
СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 629.1.04:621.3.082.62

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01

© Кириченко О.С.

**ВПЛИВ РЕЖИМУ ТА СПОСОБУ КОНВЕКЦІЇ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СКОНСТРУЙОВАНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ
СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

В роботі проаналізовано вплив режиму природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електричного обладнання. Відзначено про особливості експлуатації термоелектричних пристроїв у морському та річковому судноплавстві, зокрема вплив підвищеної вологості, корозійної активності солоної води, вібрації і змінних температурних навантажень. Розглянуто особливості природної та примусової конвекції, а також їхній вплив на ефективність тепловідведення. Окремо підкреслено необхідність застосування примусової конвекції для ефективного охолодження термоелектричного модуля. Визначено, що природної конвекції часто недостатньо для розсіювання тепла, особливо за умов підвищених теплових навантажень у судновому середовищі. Проаналізовано способи підвищення коефіцієнта тепловіддачі при примусовій конвекції, зокрема застосування повітряного охолодження за допомогою вентилятора та радіатора, а також рідинного охолодження. Визначено оптимальні умови теплового режиму для забезпечення стабільної роботи термоелектричного модуля в суднових умовах. Сконструйовано термоелектричний модуль площею 8×8 мм, що відносить його до категорії малих модулів. Габаритні розміри П-подібного ланцюга модуля становлять $6,11 \times 7,12 \times 1,9$ мм. Розміщення 11 напівпровідників Р-та 11 напівпровідників N-типу, 23-х металевих контактних комутаційних пластин дозволило створити у сконструйованому модулі 21-ну напівпровідникову термопару. За результатами чисельного розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання при силі струму $0,5$ А в режимі примусової конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К). Також, досліджено робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля при зміні струму в діапазоні 0-1 А для різних коефіцієнтів тепловіддачі. Проведено аналіз параметрів, зокрема густини струму j , напруги U , напруженості електричного поля E , температури гарячої сторони t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , а також еквівалентного стресу σ і деформацій ϵ .

Ключові слова: термоелектричний модуль, конструювання, конвекція, коефіцієнт тепловіддачі, робочі характеристики, термоелектричний ефект Пельтьє, суднове електрообладнання.

Постановка проблеми. Сучасне суднове електрообладнання потребує ефективних методів термостатування для забезпечення стабільної роботи електричних та електронних компонентів і підвищення їх надійності. Одним із перспективних рішень у цій галузі є використання термоелектричних модулів (ТЕМ) на основі зворотного термоелектричного ефекту Пельтьє, які дозволяють здійснювати локальне охолодження без застосування рухомих частин та робочих рідин. Ефективність роботи таких модулів значною мірою залежить від теплового режиму їх експлуатації, а також від способу організації конвекції для відведення тепла. Виділяють природний (вільний) і примусовий (вимушений) режими конвекції. Природна конвекція базується на теплових потоках, що виникають через різницю температур, і є енергоефективною, але менш дієвою при високих теплових навантаженнях. Радіаторне охолодження забезпечує пасивне відведення тепла завдяки збільшенню площі тепловіддачі, проте ефективність його роботи залежить від умов навколишнього середовища. Вентиляторне охолодження значно підвищує ефективність тепловідведення, але створює шум і є менш

надійним через наявність рухомих частин. Примусова конвекція здійснюється за допомогою радіаторів, вентиляторів або рідинного охолодження, що дозволяє значно покращити тепловідведення, проте вимагає додаткових витрат енергії та конструктивних рішень. Рідинне охолодження є найбільш ефективним способом, оскільки рідина має вищу теплопровідність, проте цей метод складніший у реалізації і вимагає додаткових насосів та трубопроводів.

Термоелектричні модулі Пельтьє широко застосовуються у судновому електрообладнанні, зокрема в системах охолодження електронних блоків суднової автоматики, навігаційного обладнання та комунікаційних пристроїв. Наприклад, вони використовуються в охолоджувальних модулях радарних систем, термостатованих корпусах судових комп'ютерів та системах контролю температури в енергетичних установках суден.

Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до ефективності та надійності судових електричних та електронних систем, які працюють у складних морських і річкових умовах. Висока вологість, корозійна активність солоної води, зміни температури та вібрації можуть негативно впливати на роботу електричних та електронних компонентів, що підвищує потребу в стабільних і малогабаритних системах терморегуляції. Використання термоелектричних модулів Пельтьє є перспективним напрямом, однак їх ефективність значною мірою залежить від оптимізації тепловідведення, що визначає необхідність даного дослідження.

У даній статті досліджено вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля, призначеного для охолодження судового електрообладнання. Проведений аналіз дозволяє визначити оптимальні умови експлуатації модуля, що сприятиме підвищенню його ефективності та надійності у складі бортових систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері термоелектричного охолодження свідчать про зростаючий інтерес до застосування термоелектричних модулів (ТЕМ) у судових електричних та електронних системах. Багато наукових праць присвячено вивченню ефективності ТЕМ у різних режимах експлуатації, проте питання оптимізації тепловідведення залишається актуальним. Особливу увагу приділяють впливу способу організації конвекції на продуктивність модулів, оскільки саме тепловий режим визначає їх довговічність та енергетичну ефективність. У зв'язку з цим проведено ґрунтовний аналіз сучасних підходів до керування розподілом теплових потоків і їх застосування у судовій техніці, що становить основний інтерес даного дослідження.

У дослідженні [1] розглянуто перспективи використання генераторів в океанічних термоелектричних системах (ОТЕС) для перетворення теплової енергії. Проаналізовано ефективність таких рішень та доведено можливість розробки ОТЕС із прийнятними техніко-економічними показниками.

У роботах [2-5] детально розглядаються фундаментальні принципи теорії термоелектричних ефектів, їх математичне моделювання, а також методи оптимізації характеристик термоелектричних матеріалів і пристроїв. Окремі частини роботи [6] **можуть виявитись корисними** під час конструювання термоелектричних модулів, що мають допустимий рівень термічних напружень.

Новий підхід до генерації електроенергії на морських судах, зокрема на кораблях та самохідних плавзасобах представлено в [7]. Запропонована технологія передбачає використання великих масивів термоелектричних модулів Зеебека, закріплених на внутрішній поверхні металевих пластин корпусу судна, розташованих під ватерлінією. Робота цих масивів базується на використанні тепла, яке виділяється з вихлопних газів головного двигуна, електрогенератора або допоміжного обладнання, зокрема судових пальників чи сміттєспалювальних установок.

Публікація [8] представляє систему рекуперації відпрацьованого тепла (WHRS), яка включає термоелектричний генератор (ТЕГ) та високоефективний підвищувальний перетворювач постійного струму, розроблений для підвищення енергоефективності морських суден.

Ознайомитись з унікальною концепцією збору енергії можна в статті [9]. Пропонована система використовує термоелектричний генератор (ТЕГ) для перетворення теплової енергії вихлопних газів судового двигуна в електричну. Інноваційний підхід до розробки ТЕГ базується на принципах струнного перетворювача, що дозволяє усунути дисбаланс у втраті потужності та забезпечити

ефективну роботу всіх модулів ТЕГ на їх максимальній точці потужності (МРР), що особливо важливо для масштабного впровадження цієї технології.

У [10] розробляється, виготовляється та тестується прототип термоелектричного генератора (ТЕГ), призначеного для збору енергії з метою живлення бездротових датчиків, що здійснюють моніторинг стану суднового обладнання. Ця технологія базується на ефективному перенесенні тепла між джерелами відпрацьованої теплоти судна та навколишнім повітрям, що дозволяє генерувати електроенергію безпосередньо, без використання рухомих механічних компонентів.

Визначенню коригувального коефіцієнта конвекції для застосування в методі перехідних процесів при аналізі термоелектричних модулів присвячена робота [11]. В ній, також, наведено рекомендації щодо оптимальної кореляції для розрахунку поправочного коефіцієнта конвекції.

Результати комп'ютерного моделювання механічних напружень, що виникають у термоелектричних модулях охолодження за умов циклічного навантаження представлено в [12]. Методом ультразвукового аналізу визначено тензор пружних сталей для матеріалу на основі Bi_2Te_3 , а також встановлено межі його пружної та пластичної деформації.

У [13] висвітлено розробку теплової моделі для системи дистиляції води на основі термоелектричного модуля. Запропонована модель дозволяє проводити детальний аналіз експериментальних даних, отриманих у процесі роботи термоелектричної дистиляційної системи. В ході дослідження встановлено значення для локального коефіцієнту теплопередачі конвекції.

Експериментальній оцінці теплових та електричних характеристик енергетичної системи, що базується на термоелектричному генераторі присвячена робота [14]. Система, що розглядається, містить ребристий пластинчастий радіатор із вентиляторним охолодженням, а також алюмінієвий РТС-нагрівач, який використовується для імітації теплової поведінки мікропроцесорного блоку під навантаженням із швидким підвищенням температури.

Термоелектричні холодильники з вільною конвекцією тепла проаналізовано в статті [15], а термоелектричне охолодження як інноваційний підхід до точкового відведення тепла від надвеликих інтегральних схем (НВІС) розглянуто в [16]. Технологія дозволяє забезпечити ефективне регулювання температури, зменшуючи ризик перегріву. Зазвичай її комбінують із системами примусової конвекції, такими як вентилятори, що підвищує ефективність тепловідведення та сприяє стабільній роботі електронних компонентів.

У [17] запропоновано стратегію оптимізації, що спрямована на максимальне підвищення ефективності примусового конвекційного охолодження в межах заданого об'єму радіатора при фіксованих енергетичних витратах і рівні генерації ентропії.

Дослідження [18] є корисним при вивченні стаціонарних теплових полів у судових електросистемах. У публікації [19] здійснено порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів, які відрізняються за геометрією напівпровідникових елементів, призначених для електрообладнання транспортних засобів. У [20] наведено результати чисельного тривимірного моделювання термоелектричного охолоджувача, що використовується у вимірювальних системах автоматизованого контролю. Особливості застосування 3D-моделювання для формування професійної готовності інженерів висвітлено в [21].

У [22] детально розглянуто можливості використання компенсованих комутаційних пластин у різних варіаціях термоелектричних елементів, призначених для транспортного електрообладнання. У свою чергу, в [23] представлено термоелектричний модуль, в якому застосовано особливу технологію контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів, що дозволяє суттєво знизити вплив термічних напружень. В [24, 25] проаналізовано одношарове демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях, з використанням конкретного прикладу показано вплив термічних напружень на модель термоелектричного модуля з класичною конструкцією без демпфування та на різні моделі термоелектричних модулів з демпфуванням.

Мета дослідження полягає в аналізі впливу режиму природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля судового електрообладнання, а також в

розгляді способів реалізації примусової конвекції із застосуванням вентиляторного або рідинного охолодження.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. В дослідженні проаналізовано вплив типу конвекції на сконструйований термоелектричний модуль судного електрообладнання. Для аналізу роботи термоелектричного модуля суднового електрообладнання з урахуванням електричної, теплової і механічної складової можуть бути використані аналітичні рівняння [2, 4, 5].

Рівняння нерозривності електричного заряду (електрична частина):

$$\nabla \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

де \mathbf{J} – вектор густини електричного струму, А/м²;

\mathbf{D} – вектор густини електричного потоку, Кл/м²;

Рівняння теплопровідності (теплова частина):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = \dot{q}, \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³;

C – теплоємність матеріалу, Дж/°С;

\mathbf{q} – вектор теплового потоку, Вт/м²;

\dot{q} – тепловиділення на одиницю об'єму, Вт/м³.

Рівняння (1) і (2) зв'язані за допомогою визначальних рівнянь для векторів теплового потоку та густини електричного струму, а також визначального рівняння для діелектричного середовища:

$$\mathbf{q} = [\Pi] \mathbf{J} - [\lambda] \nabla T; \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = [\sigma] (E - [\alpha] \nabla T), \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = [\varepsilon] \mathbf{E}, \quad (5)$$

де $[\Pi]$ – матриця коефіцієнтів Пельтьє, В;

$[\lambda]$ – матриця теплопровідності, Вт/(м·К);

$[\sigma]$ – матриця електропровідності, См/м;

$[\alpha]$ – матриця коефіцієнтів Зеєбека, В/К;

\mathbf{E} – вектор інтенсивності електричного поля, В/м;

$[\varepsilon]$ – матриця коефіцієнтів діелектричної проникності, Ф/м.

При незмінності в часі магнітних полів електричне поле \mathbf{E} є безвихровим $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ і може бути визначене за скалярним електричним потенціалом φ :

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (6)$$

Підстановка рівнянь (3)-(6) в рівняння (1)-(2) дає систему система вирішуючих рівнянь при пов'язаному термоелектричному аналізі:

$$\begin{cases} \nabla \left([\varepsilon] \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \nabla ([\sigma] [\alpha] \nabla T) + \nabla ([\sigma] \nabla \varphi) = 0; \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla ([\Pi] \mathbf{J}) - \nabla ([\lambda] \nabla T) = \dot{q}. \end{cases} \quad (7)$$

де член \dot{q} у системі рівнянь (7) включає електричну потужність $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$, що витрачається на генерацію теплоти (джоулевий нагрів) і здійснення роботи полем Зеєбека (термоелектричний ефект) $[\alpha] \cdot \nabla T$.

При пов'язаному термоелектричному аналізі для механічної частини використовується рівняння рівноваги в теорії пружності. Воно описує механічну поведінку матеріалу під впливом термічних та електричних навантажень.

Рівняння рівноваги у тензорній формі (механічна частина):

$$\nabla \sigma + \mathbf{F} = 0, \quad (8)$$

де σ – тензор напружень (напруження в матеріалі);

\mathbf{F} – вектор масових сил;

$\nabla\sigma$ – дивергенція тензора напружень, що описує зміну напруженого стану в об'ємі тіла.

У термоелектричному аналізі враховуються термічні напруження, які виникають через градієнти температури. Для ізотропного матеріалу зв'язок напружень із деформаціями та температурою виражається законом Гука як скалярний добуток тензорів з урахуванням термічного розширення:

$$\sigma = C_{\text{пм}} : (\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{т}}), \quad (9)$$

де $C_{\text{пм}}$ – тензор пружних модулів;

$\varepsilon_{\text{д}}$ – тензор деформацій;

$\varepsilon_{\text{т}}$ – термічна деформація.

Термічна деформація в (9) визначається з виразу:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \alpha_{\text{т}} \Delta T, \quad (10)$$

де $\alpha_{\text{т}}$ – коефіцієнт теплового розширення;

ΔT – зміна температури.

Таким чином, при спільному аналізі електрики, тепла та механіки розв'язується підсумкова система рівнянь, яка включає рівняння нерозривності електричного заряду, рівняння теплопровідності (7) та рівняння механічної рівноваги (8):

$$\begin{cases} \nabla \left([\varepsilon] \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \nabla ([\sigma] [\alpha] \nabla T) + \nabla ([\sigma] \nabla \phi) = 0; \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla ([\Pi] J) - \nabla ([\lambda] \nabla T) = \dot{q}; \\ \nabla (C_{\text{пм}} : (\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{т}})) + F = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Конструювання термоелектричного модуля було пов'язане з розробкою конкретних технічних рішень, включаючи їх реалізацію у вигляді створення креслень деталей термоелектричного модуля, вибір електротехнічних матеріалів для цих деталей, проробку їх з'єднань і врахування електричних, теплових і механічних параметрів.

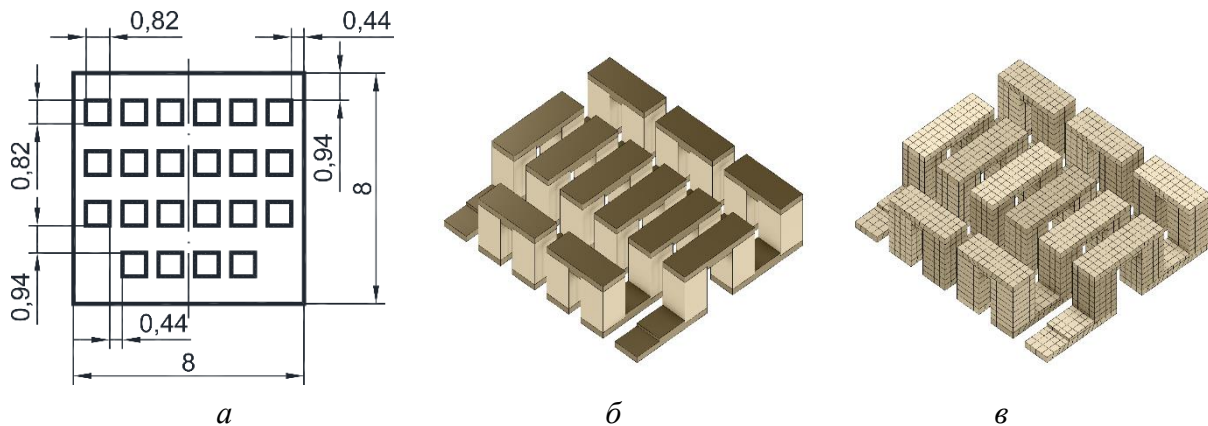


Рисунок 1 – Схема плану розташування P - та N -напівпровідників по площі сконструйованого термоелектричного модуля (а), геометрична (б) та кінцево-елементна (в) модель сконструйованого термоелектричного модуля

На схемі плану розташування 22-х напівпровідників $0,82 \times 0,82$ мм (рис. 1, а) проілюстровано вертикальну симетрію їх розміщення в 4 рядки та 6 стовпців в ізоляційному корпусі термоелектричного модуля з габаритами 8×8 мм, що відносить його до категорії малих (мініатюрних) модулів. Вони можуть використовуватися для дуже компактних пристроїв, де пріоритетом є невеликі габарити та мала маса. Розміри $0,82 \times 0,82$ мм кожного напівпровідника підібрано таким чином, щоб при їх висоті 1,5 мм об'єм кожного з них складав 1 мм^3 . Відстань від краю ізоляційного корпусу до напівпровідника з обох сторін по горизонталі становить 0,44 мм, а по вертикалі – 0,94 мм. Всі відстані між самими напівпровідниками, також, по горизонталі становлять 0,44 мм, а по вертикалі – 0,94 мм. Сконструйований термоелектричний модуль містить 11 напівпровідників P - та 11 напівпровідників N -типу і 23 металеві

контактні комутаційні пластини, що дозволило створити ланцюг з 21-єї напівпровідникової термоелектричної пари. Габаритні розміри Π -подібного ланцюга сконструйованого термоелектричного модуля становлять $6,11 \times 7,12 \times 1,9$ мм. Структуру з'єднання термоелектричних елементів модуля у формі класичного Π -подібного ланцюга обрано через зручність розташування елементів (рівномірне тепло- і електропровідне з'єднання), ефективне охолодження (забезпечує правильний теплообмін між пластинами), мінімальні втрати енергії (оптимальний шлях для електричного струму). При конструюванні та виборі габаритних розмірів, а також кількості напівпровідників для сконструйованого термоелектричного модуля за основу було взято термоелектричний модуль TEC1-01102.

Геометричну та кінцево-елементну моделі термоелектричного модуля (рис. 1, б-в) показано без зовнішнього ізоляційного корпусу і захисного компаунду. Товщина ізоляційного корпусу залежить від товщини керамічних пластин з оксиду алюмінію (Al_2O_3). Теплопровідні матеріали, такі як термопаста з оксидом алюмінію або силіконове мастило, зазвичай наносять на зовнішні поверхні модуля (між корпусом модуля і радіатором), але не всередині. Всередині ізоляційного корпусу немає повітря або вакууму, оскільки вільний простір, як правило, заповнено діелектричним і вологостійким компаундом, наприклад, кремнійорганічним силіконом, епоксидною смолою або склокерамікою. Компаунд не тільки захищає модуль від механічних пошкоджень, а й забезпечує електричну ізоляцію. Наявність повітря або вакууму всередині ізоляційного корпусу модуля є небажаною, оскільки це може призвести до погіршення теплопередачі та пошкодження модуля під час експлуатації.

Креслення та геометричну модель поздовжньої (а, б) та поперечної (в, г) напівпровідникової P - N -термопари термоелектричного модуля суднового електрообладнання наведено на рис. 2. Кожен термоелектричний елемент представляє собою напівпровідникову P - N -термопару з геометрично ідентичними формами напівпровідників-паралелепіпедів $0,82 \times 0,82 \times 1,5$ мм. Поздовжні та поперечні контактні комутаційні пластини мають однакову товщину 0,2 мм і ширину 0,82 мм, проте мають різну довжину відповідно 2,58 мм і 2,08 мм. Кожна поздовжня та поперечна контактна пластина посередині містить спеціальний виступ висотою 0,1 мм і площею відповідно $0,94 \times 0,82$ мм та $0,44 \times 0,82$ мм. Ці виступи допомагають краще з'єднувати P - і N -напівпровідники, забезпечуючи надійний контакт і рівномірний розподіл електричного струму. В якості матеріалу напівпровідників використано телурид вісмуту (Bi_2Te_3), а для металевих контактних комутаційних пластин – мідь (Cu). P - і N -тип таких напівпровідників можна отримати легуванням, в якості домішок, наприклад, можна використати відповідно сурму (Sb) і селен (Se).

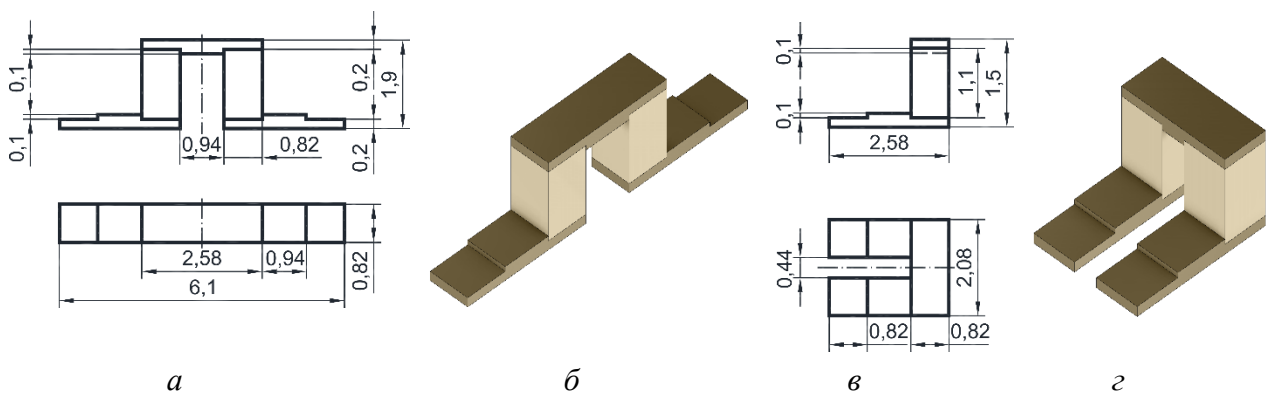


Рисунок 2 – Креслення та геометрична модель поздовжньої (а, б) та поперечної (в, г) напівпровідникової P - N -термопари сконструйованого термоелектричного модуля

Розрахунок сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання проводився з використанням чисельного методу скінченних елементів [26-28]. Він проводився при наступних вихідних параметрах та обраних граничних умовах: для крайньої торцевої поверхні на останній в термоелектричному ланцюзі контактній комутаційній пластині було задано електропотенціал $\varphi_0=0$ В; температура холодних пластин $t_0=0$ °С; для першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі крайні торцеві поверхні вважались нерухомими; матеріали всіх деталей термоелектричного модуля вважались ізотропними. Теплообмін з оточуючим середовищем

досліджено як за рахунок природної (вільної), так і примусової (вимушеної) конвекції з поверхонь гарячих контактних комутаційних пластин термоелектричного модуля, що забезпечувалось вибором необхідного коефіцієнта тепловіддачі відповідно $h=15$ Вт/(м²·К) і $h=50, 100, 200$ Вт/(м²·К). Термоелектричні коефіцієнти Зеебека: $\alpha_P=200$ мкВ/К, $\alpha_N=-200$ мкВ/К; питомі електричні опори: $\rho_P=1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_N=0,9 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_{Cu}=1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; теплопровідності: $k_P=k_N=1,5$ Вт/(м·К), $k_{Cu}=401$ Вт/(м·К); модулі Юнга $E_P=E_N=5,2 \cdot 10^{10}$ Па, $E_{Cu}=1,1 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона $\nu_P=\nu_N=0,28$, $\nu_{Cu}=0,34$; коефіцієнти теплового розширення: $\alpha_{PT}=1,4 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; $\alpha_{NT}=1,3 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Cu}=1,65 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; температура оточуючого середовища $t_{oc}=20$ °С. При стандартному підключенні (червоний «+», чорний «-») струм першим входить в *P*-напівпровідник термоелектричного модуля.

Розподіл робочих параметрів по сконструйованому термоелектричному модулю суднового електрообладнання при силі струму $I=0,5$ А для випадку примусової конвекції з гарячих пластин модуля при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) зображено на рис. 3. Затемненим зонам чорного кольору відповідали найбільші (максимальні) в діапазоні значення електричних, теплових і механічних величин, сірим та світлим зонам відповідно сірого та білого кольору відповідали середні і найменші (мінімальні) в діапазоні значення. Аналіз розподілу робочих параметрів вказує на те, що термоелектричний модуль суднового електрообладнання працює у складних експлуатаційних умовах оскільки одночасно піддається впливу термічних, механічних та електромагнітних навантажень.

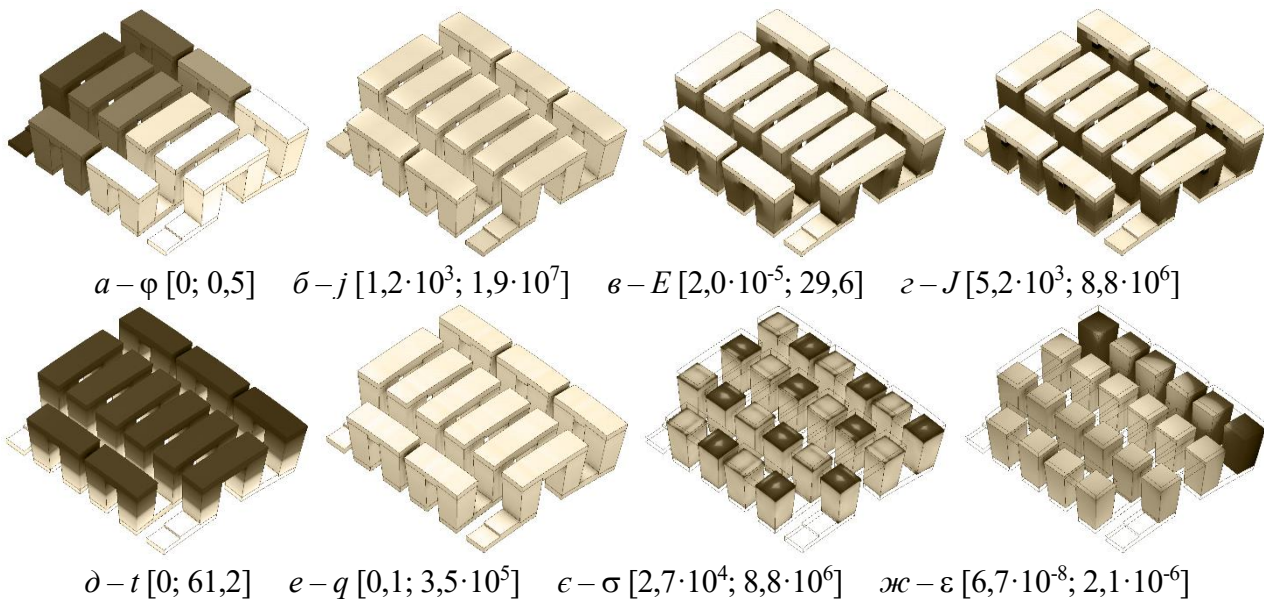


Рисунок 3 – Розподіл електричного потенціалу, φ [В] (*a*) густини струму j [А/м²] (*b*), напруженості електричного поля E [В/м] (*v*), омичного нагріву J [Вт/м³] (*z*), стаціонарного теплового поля t [°С] (*d*), густини теплового потоку q [Вт/м²] (*e*) по термоелектричному модулю, а також розподіл еквівалентного стресу σ [Па] (*\epsilon*) та деформацій ϵ [м] (*ж*) в напівпровідниках термоелектричного модуля при робочому струмі 0,5 А та коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К)

Результати розрахунку у вигляді сімейства кривих для функцій $U(I), E(I), j(I), t(I), q(I), J(I), \sigma(I), \epsilon(I)$ в діапазоні струму 0-1 А представлено на рис. 4-5. Для природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі приймався рівним $h=15$ Вт/(м²·К), а для трьох випадків примусової конвекції $h=50, 100, 200$ Вт/(м²·К), що можна забезпечити зміною способу охолодження модуля за рахунок використання радіатора і вентилятора або рідинного охолодження.

Вибір конкретних значень коефіцієнта тепловіддачі при розрахунку залежить від режиму конвекції (природна або примусова), властивостей оточуючого середовища (повітря, рідина) і характеристик потоку. Для ефективної роботи термоелектричного модуля суднового електрообладнання необхідно забезпечити добре тепловідведення з гарячої сторони, наприклад, за допомогою радіаторів і примусового обдуву. Використання радіаторів, вентиляторів або рідинного охолодження допомагає

підтримувати оптимальний перепад температур і покращує продуктивність модуля. Орієнтовний діапазон значень коефіцієнта тепловіддачі h : в режимі природної конвекції для звичайних умов в повітрі $h=5-25$ Вт/(м²·К), при цьому без активного охолодження ефективність нижча; в режимі примусової конвекції при використанні вентилятора та радіатора $h=20-200$ Вт/(м²·К), разом з цим конкретне значення залежить від швидкості повітряного потоку і конструкції радіатора, оскільки радіатори з більшими площами поверхонь і добрим повітряним потоком забезпечують більш високий коефіцієнт; в режимі примусової конвекції при використанні рідинного охолодження $h=100-10000$ Вт/(м²·К), одночасно коефіцієнт залежить від швидкості потоку рідини, типу течії рідини (ламінарний, перехідний, турбулентний) та її теплопровідності, водяне охолодження зазвичай має $h=500-5000$ Вт/(м²·К), охолодження з фазовим переходом, наприклад, двофазні системи, може досягати $h=10000$ Вт/(м²·К), а інколи і більше. Таким чином, для сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання режим примусової конвекції з рідинним охолодженням буде найбільш ефективним, але й більш складним в реалізації. Режим примусової конвекції з використанням радіатора та вентилятора може бути оптимальним компромісом між ефективністю і простотою.

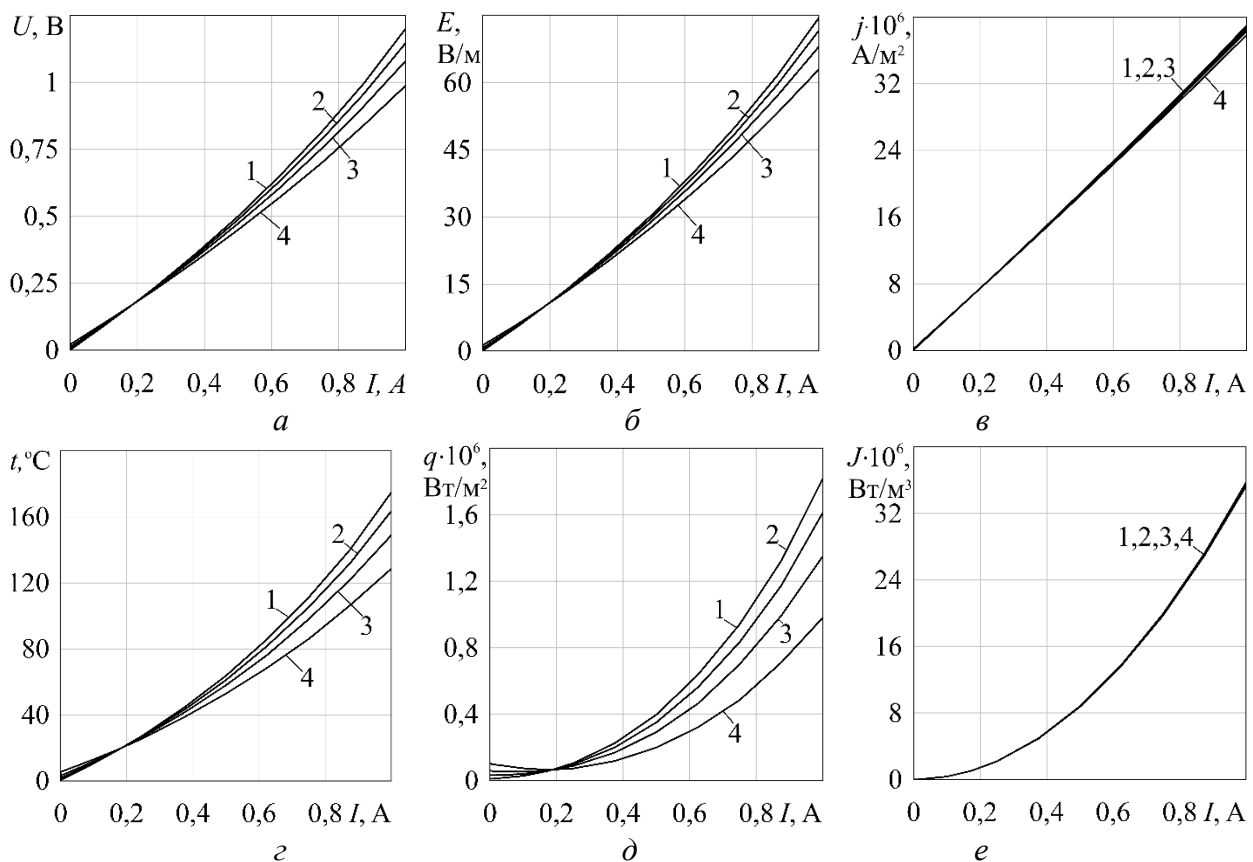


Рисунок 4 – Графіки функцій $U(I)$, $E(I)$, $j(I)$, $t(I)$, $q(I)$, $J(I)$ по напрузі U (а), напруженості електричного поля E (б), густині струму j (в), температурі на гарячій стороні t (г), густині теплового потоку q (д) та омічному нагріву J (е) в термоелектричному модулі в залежності від сили робочого струму I через модуль при різних коефіцієнтах тепловіддачі h :

1 – $h=15$ Вт/(м²·К); 2 – $h=50$ Вт/(м²·К); 3 – $h=100$ Вт/(м²·К); 4 – $h=200$ Вт/(м²·К)

Результати температурного розрахунку наведено на рис. 4, г у вигляді сімейства температурних кривих $t(I)$ при різних коефіцієнтах тепловіддачі h . Температура t в термоелектричному модулі суднового електрообладнання при збільшенні сили струму I зростає. Моделювання проводилось при коефіцієнті тепловіддачі з $h=15$ Вт/(м²·К) (природна конвекція) та коефіцієнтах $h=50, 100, 200$ Вт/(м²·К) (примусова конвекція). При збільшених коефіцієнтах тепловіддачі при зростанні сили струму від 0,2 А до 1 А вплив примусової конвекції посилюється. В області малих струмів термоелектричні модулі не завжди працюють ефективно з різних причин, інколи більша частина підведеної електрики може

перетворюватися на омичний нагрів через зміни у тепловому балансі і подальший перерозподіл теплових потоків.

Отримані характеристики для температури t показують, що при роботі модуля в умовах природної конвекції (крива 1 на рис. 4, з) тепловідведення є менш ефективним через утворення термічного бар'єру. Примусова конвекція (криві 2-4 на рис. 4, з) сприяє зменшенню цього опору, охолодження гарячої сторони модуля, наприклад, з використанням радіатора та вентилятора або рідинного охолодження, збільшує температурний градієнт і покращує продуктивність модуля.

Еквівалентний стрес та деформації щодо термоелектричного модуля суднового електрообладнання надають можливість оцінити його механічний стан під впливом температури, електричного струму за зовнішніх сил. Оцінка еквівалентного напруження за Мізесом надає можливість встановити момент, коли електротехнічний матеріал [29-31] досягне межі текучості та може розпочатися пластична деформація або можуть виникати тріщини чи руйнування. Якщо еквівалентний стрес $\sigma_{\text{екв}}$ перевищить межу текучості, то матеріал термоелектричного модуля може пластично деформуватися, що призведе до його пошкодження або втрати ефективності роботи. Саме тому використання моделювання для нових сконструйованих термоелектричних модулів допомагає оптимізувати їх геометрію та матеріали, щоб зменшити напруження та продовжити термін служби суднового обладнання в цілому.

Напруження (рис. 5, а) в термоелектричних модулях суднового електрообладнання спричинені термічними напруженнями, що викликані різницею температур між гарячою і холодною сторонами, механічними напруженнями, що пов'язані з кріпленням модуля або механічними навантаженнями, залишковими напруженнями, що можуть з'явитись через неоднорідне охолодження під час виготовлення або спаювання контактів, структурними змінами в електротехнічному матеріалі через напруги від електроміграції при достатньо тривалому проходженні струму з відносно високим значенням сили струму через модуль.

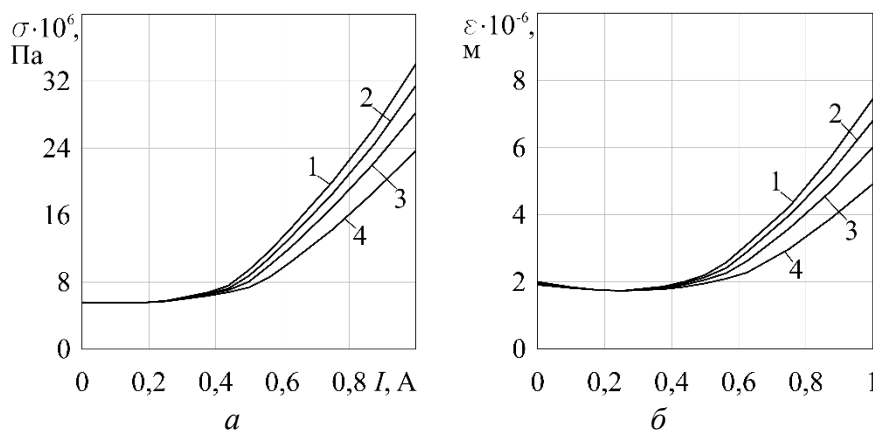


Рисунок 5 – Графіки функцій $\sigma(I)$, $\epsilon(I)$ по еквівалентному стресу σ (а) та деформаціям ϵ (б) в напівпровідниках модуля в залежності від сили робочого струму I при різних коефіцієнтах тепловіддачі h : 1 – $h=15$ Вт/(м²·К); 2 – $h=50$ Вт/(м²·К); 3 – $h=100$ Вт/(м²·К); 4 – $h=200$ Вт/(м²·К)

Деформації (рис. 5, б) вказують на зміщення точок у термоелектричному модулі через термічне розширення/стискання матеріалів, механічні навантаження (затискання, вагу і т.д.), відмінність у коефіцієнтах теплового розширення між шарами модуля. При аналізі деформацій в термоелектричних модулях суднового електрообладнання слід звертати увагу на відхилення геометрії задля уникнення втрати контактів або пошкоджень, на нерівномірність розширення, яка може призвести до відшарування паяних з'єднань.

Таким чином, еквівалентний стрес показує, чи є ризик механічного руйнування через температурні градієнти та навантаження, а деформації допомагають оцінити, чи призведе теплове розширення/стиснення до втрати контактів або механічного пошкодження. Отже, обидва параметри є

важливими при оцінці довговічності та ефективності роботи термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Границя текучості напівпровідникових матеріалів і металевих контактних пластин у термоелектричних модулях суднового електрообладнання суттєво різниться через їхню природу та механічні властивості [32]. У термоелектричних модулях часто застосовують наступні напівпровідникові матеріали: телурид вісмуту (Bi_2Te_3), сплави сурми і телуру (Sb_2Te_3), сплави вісмуту і селену (Bi_2Se_3) і т.д. Ці напівпровідникові матеріали мають відносно низьку механічну міцність і крихкість. Для подібних напівпровідникових сполук границя текучості є низькою та становить менше 50 МПа, залежно від складу і експлуатаційних умов по температурі.

Металеві контактні пластини, що з'єднують напівпровідники, як правило, виготовляють з міді (Cu), нікельованих або посріблених мідних сплавів, алюмінію (Al). Метали мають високу пластичність і значно вищу границю текучості. Границя текучості для чистої міді без домішок становить від 33 до 55 МПа, проте вказані значення діапазону можуть бути іншими в залежності від способу обробки та легування. В термоелектричних модулях суднового електрообладнання в якості металевих контактних пластин часто застосовують мідь, що може мати границю текучості від 70-100 МПа (відпалена) до 210 МПа (холоднокатана). В даний час існують мідні сплави, в яких завдяки спеціальним легуючим компонентам та термічній обробці границя текучості може становити понад 400 МПа. Також, в якості металевих контактних пластин в модулях використовують алюміній з границею текучості від 10-40 МПа (відпалений) до 200 МПа (загартований сплав). Нікельовані покриття металевих контактних пластин термоелектричного модуля суднового електрообладнання можуть мати підвищену механічну стійкість.

Порівнюючи напівпровідникові елементи та металеві контактні пластини термоелектричного модуля варто зазначити наступне. Напівпровідники легко тріскаються і деформуються під механічним навантаженням, особливо під час термічних циклів. Це відноситься і до перехідних шарів, які використовуються для покращення адгезії між напівпровідниками і металевими контактами, а також до бар'єрних шарів, що представляють собою напівпровідникові покриття або вставки для запобігання дифузії металів у напівпровідниковий матеріал, продовжуючи термін експлуатації модуля. Металеві контактні пластини, що виконують роль для розподілу електричного струму та механічної підтримки, значно міцніші. Таким чином, металеві контактні пластини мають у рази, а інколи й на порядок, вищу границю текучості за напівпровідники, що слід враховувати щодо довговічності та надійності термоелектричних пристроїв суднового електрообладнання.

Висновок. В роботі проведено аналіз впливу природної і примусової конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. На основі аналізу отриманих робочих характеристик в діапазоні струмів 0-1 А при різних режимах конвекції встановлено, що для термоелектричного модуля режим примусової конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі $h=200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ виявився максимально ефективним. Отже, для створеного термоелектричного модуля суднового електрообладнання найбільш дієвим варіантом є примусова конвекція способом рідинного охолодження, хоча його реалізація є доволі складною. Альтернативним рішенням, яке забезпечує баланс між ефективністю та простотою, може бути примусова конвекція способом вентиляторного охолодження із застосуванням радіатора та вентилятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лобунець Ю.М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. Термоелектрика. №1. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013., С. 62-67.
2. Анагичук Л.І. Термоелектрика: монографія. Термоелектричні перетворювачі енергії: термоелементи. Елементна база термоелектрики. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. Т. 2. 376 с.

3. Анатичук Л.І., Семенюк В.О. Оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів. Черновці: ПРУТ, 1992. 264 с.
4. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: довідник. Київ: Наук. думка, 1979. 768 с.
5. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
6. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshev D., Hnat H. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Armenakis Y., Chatzis S. Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Washington, DC, USA, 2019, pp. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
8. Zogogianni C.G., Zarkadis N.A., Tatakis E.C. Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK, 2016, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
9. Joseph R., Jet T.K., Qingyu Alex Yan, Lee Meng Yeong. Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 4078-4084. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>
10. Jovanovic V., Ghamaty S., Elsner N. B. Design, Fabrication and testing of quantum well thermoelectric generator. Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm 2006., San Diego, CA, USA, 2006. pp. 1417-1423. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2006.1645511>
11. Lau P. G. Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules. Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407), Baltimore, MD, USA, 1999. pp. 252-255. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.1999.843381>
12. Anatychuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malyshko V.V. Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. Proceedings ICT'03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No.03TH8726), La Grande Motte, France, 2003, pp. 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
13. Al-Madhhachi H., Prest M., Min G. Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), Newcastle Upon Tyne, UK, 2016. pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
14. Ionescu V., Neagu A.A. Investigation of the Energy Conversion Efficiency for a Thermoelectric Generator System with Forced Convection Cooling. 2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2023. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
15. Sochard I.I. Free convection heat transfer thermoelectric refrigerators. IEEE Transactions on Electron Devices. vol. 10. no. 2. pp. 103-104, March 1963, DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1963.15124>
16. Akhsham M., Dousti M.J., Safari S. Neural Network-Based Control of Forced-Convection and Thermoelectric Coolers. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. vol. 44, no. 2, pp. 582-591. Feb. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAD.2024.3438689>
17. Iyengar M., Bar-Cohen A. Least-energy optimization of forced convection plate-fin heat sinks. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. vol. 26, no. 1. pp. 62-70. March 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811484>
18. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубева С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. // Водний транспорт, 2021. № 3 (34). С. 13-21.
19. 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, 2023. Т. 34 (73). № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>

20. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
21. Кириченко О.С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. // Освітологічний дискурс: наукове електронне видання. Київ. 2017. № 3-4 (18-19). С. 296-308.
22. 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, 2023. Вип. 1 (37). С. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
23. Кириченко О.С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2023. № 1 (277). С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
24. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубєва С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
24. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубєва С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
25. 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, 2023, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
26. Вислоух С.П., Волошко О.В., Тимчик Г.С., Філіпова М.В. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 228 с.
27. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середових. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
28. Костюшко І.А., Любашенко Н.Д., Третиник В.В. Методи обчислень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 243 с.
29. Прокопів В.В., Прокопів В.В. Напівпровідникові матеріали функціональної електроніки. Івано-Франківськ: вид-во «Плай» ЦІТ Прикарпатського національного університету ім. Василя Стеваника, 2009. 216 с.
30. Леонтьєв В.О., Бєвз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.
31. Paolo Mele. Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration. MDPI Basel, 2022. 100 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
32. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. London: IntechOpen, 2019. 142 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>

REFERENCES

1. Lobunets, Y.M. (2013). Otsinka kharakterystyk OTES z termoelektrychnymy peretvoriuvachamy enerhii. *Termoelektryka. №1*. Chernivtsi: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 62-67. [in Ukrainian].
2. Anatyshchuk, L.I. (2003). Termoelektrichestvo. Termoelektricheskie preobrazovateli energii: termoelementi. Elementnaya baza termoelektrichestva. [Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters: thermoelements. Elemental base of thermoelectricity.]. Chernovtsi: Institut termoelektrichestva [in Ukrainian].
3. Anatyshchuk, L.I., & Semenyuk, V.A. (1992). Optimalnoe upravlenie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]. Chernivtsi: PRUT [in Ukrainian].
4. Anatyshchuk, L.I. (1979). Termoelementi i termoelektricheskie ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].
5. Goldsmid, H. Julian. (2016). Introduction to Thermoelectricity. Second Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7
6. Hladyshev D., Hnat H. etc. (2023). Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Armenakis Y., Chatzis S. (2019). Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Washington, DC, USA, pp. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
8. Zogogianni C.G., Zarkadis N.A., Tatakis E.C. (2016). Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, UK, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
9. Joseph R., Jet T.K., Qingyu Alex Yan, Lee Meng Yeong. (2016). Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. *IECON 2016 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, pp. 4078-4084. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>
10. Jovanovic V., Ghamaty S., Elsnor N. B. Design. (2006). Fabrication and testing of quantum well thermoelectric generator. *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems. IITHERM 2006*, San Diego, CA, USA, pp. 1417-1423. DOI: <https://doi.org/10.1109/IITHERM.2006.1645511>
11. Lau P. G. (1999). Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules. *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407)*, Baltimore, MD, USA, pp. 252-255. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.1999.843381>
12. Anatyshchuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malysenko V.V. (2003). Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. *Proceedings ICT'03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No.03TH8726)*, La Grande Motte, France, pp. 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
13. Al-Madhhachi H., Prest M., Min G. (2016). Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*, Newcastle Upon Tyne, UK, pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
14. Ionescu V., Neagu A.A. (2023). Investigation of the Energy Conversion Efficiency for a Thermoelectric Generator System with Forced Convection Cooling. *2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania, pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
15. Sochard I.I. (1963). Free convection heat transfer thermoelectric refrigerators. *IEEE Transactions on Electron Devices. vol. 10. no. 2.* pp. 103-104. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1963.15124>
16. Akhsham M., Dousti M.J., Safari S. (2025). Neural Network-Based Control of Forced-Convection and Thermoelectric Coolers. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. vol. 44, no. 2,* pp. 582-591. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAD.2024.3438689>

17. Iyengar M., Bar-Cohen A. (2003). Least-energy optimization of forced convection plate-fin heat sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. vol. 26, no. 1. pp. 62-70. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811484>
18. Taranenko, S.V., Kyrychenko, O.S., Kolesnik, V.V., Kostyuchenko, V.I., Pristupa, S.V., Pastukh, O.V., & Golubieva S.M. (2021). Modelyuvannya statsionarnogo teplovogo polya strumoprovodnykh shin sudnovykh GRShch [Modeling of the stationary thermal field of jet-conducting tires of ship main switchboards]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 3(34)), (pp. 13-21) [in Ukrainian].
19. Kyrychenko, O.S. (2023). Porivnyalni analiz kharakteristik termoelektrichnykh moduliv z rizmnyimi geometrichnyimi formami napivprovodnykiv dlya yelektrooladnannya transportu [An up-to-date analysis of the characteristics of thermoelectric modules with different geometric shapes of conductors for electrical transport]. *Vcheni zapiski Tavriiskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 34(73)), (pp. 256-263). DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39> [in Ukrainian].
20. Kyrychenko, O.S., Bilyuk, I.S., Shareiko, D.Yu., Fomenko, A.M., Gavrilov, S.O., & Bugrim, L.I. (2018). Chiselne trimirne modelyuvannya termoelektrichnogo okholodzhuvacha vimiryuvalnogo yelektroustatkuvannya avtomatichnykh sistem [Numerical trimmer modeling of thermoelectric cooler and electrical installation of automatic systems]. *Vcheni zapiski Tavriiskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 29(68)), (pp. 58-63) [in Ukrainian].
21. Kyrychenko, O.S. (2017). Kriterii formuvannya gotovnosti do profesiinoi diyalnosti inzheneriv na osnovi 3D-modelyuvannya [Criteria for determining readiness for professional activity of engineers based on 3D modeling]. *Osvitologichnii diskurs – Ostological discourse*. (Vols. 3-4(18-19)), (pp. 296-308) [in Ukrainian].
22. Taranenko, S.V., Kyrychenko, O.S., Pristupa, S.V., Golubieva, S.M., & Pastukh, O.V. (2023). Termoelektrichni moduli z kompensovanyimi komutatsiynymi plastinami dlya pristroiv sudnoyi yenergetiki [Thermoelectric modules with compensated switching plates for ship power systems]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 1(37)), (pp. 201-213). DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23> [in Ukrainian].
23. Kyrychenko, O.S. (2023). Termoelektrichni moduli z rizmnyimi sposobami kontaktynogo z'ednannya napivprovodnykovykh termoelementiv [Thermoelectric modules with various methods of contact connection of conductor thermoelements]. *Visnik Skhidnoukraiïnskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodymyra Dalya – Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal*. (Vols. 1(277)), (pp. 31-37). DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37> [in Ukrainian].
24. Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Pristupa S.V., Golubieva S.M. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
25. Kyrychenko, O., Golubieva, S., & Morneva, M. (2023). 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, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432> [in Ukrainian].
26. Visloukh, S.P., Voloshko, O.V., Timchik, G.S., & Filipova, M.V. (2021). Komp'yuterne modelyuvannya protsesiv ta sistem. Chiselni metodi [Computer modeling of processes and systems. Numerical Methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, Politekhnik [in Ukrainian].
27. Karvatskyi A.I. (2015). Metod skinchennykh elementiv u zadachakh mekhaniky sutsilnykh seredovykh. Prohramna realizatsiia ta vizualizatsiia rezultativ. K.: NTUU «KPI». [in Ukrainian].
28. Kostyushko, I.A., Lyubashenko, N.D., & Tretinik, V.V. (2021). Metodi obchislen [Calculation methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, Politekhnik [in Ukrainian].
29. Prokopiv V.V., Prokopiv V.V. (2009). Napivprovodnykovy materialy funktsionalnoi elektroniky. Ivano-Frankivsk: vyd-vo «Plai» TsIT Prykarpatskoho natsionalnogo universytetu im. Vasylia Stevanyka. [in Ukrainian].

30. Leontiev, V.O., Bevz, S.V., & Vidmish, V.A. (2013). Yelektrotekhnichni materiali [Electrical materials]. Vinnitsa: VNTU [in Ukrainian].
31. Paolo Mele. (2022). Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration. MDPI Basel, DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
32. Memon Saim. (2019). Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by. London: IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>

Kyrychenko O.S.

INFLUENCE OF CONVECTION MODE AND METHOD ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE DESIGNED THERMOELECTRIC MODULE FOR SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT

The paper analyzes the influence of the natural and forced convection modes on the performance characteristics of the designed thermoelectric module for ship electrical equipment. The peculiarities of the operation of thermoelectric devices in sea and river navigation are noted, in particular, the influence of increased humidity, corrosive activity of salt water, vibrations and variable temperature loads. The peculiarities of natural and forced convection are considered, as well as their influence on the efficiency of heat removal. The need to use forced convection for effective cooling of the thermoelectric module is especially emphasized. It is determined that natural convection is often insufficient for heat dissipation, especially under conditions of increased thermal loads in the ship environment. Methods for increasing the heat transfer coefficient during forced convection are analyzed, in particular, the use of air cooling using a fan and radiator, as well as liquid cooling. The optimal thermal conditions are determined to ensure stable operation of the thermoelectric module in ship conditions. The thermoelectric module with an area of 8×8 mm was designed, which refers it to the category of small modules. The overall dimensions of the U-shaped circuit of the module are $6.11 \times 7.12 \times 1.9$ mm. The placement of 11 P-type semiconductors and 11 N-type semiconductors, 23 metal contact switching plates made it possible to create a 21-semiconductor thermocouple in the designed module. According to the results of numerical calculations, the distribution of the main operating parameters of the designed thermoelectric module of ship electrical equipment at a current strength of 0.5 A in the forced convection mode with a heat transfer coefficient $h=50$ W/(m²·K) was obtained. Also, the performance characteristics of the designed thermoelectric module when changing the current in the range of 0-1 A for different heat transfer coefficients were investigated. The analysis of parameters, in particular current density j , voltage U , electric field strength E , hot side temperature t , heat flux density q , ohmic heating J , as well as equivalent stress σ and deformations ε , was carried out.

Keywords: thermoelectric module, design, convection, heat transfer coefficient, performance characteristics, thermoelectric Peltier effect, ship electrical equipment.

Стаття прийнята 15.03.2025