

© Кириченко О.С.

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІНІАТЮРНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У роботі спроектовано термоелектричний модуль для суднових енергетичних і навігаційних систем на базі модуля ТЕС1-01703. Наведено математичні рівняння для аналізу експлуатаційних характеристик модуля при протіканні електричних, теплових і механічних процесів. Для проектування геометрії термоелектричного модуля використовується система автоматизованого проектування (САПР), а для розрахунку основних експлуатаційних характеристик спеціалізоване програмне середовище скінченно-елементного аналізу. Спроектований термоелектричний модуль має габаритні розміри $15 \times 15 \times 4,2$ мм, він містить 18 напівпровідників P- і 18 напівпровідників N-типу, 37 металевих контактних комутаційних пластин. На цій основі створено термоелектричний ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6$ мм. Розрахунок проведено чисельно з обраними граничними умовами по електричній, тепловій і механічній частині. У моделі охолодження модуля передбачено за рахунок примусової (вимушеної) конвекції вентиляторним способом охолодження при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{amb}=25$ °С. За допомогою комп'ютерного моделювання виявлено, як розподіляються основні показники моделі при силі струму 3,3 А. Ці показники включають електричну напругу, температуру, густина електричного струму, напруженість електричного поля, джоулевий нагрів, густина теплового потоку, механічні напруження та деформації. Під час моделювання виявлено області, де температура, механічні напруження та деформації мають підвищені значення. Також побудовано графіки залежностей робочих показників від сили струму при її зміні від 0 до 3,5 А. Ці графіки показують, як змінюються електрична напруга, температура, густина струму, напруженість електричного поля, джоулевий нагрів, густина теплового потоку, механічні напруження та деформації зі збільшенням сили струму. Аналіз отриманих даних дозволив встановити нелінійний характер залежностей робочих показників від сили струму. Визначено граничні режими роботи модуля, при яких забезпечується його ефективність, термічна стійкість та механічна надійність у складі суднових систем.

Ключові слова: ефект Пельтьє, термоелектричний модуль, суднові системи, проектування, чисельне моделювання, електротепломеханічні процеси, робочі параметри.

Постановка проблеми. Суднові енергетичні та навігаційні системи містять у своєму складі термоелектричне обладнання [1-3], яке відіграє важливу роль у функціонуванні судна. Термоелектричне обладнання забезпечує безперервну роботу шаф автоматики, розподільчих пристроїв, систем керування, силової електроніки, допоміжних вузлів, а також стабільність температурних умов чутливих навігаційних приладів. Робота термоелектричного обладнання, призначеного для охолодження і термостабілізації, базується на ефекті Пельтьє [4-6]. Він полягає у прямому перетворенні електричної енергії у тепловий потік. Незважаючи на відносно невеликий ККД, термоелектричне обладнання для охолодження та термостабілізації у ряді випадків має низку суттєвих переваг. Термоелектричні охолоджувачі компактні та не містять рухомих частин, під час їх роботи відсутні шум і вібрації, вони мають високу ефективність точкового охолодження при високій точності та швидкодії. Крім того, системи з термоелектричним охолодженням потребують мінімального експлуатаційного обслуговування на відміну від компресорних систем, що є складнішими, мають порівняно великі габарити та під час своєї роботи потребують регулярного технічного обслуговування і перевірки щодо

знос компресора, герметичності циркуляційних контурів і відсутності витоків холодоагенту (зокрема фреону). Підвищення вимог до безпеки водного транспорту зумовлює необхідність підвищення ефективності та надійності судових систем [7]. При цьому експлуатація термоелектричного обладнання за реальних судових умов залишається недостатньо дослідженою. Таким чином, виникає потреба в проектуванні сучасних компактних термоелектричних модулів з прогнозованими експлуатаційними характеристиками для судових енергетичних і навігаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд новітніх досліджень у галузі термоелектричного охолодження підтверджує зростаючу зацікавленість у застосуванні термоелектричних модулів у судових системах. У роботі [8] розглядаються термоелектричні матеріали як у процесі перетворення тепла в електрику, так і у зворотному процесі. Оскільки ці матеріали дозволяють здійснювати пряме перетворення тепла в електрику і навпаки, підвищення їхньої ефективності та удосконалення системної архітектури залишається центральним завданням. Розгляду сучасних досягнень у галузі термоелектричних матеріалів присвячена робота [9]. В ній зазначено, що на підвищення продуктивності термоелектричних ефектів впливає легування, розробка нових наноструктур і синтез нових сполук матеріалів.

У [10] запропоновано здійснювати виробництво електроенергії на судах з використанням тепла, що виділяється судовими двигунами. Розглянуто використання термоелектричних генераторів, встановлених у корпусі нижче ватерлінії. У роботі [11] розглянута система утилізації відпрацьованого тепла для застосування на судах, побудована на основі термоелектричного генератора та підвищувального DC/DC-перетворювача. Аналізуються характеристики і режими роботи такої системи в судовій DC-мережі. У статті [12] описано розробку автономної системи живлення судових двигунів термоелектричними генераторами за допомогою SEPIC-перетворювача, що забезпечує більш повний відбір енергії з відпрацьованих газів шляхом оптимізації режимів роботи.

У дослідженні [13] розглядаються напруження в термоелектричних модулях при механічних циклічних навантаженнях і пропонуються методи підвищення їх механічної стійкості на основі досвіду і чисельних досліджень. Застосування методу скінченних елементів у поєднанні з експериментальним підтвердженням дозволяє ефективно досліджувати конструкції щодо механічних напружень у них [14]. Проведений аналіз та отримані результати можуть бути корисними і при оцінці механічної надійності термоелектричних модулів для судових систем.

У роботі [15] розроблено модель термоелектричної системи дистиляції. Показано, що тепловіддача і температура мають великий вплив на процес теплообміну. Отримано наукові результати по аналізу умов охолодження термоелектричних модулів у системах суден. У [16] експериментально досліджується, наскільки ефективно перетворюється енергія у термоелектричній системі з примусовим охолодженням. Встановлено, що різниця температур, навантаження і умови теплообміну мають великий вплив на характеристики термоелектричного модуля і його вихідну потужність.

Наведені дослідження становлять значний науковий інтерес, проте не охоплюють у повній мірі застосування термоелектричних модулів в енергетичних і навігаційних системах. З огляду на те, що тематика застосування термоелектричних модулів в судових системах динамічно розвивається, аналіз електротепломеханічних процесів в реальних експлуатаційних режимах зумовлює необхідність подальших комплексних досліджень у цьому напрямі.

Мета роботи – проаналізувати струмові залежності основних робочих параметрів термоелектричного модуля для судових енергетичних і навігаційних систем, спроектованого на основі модуля ТЕС1-01703, з урахуванням примусової конвекції вентиляторним способом охолодження.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Математичний опис електричних, теплових і механічних процесів у термоелектричному модулі для судових енергетичних і навігаційних систем може бути представлений наступними рівняннями.

Рівняння нерозривності електричного заряду:

$$\nabla \cdot (J + \partial D / \partial t) = 0, \quad (1)$$

де $\nabla \cdot$ – оператор дивергенції;

J – вектор густини електричного струму,

A/m^2 ; D – вектор електричної індукції,

Кл/м²; t – час, с.

Закон електропровідності з урахуванням термоелектричних ефектів:

$$\mathbf{J} = \sigma_e (-\nabla\varphi - S\nabla T), \quad (2)$$

де σ_e – електрична провідність,

См/м; φ – електричний потенціал, В;

S – коефіцієнт Зеєбека, В/К;

∇ – оператор градієнта;

T – температура, К.

Зв'язок електричного поля з потенціалом:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad (3)$$

де \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля, В/м.

Рівняння теплопровідності:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + q_J - \nabla \cdot \mathbf{q}_P \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

q_J – об'ємна густина джоулевого тепловиділення, Вт/м³;

\mathbf{q}_P – вектор теплового потоку ефекту Пельтьє, Вт/м².

Джоулеве тепловиділення:

$$q_J = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (5)$$

де “ \cdot ” – скалярний добуток.

Тепловий потік ефекту Пельтьє:

$$\mathbf{q}_P = S T \mathbf{J}. \quad (6)$$

Рівняння теплопровідності у стаціонарному режимі:

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} - \nabla \cdot (S T \mathbf{J}) = 0. \quad (7)$$

Рівняння механічної рівноваги:

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

де $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор механічних напружень, Па;

\mathbf{F} – вектор об'ємних сил, Н/м³.

Закон пружності:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{th}), \quad (9)$$

де \mathbf{C} – тензор пружних сталей; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформацій; $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$ – термічна деформація.

Термічна деформація:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha (T - T_0) \mathbf{I}, \quad (10)$$

де α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, 1/К;

T_0 – опорна температура, К;

\mathbf{I} – одиничний тензор другого рангу.

При проєктуванні термоелектричного модуля для енергетичних і навігаційних систем за базовий приймається одноступеневий модуль ТЕС1-01703 з габаритними розмірами 15×15 мм при товщині 4,2 мм з максимально допустимим струмом до 4,07 А. Він виготовлений компанією Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. (Китай), що спеціалізується на виробництві термоелектричних модулів серії ТЕС [17].

Процес проєктування термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем передбачає використання систем автоматизованого проєктування (САПР) при створенні геометрії, а також середовища чисельного моделювання на основі методу скінченних елементів (рис. 1) [18-21].

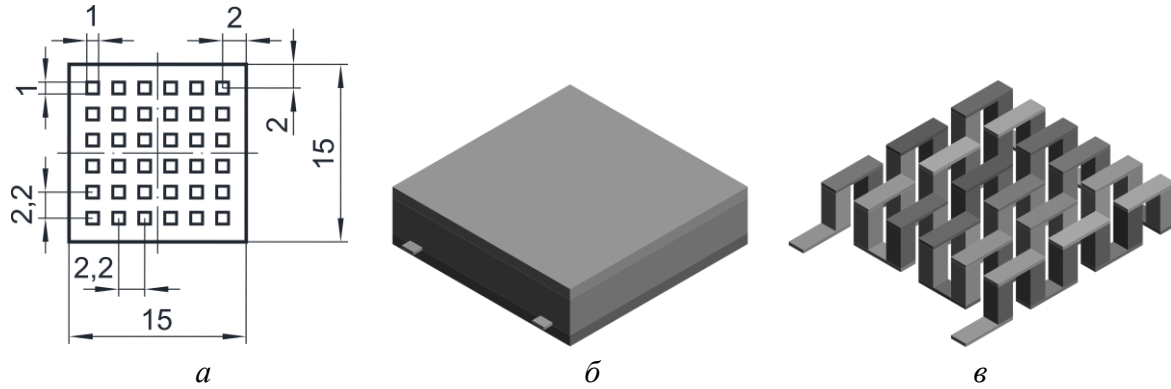


Рисунок 1 – Проектування геометрії термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем на базі модуля TEC1-01703: *а* – схема плану розміщення напівпровідникових елементів; *б* – повна геометрична 3D-модель з пластинами кераміки і периметральним герметиком; *в* – виокремлена 3D-модель активної зони модуля

На схемі плану розташування напівпровідників спроектованого термоелектричного модуля з 36-х напівпровідників 1×1 мм (рис. 1, *а*) проілюстровано вертикальну та горизонтальну симетрію їх розміщення в 6 рядів та 6 стовпців в ізоляційному корпусі термоелектричного модуля з габаритами 15×15 мм, що відносить його до класу малих (мініатюрних) термоелектричних модулів. Модулі такого класу використовуються для дуже компактних пристроїв в суднових системах з обмеженнями щодо габаритних розмірів і маси. При площі 1 мм^2 кожного напівпровідника і висоті 2,2 мм об'єм кожного з них складає $2,2 \text{ мм}^3$. Відстань від краю ізоляційного корпусу до геометричних центрів крайніх напівпровідників (по контуру активної зони модуля) по горизонталі і по вертикалі становить 2 мм. Відстані між геометричними центрами всіх напівпровідників по горизонталі та по вертикалі становлять 2,2 мм. Спроектований термоелектричний модуль містить 18 напівпровідників *P*- і 18 напівпровідників *N*-типу і 37 металевих контактних комутаційних пластин. Це дозволило створити ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6$ мм. Структура з'єднань термоелектричних елементів з класичною формою (топологією) П-подібного ланцюга використовується через зручне розміщення елементів (рівномірність при тепло- і електропровідному з'єднанні), ефективність охолодження (забезпечується правильний теплообмін між контактними пластинами), мінімальність втрат енергії (оптимальність шляху для електричного струму).

Повна геометрична 3D-модель термоелектричного модуля $15 \times 15 \times 4,2$ мм з керамічними пластинами і периметральним герметиком та виокремлена 3D-модель активної зони модуля проілюстровані на рис. 1, *б-в*. В якості матеріалу двох пластин ізоляційного корпусу з товщиною 0,8 мм кожна використано оксидну кераміку (Al_2O_3). Периметральний силіконовий герметик має товщину 0,5 мм. Кожен термоелектричний елемент представляє собою напівпровідникову *P-N*-термопару з геометрично ідентичними формами з'єднувальних контактних пластин-паралелепіпедів $3,2 \times 1 \times 0,2$ мм. Матеріалом напівпровідників є телурид вісмуту (Bi_2Te_3), а металевих контактних комутаційних пластин – мідь (Cu). *P*- і *N*-тип цих напівпровідників отримують за допомогою легування, коли в якості домішок можна застосувати відповідно сурму (Sb) і селен (Se).

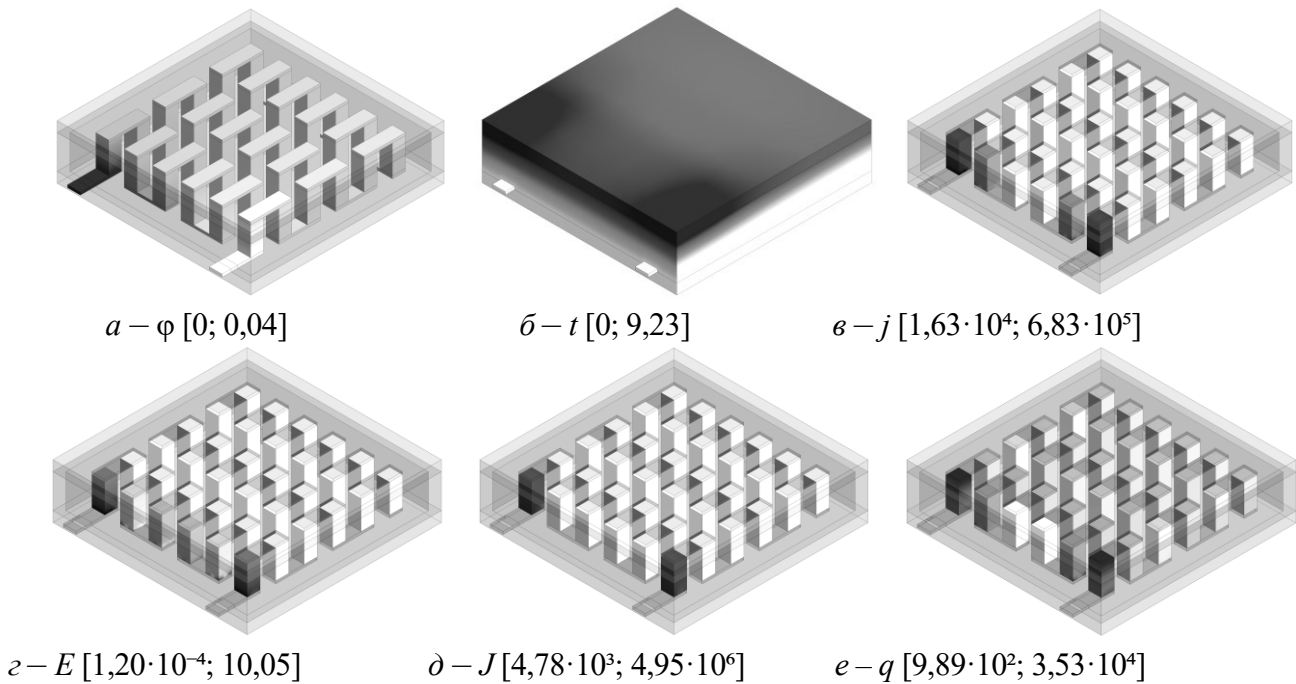
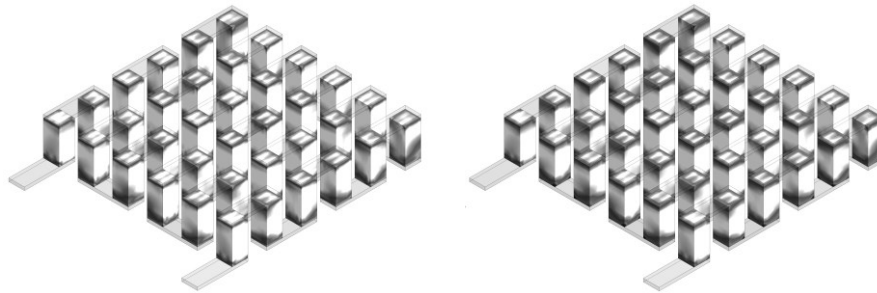


Рисунок 2 – Розподіл електричного потенціалу φ [В] (а), стаціонарного теплового поля t [°С] (б), густини струму j [А/м²] (в), напруженості електричного поля E [В/м] (г), омичного нагріву J [Вт/м³] (д), густини теплового потоку q [Вт/м²] (е) по термоелектричному модулю при силі струму $I=3,3$ А за коефіцієнта тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температури конвекції $t_{\text{amb}}=25$ °С

Розрахунок спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем проводиться чисельно з використанням методу скінченних елементів [22-25]. При цьому задано наступні граничні умови: електричний потенціал $\varphi_0=0$ В на крайній торцевій поверхні контактної комутаційної пластини, останньої в термоелектричному П-подібному ланцюзі; температура холодних пластин модуля вважалась зафіксованою $t_0=0$ °С; для першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі крайні торцеві поверхні вважались нерухомими; крайні торцеві поверхні першої і останньої вивідних пластин вважались нерухомими. Матеріали всіх деталей термоелектричного модуля вважаються ізотропними [26-27]. Теплообмін з оточуючим середовищем здійснюється за допомогою примусової (вимушеної) конвекції з зовнішньої поверхні гарячої керамічної пластини вентиляторним способом охолодження при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{\text{amb}}=25$ °С. Термоелектричні коефіцієнти Зеєбека: $\alpha_P=200$ мкВ/К, $\alpha_N=-200$ мкВ/К; питомі електричні опори: $\rho_P=\rho_N=1,24 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_{Cu}=1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{Seal}=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $\rho_{Cer}=3,16 \cdot 10^{13}$ Ом·м; теплопровідності: $k_P=k_N=1,29$ Вт/(м·К), $k_{Cu}=394$ Вт/(м·К), $k_{Seal}=0,2$ Вт/(м·К), $k_{Cer}=13,74$ Вт/(м·К); модулі Юнга $E_P=E_N=4,975 \cdot 10^{10}$ Па, $E_{Cu}=1,26 \cdot 10^{11}$ Па, $E_{Seal}=5,0 \cdot 10^6$ Па, $E_{Cer}=2,46 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона $\nu_P=\nu_N=0,24$, $\nu_{Cu}=0,34$, $\nu_{Seal}=0,49$, $\nu_{Cer}=0,24$; коефіцієнти теплового розширення: $\alpha_{Pt}=\alpha_{Nt}=2,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Ct}=1,7 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Seal}=2,5 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $\alpha_{Cer}=9,04 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. За стандартного підключення («+» червоний; «-» чорний) струм спочатку входить в P-напівпровідник модуля.

Розподіл робочих параметрів по спроектованому термоелектричному модулю для суднових енергетичних і навігаційних систем при силі струму $I=0,5$ А при примусовій конвекції із зовнішньої поверхні гарячої керамічної пластини при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{\text{amb}}=25$ °С зображено на рис. 2-3. Темні тони (до чорного) відповідають максимальним значенням величин, світлі (до білого) – мінімальним, а сірі – проміжним.



$a - \sigma [4,35 \cdot 10^4; 1,29 \cdot 10^7] \text{ Па}$ $b - \varepsilon [1,14 \cdot 10^{-6}; 2,60 \cdot 10^{-4}]$

Рисунок 3 – Розподіл еквівалентного стресу σ [Па] (а) і деформацій ε [м] (б) в напівпровідниках термоелектричного модуля при силі струму $I=3,3 \text{ А}$ за коефіцієнта тепловіддачі $h=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і температури конвекції $t_{\text{amb}}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

Результати розрахунку робочих параметрів спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем наведено на рис. 4 у вигляді функціональних залежностей $U(I), t(I), j(I), E(I), J(I), q(I), \sigma(I), \varepsilon(I)$ в діапазоні струмів $I=0-3,5 \text{ А}$. Для примусової (вимушеної) конвекції вентиляторним способом охолодження прийнято коефіцієнт тепловіддачі $h=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура конвекції $t_{\text{amb}}=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

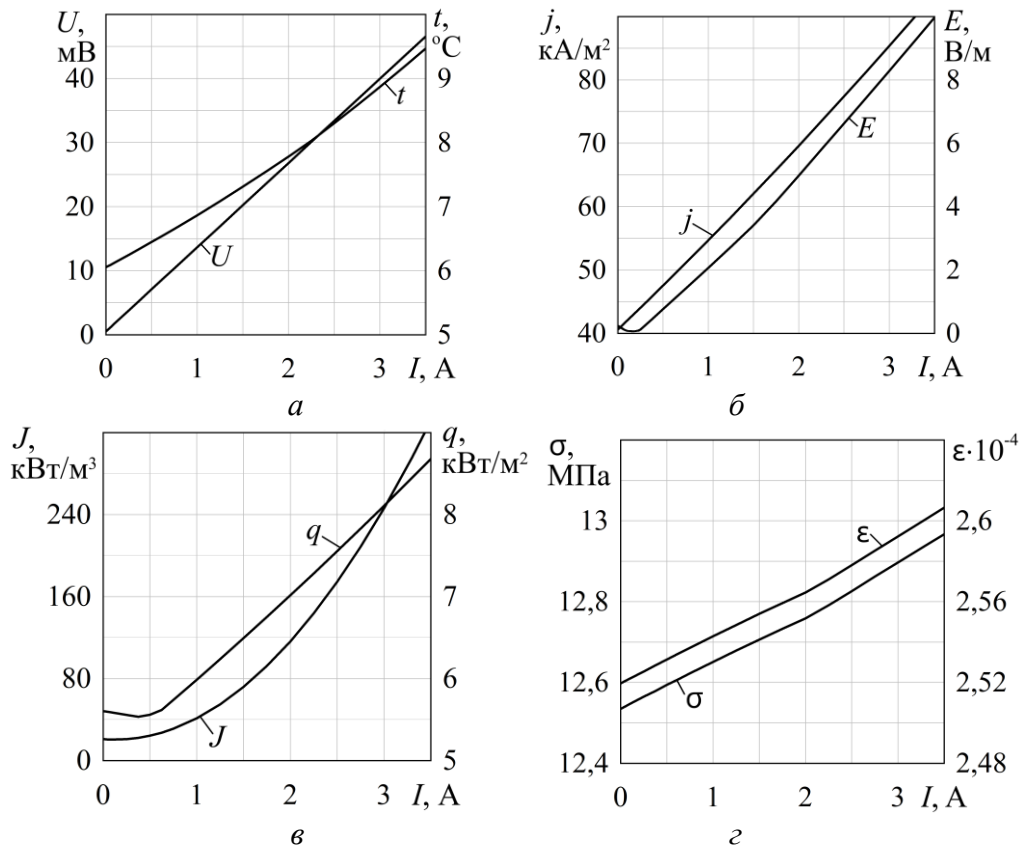


Рисунок 4 – Графіки функцій $U(I), t(I), j(I), E(I), J(I), q(I), \sigma(I), \varepsilon(I)$ по напрузі U (а), температурі на гарячій стороні t (а), густині струму j (б), напруженості електричного поля E (б), омичному нагріву J (в), густині теплового потоку q (в), еквівалентному стресу σ (з) та деформаціям ε (з) в термоелектричному модулі в залежності від сили струму I

Аналіз графіків при варіаціях сили струму I від 0 до 3,5 А дає можливість встановити, що отримані залежності мають нелінійний характер. При цьому електрична напруга U в спроектованому термоелектричному модулі для енергетичних і навігаційних систем зростає до 46,5 мВ, температура t до 9,5 $^\circ\text{C}$, густина струму j до 89,9 kA/m^2 , напруженість електричного поля E до 10,7 $\text{В}/\text{м}$, джоулевий

нагрів J до $331,6 \text{ кВт/м}^3$, густина теплового потоку q до $8,7 \text{ кВт/м}^2$, еквівалентні механічні напруження σ до $13,0 \text{ МПа}$, деформації ε до $2,6 \cdot 10^{-4}$.

Висновок. У дослідженні спроектовано термоелектричний модуль $15 \times 15 \times 4,2 \text{ мм}$ з 36 напівпровідниками на базі модуля TEC1-01703. Спроектований термоелектричний модуль містить 18 напівпровідників P - і 18 напівпровідників N -типу і 37 металевих контактних комутаційних пластин. Це дозволило створити ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6 \text{ мм}$. Встановлено нелінійний характер залежностей основних робочих параметрів спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем від сили струму в номінальному діапазоні $0-3,5 \text{ А}$. При типовому струмі робочої області $I=2,5 \text{ А}$ спроектованого модуля напруга $U=3,3 \text{ В}$, температурний перепад між сторонами модуля $t=8,3 \text{ }^\circ\text{C}$, густина струму $j=73,1 \text{ кА/м}^2$, напруженість електричного поля $E=7,5 \text{ В/м}$, джоулевий нагрів $J=174,5 \text{ кВт/м}^3$, густина теплового потоку $q=7,6 \text{ кВт/м}^2$, механічні напруження $\sigma=12,8 \text{ МПа}$ і деформації $\varepsilon=2,58 \cdot 10^{-4}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Анатичук Л.І. Термоелектрика: монографія. Термоелектричні перетворювачі енергії: термоелементи. Елементна база термоелектрики. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. Т. 2. 376 с.
2. Анатичук Л.І., Семенюк В.О. Оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів. Чернівці: ПРУТ, 1992. 264 с.
3. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: довідник. Київ: Наук. думка, 1979. 768 с.
4. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
5. Rowe D.M. (Ed.) Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1024 p.
6. Rowe D.M. (Ed.) CRC Handbook of Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 1995. 701 p.
7. Тимошук О.М., Мельник О.В. Формування механізму реалізації логістичної стратегії річкових портів. Проблеми економіки. 2013. № 3. С. 149-155.
8. Bell L.E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. Science, 2008. 321, pp. 1457–1461. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
9. Mele P. Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration. Basel: MDPI, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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>
14. Vatulia G., Gerlici J., Lovska A., Fomin O., Okorokov A., Pavliuchenkov M. Experimental studies on the strength of a flatcar during shunting impacts. Applied Sciences. 2023, 13(8), 4901. <https://doi.org/10.3390/app13084901>
15. 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>
16. 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/EMES58375.2023.10171737>
17. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. Specification of Thermoelectric Module TEC1-01703 [Електронний ресурс]. 2022. 3 р. Режим доступу: https://www.thermonamic.com/Pro_View.asp?Id=806

18. 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, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
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. Серія: Технічні науки. Київ: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2023. Том 34 (73). № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
20. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Приступа С.В., Голубева 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>
21. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК: науково-технічний журнал. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60-63.
22. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
23. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method. 6th edition. Boston: Cengage Learning, 2017. 944 p.
24. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 2005. 684 p.
25. Fish J., Belytschko T. A First Course in Finite Elements. Hoboken: Wiley, 2007. 336 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470510858>
26. Memon S. (Ed.) Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications. London: IntechOpen, 2019. 142 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>
27. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 2008. 7, pp. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2090>

REFERENCES

1. Anatyshuk, L. I. (2003). Termoelektryka: termoelektrychni peretvoriuvachi enerhii: termoelementy. Elementna baza termoelektryky [Thermoelectricity: thermoelectric energy converters: thermoelements. Element base of thermoelectricity] (Vol. 2). Chernivtsi: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy.
2. Anatyshuk, L. I., & Semeniuk, V. O. (1992). Optymal'ne keruvannia vlastyvostiamy termoelektrychnykh materialiv i prykladiv [Optimal control of properties of thermoelectric materials and devices]. Chernivtsi: PRUT.
3. Anatyshuk, L. I. (1979). Termoelementy i termoelektrychni prystroi [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka.
4. Goldsmid, H. J. (2016). Introduction to thermoelectricity (2nd ed.). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
5. Rowe, D. M. (Ed.). (2006). Thermoelectrics handbook: Macro to nano. Boca Raton: CRC Press.
6. Rowe, D. M. (Ed.). (1995). CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press.
7. Tymoshchuk, O. M., & Melnyk, O. V. (2013). Formuvannia mekhanizmu realizatsii lohistychnoi stratehii richkovykh portiv [Formation of the mechanism for implementing the logistics strategy of river ports]. Problemy ekonomiky, 3, 149–155.
8. Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 321, 1457–1461. <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
9. Mele, P. (2022). Recent advances in thermoelectric materials for high efficiency energy conversion and refrigeration. Basel: MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
10. 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. In IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS) (pp. 430–437). <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
11. 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. In IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD) (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
12. Joseph, R., Jet, T. K., Yan, Q. A., & Yeong, L. M. (2016). Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. In IEEE IECON 2016 (pp. 4078–4084). <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>

13. Anatyshuk, L. I., Balazyuk, V. N., Luste, O. J., & Malyshko, V. V. (2003). Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. In International Conference on Thermoelectrics (ICT) (pp. 619–622). <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
14. Vatulia, G., Gerlici, J., Lovska, A., Fomin, O., Okorokov, A., & Pavliuchenkov, M. (2023). Experimental studies on the strength of a flatcar during shunting impacts. Applied Sciences, 13(8), 4901. <https://doi.org/10.3390/app13084901>
15. Al-Madhhachi, H., Prest, M., & Min, G. (2016). Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. In ICSAE 2016 (pp. 213–217). <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
16. Ionescu, V., & Neagu, A. A. (2023). Investigation of the energy conversion efficiency for a thermoelectric generator system with forced convection cooling. In EMES 2023 (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
17. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. (2022). Specification of thermoelectric module TEC1-01703. Retrieved from https://www.thermonamic.com/Pro_View.asp?Id=806
18. Kyrychenko, O., Golubieva, S., & Morneva, M. (2023). Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. In IEEE MEES 2023 (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
19. Kyrychenko, O. S. (2023). Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznyimi heometrychnymi formamy napivprovodnykiv dlia elektroobladnannia transportu [Comparative analysis of characteristics of thermoelectric modules with different semiconductor geometries for transport electrical equipment]. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 34(73), 256–263. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
20. Taranenko, S. V., Kyrychenko, O. S., Pristupa, S. V., & Holubieva, S. M. (2024). Dempfovannia termichnykh napruzhen v termoelektrychnykh modeliakh sudnovoho elektroobladnannia [Damping of thermal stresses in thermoelectric modules of ship electrical equipment]. Vodnyi transport, 1(39), 69–82. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
21. Kyrychenko, O. S., Kostiuchenko, V. I., & Zakharov, D. O. (2017). Modeliuvannia statsionarnykh teplovykh poliv strumoprovodnykh shyn riznogo profilu [Modeling of stationary thermal fields of busbars of different profiles]. Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK, 1(6), 60–63.
22. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). The finite element method: Its basis and fundamentals (7th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
23. Logan, D. L. (2017). A first course in the finite element method (6th ed.). Boston: Cengage Learning.
24. Reddy, J. N. (2005). An introduction to the finite element method (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
25. Fish, J., & Belytschko, T. (2007). A first course in finite elements. Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470510858>
26. Memon, S. (Ed.). (2019). Advanced thermoelectric materials for energy harvesting applications. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>
27. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 7, 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>

Kyrychenko O.S.

ANALYSIS OF THE OPERATING CHARACTERISTICS OF A MINIATURE THERMOELECTRIC MODULE FOR SHIPBOARD POWER AND NAVIGATION SYSTEMS

This work presents the design of a thermoelectric module for ship power and navigation systems based on the TESI-01703 module. Mathematical equations are presented for analyzing the operational characteristics of the module during electrical, thermal and mechanical processes. A computer-aided design (CAD) system is used to design the geometry of the thermoelectric module, and a specialized finite element analysis software environment is used to calculate the main operational characteristics. The designed thermoelectric module has overall dimensions of $15 \times 15 \times 4.2$ mm, it contains 18 P-type semiconductors and 18 N-type semiconductors, 37 metal interconnect plates. Based on this, a thermoelectric circuit of 35 contact connections between semiconductors, which form 18 thermoelectric pairs, was created. The overall dimensions of the active zone of the designed thermoelectric module (U-shaped circuit) are $12 \times 12 \times 2.6$ mm. The calculation was performed numerically with selected boundary conditions for the electrical, thermal and mechanical parts. In the model, the module is cooled by forced convection using a fan cooling method at a heat transfer coefficient $h=50$

W/(m²·K) and a convection temperature $t_{amb}=25$ °C. Using computer simulation, the distribution of the main parameters of the model at a current of 3.3 A was obtained. These parameters include electric voltage, temperature, electric current density, electric field strength, Joule heating, heat flux density, mechanical stresses and deformations. During the simulation, areas were identified where temperature, mechanical stresses and deformations have increased values. Also, graphs of the dependences of operating parameters on the current when it changes from 0 to 3.5 A were constructed. These graphs show how the electric voltage, temperature, current density, electric field strength, Joule heating, heat flux density, mechanical stresses and deformations change with increasing current. Analysis of the obtained data allowed us to establish the nonlinear nature of the dependences of operating parameters on the current. The limit operating modes of the module were determined, at which its efficiency, thermal stability and mechanical reliability as part of ship systems are ensured.

Keywords: *Peltier effect, thermoelectric module, shipboard systems, design, numerical modeling, electro-thermo-mechanical processes, operating parameters*

Стаття прийнята 10.02.2026