні, механічні та теплові характеристики, що впливає на підвищення надійності та довговічності [25]. Фізичні властивості епоксидних компаундів можна змінювати, додаючи до них наповнювачі,

наприклад, оксид алюмінію (Al_2O_3), нітрид бору (BN), діоксиду кремнію (SiO_2) тощо.

Розрахунок спроектованого пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації було проведено за допомогою чисельного методу скінченних елементів [26, 27]. Моделювання здійснювалось із урахуванням таких початкових параметрів і обраних граничних умов: для крайньої торцевої поверхні останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі було встановлено електрорпотенціал $\phi_0=0$ В, температура холодних пластин складала $t_0=0$ °С; крайні торцеві поверхні першої та останньої контактної пластини вважалися нерухомо закріпленими; усі матеріали компонентів пристрою були ізотропними. Теплообмін з навколишнім середовищем здійснено за рахунок примусової (вимушеної) конвекції [28] і теплового випромінювання з гарячої керамічної пластини корпусу пристрою Пельтьє при коефіцієнті конвективної тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К), температурі оточуючого середовища $t_{oc}=20$ °С, коефіцієнті випромінювання (емісії) $\varepsilon_{TB}=0,9$. Коефіцієнти Зеебека напівпровідників на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3): $\alpha_P=2,0 \cdot 10^{-4}$ В/К, $\alpha_N=-2,0 \cdot 10^{-4}$ В/К. Питомі електричні опори для напівпровідників (Bi_2Te_3), контактних мідних Cu пластин, модифікованого епоксидного компаунду $(C_nH_mO_p)_x$ зі спеціальним наповнювачем для підвищення електричної ізоляції, керамічного корпусу (Al_2O_3-Cer) на основі оксиду алюмінію, відповідно: $\rho_P=\rho_N=1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_{Cu}=1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{comp}=1,0 \cdot 10^{15}$ Ом·м, $\rho_{Al_2O_3-Cer}=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м; теплопровідності зазначених матеріалів відповідно: $k_P=k_N=1,5$ Вт/(м·К), $k_{Cu}=401$ Вт/(м·К), $k_{comp}=0,2$ Вт/(м·К), $k_{Al_2O_3-Cer}=30$ Вт/(м·К); модулі пружності відповідно: $E_P=E_N=4,5 \cdot 10^{10}$ Па, $E_{Cu}=1,1 \cdot 10^{11}$ Па, $E_{comp}=3,0 \cdot 10^9$ Па, $E_{Al_2O_3-Cer}=3,5 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона відповідно: $\nu_P=\nu_N=0,3$, $\nu_{Cu}=0,34$, $\nu_{comp}=0,3$, $\nu_{Al_2O_3-Cer}=0,22$; коефіцієнти теплового розширення відповідно: $\alpha_{PT}=\alpha_{NT}=1,4 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Cu,T}=1,65 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{comp}=4,0 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Al_2O_3-Cer}=7,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. При типовому підключенні (червоний «+», чорний «-») струм спершу проходить через напівпровідниковий матеріал P -типу в термоелектричному модулі.

Розрахунковим шляхом отримано функціональні залежності робочих характеристик пристрою Пельтьє для різних

значень сили струму. Для забезпечення повноти аналізу, також, представлено багатопараметричні поверхні відгуку, що просторово описують залежність параметрів від струму, що протікає через модуль.

Результати досліджень. Результати розрахунків представлено у вигляді графічних зображень розподілу температури (рис. 2), функціональних залежностей робочих величин (рис. 3) та поверхонь відгуку (рис. 4-5).

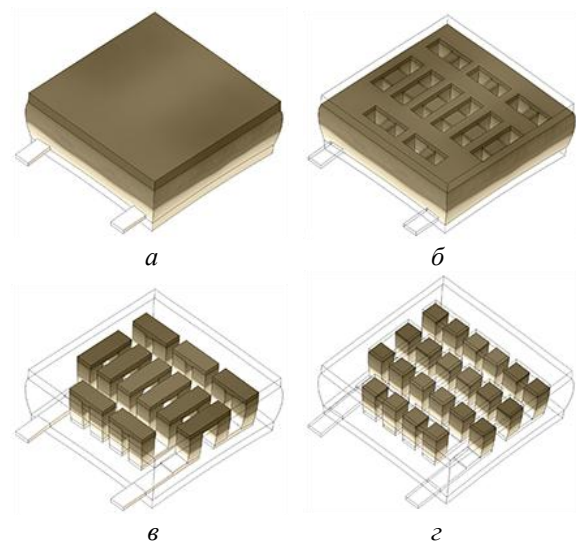


Рис. 2. Картини розподілу $t=f(I)$ стаціонарного теплового поля від 0 до 64,2 °С для пристрою Пельтьє при силі струму 1 А: а – пристрій у зборі; б – епоксидний компаунд; в – P -подібний термоелектричний ланцюг; г – P - N -напівпровідники

Картини розподілу $t=f(I)$ стаціонарного теплового поля сконструйованого пристрою Пельтьє з різницею температур 64,2 °С між його гарячою і холодною сторонами при струмі $I=1$ А продемонстровано на рис. 2. Темні зони відповідають найбільшим значенням температури, тоді як сірі та світлі області відображають відповідно середні та мінімальні значення. Аналіз розподілу стаціонарного теплового поля вказує на те, що пристрій Пельтьє суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації функціонує в умовах значних теплових навантажень.

Фактори, що впливають на теплове поле наступні:

– теплопровідність матеріалів (вища теплопровідність підкладки допомагає рівномірному розподілу тепла);

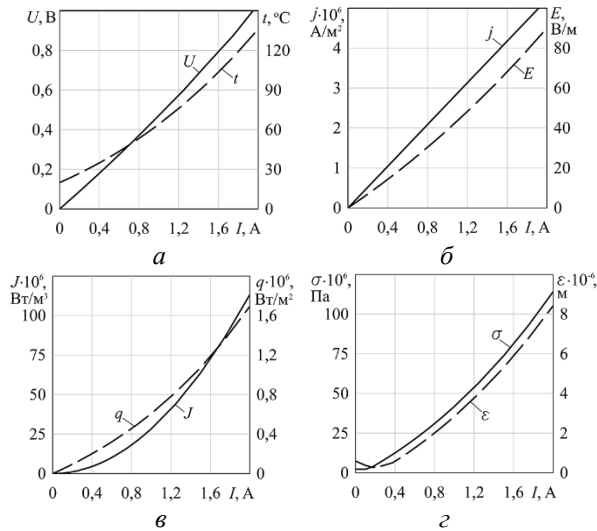


Рис. 3. Багатопараметричні графіки для напруги U термоелектричного ланцюга і температури t гарячої сторони пристрою Пельтьє (а), джоулевого нагріву J в напівпровідниках і густини теплового потоку q ланцюга (б), густини струму j в напівпровідниках і напруженості електричного поля ланцюга E (в), еквівалентного стресу σ і величини деформацій ϵ в напівпровідниках пристрою (г) в залежності від струму I

– сила струму (при її збільшенні зростає як ефект Пельтьє, так і джоулевий нагрів, що змінює температурний профіль);

– тепловий опір контактів (при поганому термічному контакті виникають локальні перегріву);

– конвекція та тепловідведення (ефективність радіатора чи водяного охолодження визначає стабільність температурного поля).

Стационарне теплове поле пристрою Пельтьє є важливим фактором його продуктивності. Правильна конструкція модуля, вибір матеріалів і системи охолодження забезпечують мінімізацію внутрішніх теплових втрат і підвищення ефективності охолодження або нагріву. Також, необхідно зменшувати термічні напруження до прийнятного рівня способами, розглянутими в [29, 30], а також за допомогою демпфування [31-34].

Залежності напруги U та температури t від сили струму I є нелінійними та поступово збільшуються через зміну внутрішнього опору, ефекти Пельтьє та Джоуля-Ленца, а також зворотну теплопередачу в пристрої Пельтьє. Для аналізованого інтервалу струму від 0 до 2 А напруга U (суцільна крива на рис. 3, а) є наближено лінійною. Температура t (пунктирна крива на рис. 3, б) між гарячою і холодною сторонами пристрою Пельтьє визначається

тепловим балансом між корисним ефектом охолодження (Пельтьє), ефектом Джоуля-Ленца (паразитним нагріванням), теплопровідністю матеріалів.

У напівпровідникових елементах пристрою Пельтьє густина струму визначається напруженістю електричного поля та електропровідністю матеріалу, яка залежить від концентрації й рухливості носіїв зарядів. Зміни температури значним чином впливають на електропровідність, оскільки при підвищенні температури зростає концентрація носіїв, що збільшує густина струму. Проте при надмірному нагріванні може зменшуватися їх рухливість і характер залежності при цьому зміниться. У реальних умовах, при великих струмах, проявляються нелінійні ефекти – перегрів через тепло Джоуля-Ленца та обмеження швидкості носіїв, що може впливати на стабільність роботи пристрою. Для досягнення максимальної ефективності пристрою Пельтьє необхідно контролювати напруженість електричного поля та густину струму, щоб уникати небажаного перегріву й підтримувати оптимальні електричні параметри. Залежності густини струму j та напруженості електричного поля E при малих струмах I є лінійними (суцільна та пунктирна криві рис. 2). При збільшених струмах ці залежності як для густини струму j , так і для напруженості E є нелінійними, але мають вигляд наближений до лінійних.

Ефект Джоуля-Ленца в термоелектричних модулях можна вважати небажаним побічним ефектом, оскільки він спричиняє зайві теплові втрати. Це тепло не бере участі в корисних процесах модуля – охолодженні чи генерації електроенергії – а лише зменшує його ефективність, підвищуючи температуру та обмежуючи продуктивність. Тепло Джоуля-Ленца ($J \sim I^2$) зростає квадратично зі струмом (суцільна крива на рис. 3, в), густина теплового потоку ($q \sim I^2$) теж залежить квадратично (пунктирна крива на рис. 3, в). Густина теплового потоку q в пристрої Пельтьє представляє собою кількість теплової енергії, що проходить через одиницю поверхні в одиницю часу. В пристрої Пельтьє вона відіграє важливу роль у процесах теплоперенесення та визначає ефективність охолодження або нагрівання. Густина теплового потоку q визначається взаємодією трьох ключових факторів: ефекту Пельтьє, втрат Джоуля-Ленца і теплопровідності матеріалу. Для досягнення максимальної ефективності роботи пристрою

Пельтьє необхідно досягти оптимального балансу між цими процесами. Висока густина теплового потоку не завжди є показником ефективної роботи – при надмірному струмі тепло Джоуля-Ленца починає переважати, що призводить до перегріву модуля та зниження його продуктивності. Оскільки ефект Пельтьє змінюється лінійно ($Q \sim I$) та при великих струмах є менш вагомим, то для мінімізації втрат потрібно підбирати оптимальний струм, при якому ефект Пельтьє переважає тепло Джоуля-Ленца. Також, оптимізація роботи пристрою Пельтьє передбачає використання матеріалів із низьким електричним опором, обмеженою теплопровідністю та ефективну організацію відведення тепла.

Збільшення сили струму I неминує викликає зростання як еквівалентного стресу σ (суцільна крива на рис. 3, з), так і механічних деформацій ε (пунктирна крива на рис. 3, з) у структурі матеріалів пристрою Пельтьє. При надмірно великих струмах утворюється додаткове температурне навантаження, яке з часом може стати причиною мікротріщин, роз'єднання структур та деградації контактів пристрою. Як наслідок, ефективність пристрою Пельтьє поступово може знижуватися, що може призвести до його передчасного виходу з ладу. Аналіз характеристик еквівалентного стресу σ і деформацій ε сприяє вибору оптимального струму для уникнення подібних експлуатаційних режимів.

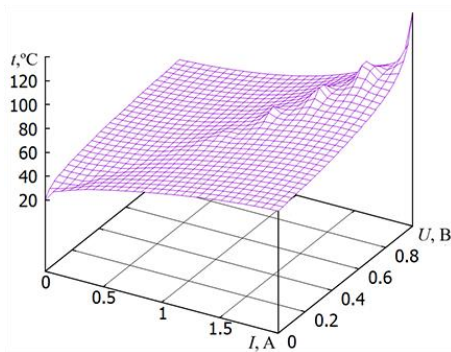


Рис. 4. Поверхня відгуку для напруги U та температури t пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом в залежності від сили струму I в діапазоні від 0 до 2 А

Для більш точного аналізу пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації рекомендується використовувати як плоскі графіки, так і тривимірні поверхні відгуку (рис. 4-5).

На поверхнях відгуку можуть бути сплески, яких не видно на плоских графіках. Це може бути пов'язано з тим, що поверхні відгуку є тривимірними зображеннями, що можуть продемонструвати взаємозв'язки одразу між кількома змінними. Визначення конкретних причин сплесків на поверхнях відгуку потребує додаткового аналізу, що включає врахування додаткових параметрів системи, перевірку фізичних налаштувань і граничних умов, нелінійних ефектів.

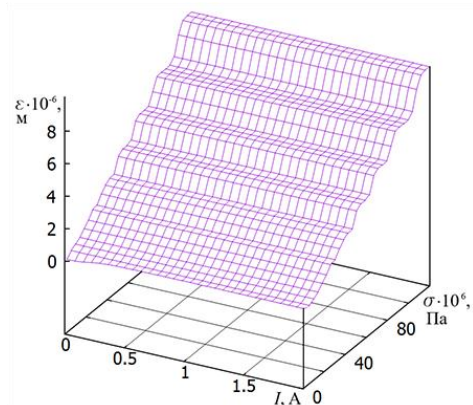


Рис. 5. Поверхня відгуку для еквівалентного стресу σ та деформацій ε пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом в залежності від сили струму I в діапазоні від 0 до 2 А

Для отримання більш гладких поверхонь відгуку можна використати методи апроксимації. Дані методи дозволяють визначити наближену функцію, яка згладжує дані, мінімізує відхилення між реальною та наближеною функцією. Це допомагає згладити незначні коливання, роблячи поверхню більш рівною. Інтерполяція може бути, також, доречною, коли потрібно зберегти точність на заданих точках, але при цьому забезпечити плавний перехід між ними. Крім того, інколи необхідно використати комбіновані способи, при яких спочатку застосовується інтерполяція для отримання початкової поверхні, а вже потім апроксимація для її згладжування. Конкретний метод обробки поверхонь відгуку обирається в залежності від умов задачі, якості даних та бажаного результату.

Висновки. Проведений аналіз пристрою Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації дозволив зробити наступні висновки:

1. Застосування модифікованого епоксидного компаунду з наповнювачем створює ефективний бар'єр від вологи, корозії

та механічних пошкоджень, що значно продовжує термін експлуатації пристрою Пельтьє.

2. Компаунд сприяє рівномірному розподілу температури по пристрою Пельтьє, запобігаючи локальному перегріву та підвищуючи стабільність роботи системи в умовах змінного навантаження при флуктуації тепловиділення.

3. Завдяки врахуванню розсіювання тепла з гарячої поверхні пристрою Пельтьє в режимі вимушеної (примусової) конвекції (за допомогою радіатора та вентилятора) і теплового випромінювання вдалося досягти кращої ефективності теплообміну, що сприяє економії електроенергії та підвищенню ККД системи.

4. Враховуючи специфіку роботи обладнання водного транспорту при високій вологості, вібраціях та обмеженому просторі, досліджений пристрій демонструє високу надійність і стійкість до екстремальних впливів.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень та впровадження пристроїв Пельтьє з компаундами у системах автоматизованого керування температурним режимом суднового електричного та електронного обладнання.

Література

1. Анатичук Л. І. Термоелектричні перетворювачі енергії. Термоелементи. Елементна база термоелектрики: монографія. Т. 2 / Л. І. Анатичук; ред. Л. М. Вихор, О. Я. Лусте. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. 376 с.
2. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
3. Анатичук Л. І., Вихор Л. М. Вплив електричних та теплових опорів контактів і комутацій на холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 19-33.
4. Тимошук О. М., Шапран Ю. А. Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генератора. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 1(42). С. 61-72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
5. Дмитриченко М. Ф., Гутаревич Ю. Ф., Тріфонов Д. М., Сирота О. В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №3. С. 58-69.
6. Лобунець Ю. М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013. №1. С. 62-67.
7. Анатичук Л. І., Прибила А. В., Кібак А. М. Термоелектричні кондиціонери для сидінь автотранспорту. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №4. С. 90-104.
8. Анатичук Л. І., Прибила А. В. Про ефективність термоелектричних кондиціонерів для транспортних засобів. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №1. С. 86-96.
9. Анатичук Л. І., Лисько В. В., Прибила А. В. Раціональні області використання термоелектричних рекуператорів тепла. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2022. №3-4. С. 44-69.
10. Анатичук Л. І., Кузь Р. В. Про особливості розвитку робіт по створенню термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №5. С. 45-67.
11. Кузь Р. В. Теорія та проектування термоелектричних генераторів, що використовують відходи тепла на транспортних засобах. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №2. С. 5-12.
12. Анатичук Л. І., Гаврилюк М. В., Лисько В. В., Руснак О. С., Тінко Е. В. Стендові експериментальні дослідження термоелектричного джерела тепла та електрики для транспортних засобів великої потужності. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 41-49.
13. Анатичук Л. І., Лисько В. В. Про можливості використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №3. С. 80-92.
14. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Колесник В. В., Костюченко В. І., Пріступа С. В., Пастух О. В., Голубєва С. М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. – Київ: ДУІТ, 2021. Вип. 3 (34). С. 13-21.

15. **Кириченко О. С.** Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ: ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2023. Т. 34(73), № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
16. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. / Hladyshv D., Hnat H. – etc. (International Science Group). Boston, USA: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1>
17. Кириченко О. С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. *Освітлогічний дискурс: наукове електронне видання*. Київ: Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2017. №3-4(18-19). С. 296-308. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2017.3-4.2938>
18. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. І. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ: ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2018. Т.29(68), Ч.1, №6. С.58-63.
19. Анагичук Л. І., Лисько В. В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 73-85.
20. Анагичук Л. І., Гаврилук М. В., Лисько В. В. Обладнання для визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 58-68.
21. Лисько В. В., Тудорой П. Ф. Комп'ютерне моделювання процесу екструзії стрічкових термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 . *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. 2019. №2. С. 61-69.
22. Рибчаков Д.Є. Комп'ютерне моделювання процесу екструзії термоелектричного матеріалу на основі Bi_2-Te_3 , прямокутної форми. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №4. С. 14-22.
23. Рибчаков Д. Є., Сербин М. В. Комп'ютерний метод опису технологій та властивостей термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 , отриманих методом пресування. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 5-12.
24. Рибчаков Д. Є., Сербин М. В. Комп'ютерний метод опису технологій та властивостей термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 , отриманих методом Бріджмена. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 45-52.
25. Gubarevych O., Wierzbicki S., Melnyk O., Kyrychenko O., Riashchenko O. Increasing the accuracy of calculated indicators of operational reliability of industrial electric motors. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Lublin, Poland: Polish Maintenance Society. 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/203006>
26. Дубинець В. Г., Хільчевський В. В., Савченко О. В. Основи методу скінченних елементів. Чернівці: ЧДТУ, 2007. 288 с.
27. Oyman Serteller N. F. A basic introduction to Finite Element Methods for solving electrical problems. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*. Trabzon, Turkey: Sila Science, 2011. Vol. 3, No. 4. P. 487-496.
28. Кириченко О. С. Вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 2 (43). С. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
29. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М., Пастух О. В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
30. Кириченко О. С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. № 1(277). С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
31. Горський П. В. Демпфування термомеханічних напружень як засіб підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2023. № 4. С. 17-26.

32. Анатичук Л. І., Балазюк В. М., Лусте О. Я., Малишко В. В. Про підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. № 4. С. 71-75.
33. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Приступа С. В., Голубєва С. М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2024. Вип. 1(39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
34. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus) (Kremenchuk, Ukraine)*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2023. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>

References

1. Anatychuk L. I. Termoelektrychni peretvorjuvachi energiji. *Termoelementy*. Elementna baza termoelektryky: monohrafiya. T. 2 / L. I. Anatychuk; red. L. M. Vykhор, O. Ja. Luste. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2003. 376 s.
2. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
3. Anatychuk L. I., Vykhор L. M. Vplyv elektrychnykh ta teplovykh oporiv kontaktiv i komutacij na kholodylnyj koeficijent termoelektrychnogho modulja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 19-33.
4. Tymoshchuk O. M., Shapran Ju. A. Analiz metodiv ta zasobiv neitralizaciji vibraciji sudnovogho dyzelj-gheneratora. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologij*. Kyjiv: DUIT, 2025. Vyp. 1(42). S. 61-72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
5. Dmytrychenko M. F., Ghutarevych Ju. F., Trifonov D. M., Syrota O. V. Zastosuvannja termoelektrychnykh peretvorjuvachiv energiji dlja zmenshennja vplyvu pryrodno-klimatychnykh faktoriv na tekhnichnu ghotovnistj transportnogho zasobu. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #3. S. 58-69.
6. Lobunecj Ju. M. Ocinka kharakterystyk OTES z termoelektrychnymy peretvorjuvachamy energiji. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2013. #1. S. 62-67.
7. Anatychuk L. I., Prybyla A. V., Kibak A. M. Termoelektrychni kondycionery dlja sydinj avtotransportu. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #4. S. 90-104.
8. Anatychuk L. I., Prybyla A. V. Pro efektyvnistj termoelektrychnykh kondycioneriv dlja transportnykh zasobiv. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #1. S. 86-96.
9. Anatychuk L. I., Lysjko V. V., Prybyla A. V. Racionaljni oblasti vykorystannja termoelektrychnykh rekuperatoriv tepla. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2022. #3-4. S. 44-69.
10. Anatychuk L. I., Kuzj R. V. Pro osoblyvosti rozvytku robit po stvorennju termoelektrychnykh rekuperatoriv dlja transportnykh zasobiv. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #5. S. 45-67.
11. Kuzj R. V. Teorija ta proektuvannja termoelektrychnykh gheneratoriv, shho vykorystovujutj vidkhody tepla na transportnykh zasobakh. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #2. S. 5-12.
12. Anatychuk L. I., Ghavryljuk M. V., Lysjko V. V., Rusnak O. S., Tinko E. V. Stendovi eksperymentaljni doslidzhennja termoelektrychnogho dzherela tepla ta elektryky dlja transportnykh zasobiv velykoji potuzhnosti. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 41-49.
13. Anatychuk L. I., Lysjko V. V. Pro mozhlyvosti vykorystannja termoelektrychnykh gheneratoriv dlja transportnykh peredpuskovykh naghriuvachiv velykykh potuzhnostej. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #3. S. 80-92.
14. Taranenko S. V., Kyrychenko O. S., Kolesnyk V. V., Kostjuchenko V. I., Pristupa S. V., Pastukh O. V., Golubieva S. M. Modeljuvannja stacionarnogho teplovogho polja strumoprovidnykh shyn sudnovykh GhRShh. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologij*. – Kyjiv: DUIT, 2021. Vyp. 3 (34). S. 13-21.
15. Kyrychenko O. S. Porivnjalnij analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznymy gheometrychnymy formamy napivprovidnykiv dlja elektroobladnannja transportu. *Vcheni zapysky Tavrijskogho nacionaljnogho universytetu imeni V. I. Vernadsjkogho*. Serija: Tekhnichni nauky. Kyjiv: TNU im. V. I. Vernadsjkogho, 2023. T. 34(73), # 1.

- S. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
16. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. / Hladyshev D., Hnat H. – etc. (International Science Group). Boston, USA: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1>
 17. Kyrychenko O. S. Kryteriji formuvannja ghotovnosti do profesijnoi dijalnosti inzheneriv na osnovi 3D-modeljuvannja. *Osvitologhichnyj dyskurs: naukovie elektronne vydannja*. Kyjiv: Kyjiv. un-t im. B. Ghrinchenka, 2017. #3-4(18-19). S. 296-308. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2017.3-4.2938>
 18. Kyrychenko O. S., Biliuk I. S., Sharejko D. Ju., Fomenko A. M., Ghavrylov S. O., Bughrim L. I. Chyseljne tryvymime modeljuvannja termoelektrychnogho okholodzhuvacha vymirjuvaljnogho elektroustatkuvannja avtomatychnykh system. *Vcheni zapysky Tavrijskogo nacionaljnogho universytetu imeni V. I. Vernadsjkogho. Serija: Tekhnichni nauky*. Kyjiv: TNU im. V. I. Vernadsjkogho, 2018. T.29(68), Ch.1, #6. S.58-63.
 19. Anatychuk L. I., Lysjko V. V. Metodyka vyznachennja termoelektrychnykh parametriv materialiv u skladi termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 73-85.
 20. Anatychuk L. I., Ghavryljuk M. V., Lysjko V. V. Obladnannja dlja vyznachennja parametriv termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 58-68.
 21. Lysjko V. V., Tudoroj P. F. Komp'juterne modeljuvannja procesu ekstruziji strichkovykh termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 . *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy. 2019. #2. S. 61-69.
 22. Rybchakov D. Je. Komp'juterne modeljuvannja procesu ekstruziji termoelektrychnogho materialu na osnovi Bi_2-Te_3 , prjamokutnoji formy. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #4. S. 14-22.
 23. Rybchakov D. Je., Serbyn M. V. Komp'juternyj metod opysu tekhnologhij ta vlastyvostej termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 , otrymanykh metodom presuvannja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 5-12.
 24. Rybchakov D. Je., Serbyn M. V. Komp'juternyj metod opysu tekhnologhij ta vlastyvostej termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 , otrymanykh metodom Bridzhmena. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 45-52.
 25. Gubarevych O., Wierzbicki S., Melnyk O., Kyrychenko O., Riashchenko O. Increasing the accuracy of calculated indicators of operational reliability of industrial electric motors. *Ekspluatacija i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Lublin, Poland: Polish Maintenance Society. 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/203006>
 26. Dubynecj V. Gh., Khiljchevskyj V. V., Savchenko O. V. Osnovy metodu skinchennykh elementiv. Chernighiv: ChDTU, 2007. 288 s.
 27. Oyman Serteller N. F. A basic introduction to Finite Element Methods for solving electrical problems. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*. Trabzon, Turkey: Sila Science, 2011. Vol. 3, No. 4. P. 487-496.
 28. Kyrychenko O. S. Vplyv rezhymu ta sposobu konvektsiji na robochi kharakterystyky skonstrujovanogho termoelektrychnogho modulja sudnovogho elektroobladnannja. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2025. Vyp. 2 (43). S. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
 29. Taranenko S. V., Kyrychenko O. S., Pristupa S. V., Golubieva S. M., Pastukh O. V. Termoelektrychni moduli z kompensovanymy komutacijnymy plastynamy dlja prystrojiv sudnovoji energhetiky. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2023. Vyp. 1(37). S. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
 30. Kyrychenko O. S. Termoelektrychni moduli z riznymi sposobamy kontaktynogho z'jednannja napivprovodnykovykh termoelementiv. *Visnyk Shhidnoukrajinsjkogho nacionaljnogho universytetu imeni Volodymyra Dalja*. Kyjiv: SNU im. V. Dalja, 2023. # 1(277). S. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
 31. Ghorskyj P. V. Dempfuvannja termomekhanichnykh napruzhenj jak zasib pidvyshhennja cyklichnoji stijkosti termoelektrychnykh peretvorjuvachiv energhiji. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2023. # 4. S. 17-26.
 32. Anatychuk L. I., Balazjuk V. M., Luste O. Ja., Malysko V. V. Pro pidvyshhennja cyklichnoji stijkosti termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2003. # 4. S. 71-75.
 33. Taranenko S. V., Kyrychenko O. S., Pristupa S. V., Golubieva S. M. Dempfuvannja termichnykh napruzhenj v termoelektrychnykh moduljakh

- sudnovogho elektroobladnannja. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2024. Vyp. 1(39). S. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
34. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus) (Kremenchuk, Ukraine)*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2023. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>

Kyrychenko O.S. Analysis of the Peltier Device with Epoxy Compound for Ship Automated Cooling and Thermostabilization Systems

In ship automated cooling and thermal stabilization systems, it is important to ensure effective control of thermal regimes in conditions of high humidity and mechanical loads. Because of this, Peltier devices based on thermoelectric modules are used in these ship systems, which are promising due to their compactness, reliability and the absence of moving parts. The efficiency of the said devices depends to a large extent on their design features, choice of materials and thermal characteristics. The study is aimed at analyzing the influence of the modified epoxy compound on the operational properties of Peltier devices, which can ensure their durability and stability of operation in marine conditions.

The analysis of electrical, thermal and mechanical processes in Peltier devices was carried out through a system of differential equations in matrix form. To model and optimize the design, a numerical calculation was performed to determine the distribution of temperature and mechanical parameters in the materials of the device. The effect of epoxy compound on the heat dissipation efficiency and the performance of the device

under consideration, including heat transfer, structural integrity, and mechanical stability, is analysed. The effectiveness and feasibility of using Peltier devices in ship cooling systems for electronic equipment, such as radars, navigation devices, communication units and ship control servers, refrigeration units for medical cargo, thermal stabilization of optical systems and autonomous energy complexes were established.

The miniature Peltier device (8×8×3 mm) with 21 thermoelectric pairs was developed. The U-shaped circuit structure was used to evenly distribute thermal loads. The dimensions of each semiconductor were carefully selected to ensure optimal thermal conditions: at a height of 1.5 mm, the volume of each semiconductor is 1 mm³. Heat removal from the hot surface of the Peltier device case was carried out by forced (forced) convection with a heat transfer coefficient $h=50 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ and thermal radiation $\varepsilon_r=0.9$ to reduce mechanical stresses and increase the service life of the devices in difficult operating conditions. It was found that a modified epoxy compound with a filler improves the operating characteristics of thermoelectric modules in marine conditions. The results obtained can be used to improve the designs of thermoelectric modules and develop new thermal stabilization systems for water transport.

Keywords: Peltier device, thermoelectric effect, epoxy compound, semiconductors, ship cooling systems, thermal stabilization.

Кириченко О.С. – к.т.н., доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Національний транспортний університет, м. Київ, oskyrychenko@gmail.com

Стаття подана 07.03.2025.