

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

У статті проаналізовано термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. Дослідження пов'язане з актуальними питаннями усунення або зменшення до прийнятних меж термічних напружень в термоелектричних модулях. Термічні напруження виникають в них через наявні температурні розширення та стискання електротехнічних матеріалів, що є наслідком одночасного нагріву та охолодження в напівпровідниках. На базі п'яти створених моделей термоелектричних елементів шляхом їх з'єднання в «П-подібну зміїку» сформовано п'ять моделей відповідних термоелектричних модулів. Один модуль мав класичну конструкцію, а чотири інших мали в своєму складі компенсовані контактні комутаційні пластини. Кожен з цих термоелектричних модулів складався з 39 напівпровідникових термопар, містив 20 напівпровідників Р-типу і 20 напівпровідників N-типу. Верхні (гарячі) контактні комутаційні пластини у кількості 20 шт. представляли собою компенсовані комутаційні пластини у формі пластин-ресор, термоелектричний модуль з класичною конструкцією не містив компенсаційних елементів (компенсаторів). Габаритні розміри п'яти термоелектричних модулів, що підлягали аналізу, були наступними: одна класична конструкція та три конструкції з компенсаторами $50 \times 59 \times 6$ мм, одна конструкція зі збільшеною товщиною компенсатора $52 \times 62 \times 7$ мм. За результатами розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів по об'єму термоелектричних елементів. Побудовано та проаналізовано робочі характеристики термоелектричних модулів при зміні сили струму від 0 до 5 А для густини струму, напруги, напруженості електричного поля, різниці температур між гарячими і холодними контактними комутаційними пластинами, густини теплового потоку, резистивного нагріву, еквівалентного стресу і величини деформацій. Показано переваги застосування чисельних методів розрахунку для вирішенні польових задач суднової електроенергетики.

Ключові слова: термоелектричні модулі, термоелектричні елементи, компенсовані комутаційні пластини, термічні напруження, пристрої, суднова енергетика, водний транспорт.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження пов'язана зі створенням та вдосконаленням математичних моделей для нових конструкцій термоелектричних модулів, що працюють на основі термоелектричного ефекту прямого перетворення теплової енергії в електричну і навпаки [1, 3]. Термоелектричні ефекти завдяки ряду достатньо цінних особливостей отримали велике практичне застосування в різних областях транспортної, в тому числі суднової енергетики [15]. Пристрої суднової енергетики, які працюють на основі термоелектричних ефектів, мають значний технічний ресурс, відрізняються відносною простотою, надійністю, безшумністю роботи і відсутністю рухомих частин, а також універсальністю з точки зору підведення і відведення теплоти. Незважаючи на вищевикладене, невирішеними або вирішеними не в повній мірі залишаються питання термічних напружень в термоелектричних модулях, що може призвести до виходу з ладу суднового

електрообладнання. Уникнути подібних поломок можна за рахунок застосування термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами.

Причини виникнення термічних напружень в термоелектричних модулях пов'язані з необхідністю застосування в них електротехнічних матеріалів, які повинні мати достатньо високу тепло- та електропровідність, що в свою чергу призводить до більшого коефіцієнта лінійного розширення [13; 15]. Зазначені властивості ще більше посилюють вплив температурних розширень на стороні гарячих комутаційних пластин термоелектричних модулів. При невеликих перепадах температур в термоелектричних охолоджувальних пристроях і теплових насосах для уникнення термічних напружень іноді виявляється достатнім використовувати компенсаційні елементи (компенсатори) на гарячих контактних комутаційних пластинах. В даній роботі, враховуючи рекомендації робіт [14, 16, 17], сформовано та розраховано термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні наявна значна кількість наукових праць щодо використання термоелектричних ефектів на водному транспорті та в суднової енергетиці.

Наприклад, роботи [1, 2, 3] є надзвичайно змістовними та заслуговують глибокого ознайомлення з ними. З поміж іншого в них викладені загальні основи теорії термоелектричних ефектів з відповідним математичним описом, а також оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів.

В брошурі [4] в популярній формі викладені питання історії відкриття термоелектричних ефектів, шляхи становлення науки про термоелектрику, перспективи розвитку термоелектричного методу перетворення енергії.

Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту проведено в [7], а в [8] виконано чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. Критеріальні особливості формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання висвітлено в [9].

Застосування компенсованих комутаційних пластин в різних конструкціях термоелектричних елементів для транспортного електрообладнання проаналізовано в [10, 13, 15].

Публікації [18, 20] та деякі розділи роботи [19] можуть виявитись корисними під час проєктування термоелектричних модулів для електрообладнання водного транспорту.

Мета дослідження полягає в аналізі робочих характеристик термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики, встановленні впливу компенсаторів на термічні напруження та термоелектричний ефект Пельтьє в термоелектричних модулях.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Правильність конструктивного рішення одиничного термоелектричного елемента в значній мірі визначає якісну роботу в цілому термоелектричного модуля для пристроїв суднової енергетики. Однією з ряду основних вимог до раціональної конструкції термоелектричного елемента є відповідність щодо усунення або значного зменшення до прийнятних меж термічних напружень, що виникають в результаті одночасного механічного стиснення холодних і механічного розширення гарячих контактних комутаційних пластин. При пропусканні через термоелектричний елемент постійного струму верхня контактна комутаційна пластина починає нагріватися і відповідно розширюватися. Нижні контактні комутаційні пластили, навпаки, починають охолоджуватися та стискатися. Внаслідок цього виникає пара сил, під впливом яких у термоелементі створюються значні термічні напруження, які можуть призвести до пошкодження або руйнування останнього. Оскільки повністю усунути термічні напруження неможливо, тому необхідно розробляти такі конструкції термоелементів, в яких

термічні напруження мають бути зменшені настільки, що вони не призводять до виходу термоелектричного елемента з ладу.

Під час ефекту Пельтьє протікання електричного струму в неоднорідному або анізотропному середовищі він може визивати окрім резистивних тепловиділень додаткове виділення або поглинання тепла в залежності від напрямку струму. В загальному випадку кількість тепла Пельтьє, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу, визначається виразом [2]:

$$q_{\pi} = \left(\frac{\partial \Pi_{ki}}{\partial x_k} \right) j_i = T \left(\frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial x_k} \right)_T j_i, \quad (1)$$

де Π_{ki} і α_{ik} – компоненти тензора Пельтьє і термоЕРС,

j_i – компонента густини струму;

x_k – координата.

В виразі (1) індекс T означає, що похідні взято при постійній температурі, а для ізотропного середовища математичний вираз (1) набуває вигляду [2]:

$$q_{\pi} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \right\}_T j_i = T \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \right\}_T j_i. \quad (2)$$

У найпростішому випадку ефект Пельтьє проявляється у вигляді виділення або поглинання тепла на контакті двох різних матеріалів. Потужність джерела тепла Пельтьє пропорційна кількості електрики, що проходить через контакт за одиницю часу:

$$Q_{\pi} = \Pi_{AB} I. \quad (3)$$

При цьому коефіцієнт Пельтьє Π_{AB} визначається лише природою матеріалів A і B . Термоелектричний коефіцієнт Пельтьє пов'язаний з термоелектричним коефіцієнтом Зеєбека співвідношенням, яке носить назву другого термодинамічного співвідношення Томсона:

$$\Pi_{AB} = T \alpha_{AB}, \quad (4)$$

де T – температура контакту.

Формування моделей термоелектричних модулів геометричним моделюванням передбачає попереднє створення моделей термоелектричних елементів як його базових структурних одиниць за допомогою об'єктно-орієнтованої (векторної) графіки. Креслення термоелектричних елементів, що підлягали аналізу, їх геометричні та кінцево-елементні моделі показано на рис. 1. Креслення вбачаються в якості шаблонних зображень, в загальному випадку для створення тривимірних моделей об'єктів водного транспорту за кресленнями необхідно мати три креслення об'єкту – спереду, зверху і збоку, а інколи ще й ззаду. Крім того, самі креслення повинні містити інформацію про всі необхідні розміри, бути зрозумілими і правильно розташованими щодо осей координат, містити дані про електротехнічні матеріали, з яких складається об'єкт. Так, креслення термоелектричних елементів на рис. 1, *a-d* були основою для створення їх тривимірних геометричних (рис. 1, *e-u*) і кінцево-елементних (рис. 1, *i-m*) моделей. Геометрична модель кожного термоелектричного елемента, що розглядався, складалась з пари напівпровідників P - та N -типу з формою кубів з довжиною ребра 5 мм і мідних контактних комутаційних пластин. Конструкції термоелектричних елементів (рис. 1, *b-d*) містять спеціальний компенсатор. Принцип даного компенсатора полягає у виготовленні гарячої комутаційної пластини як компенсованої комутаційної пластини в формі пластини-ресори. У цьому випадку під впливом термічних напружень, що виникають в термоелектричному елементі, вона буде згинатися, не виходячи за межі пружної

деформації. Переріз пластини-ресори має бути підібрано таким чином, щоб робочий струм, який проходить через неї, не виділяв помітної кількості джоулевого тепла.

Математичні моделі термоелектричних елементів можна розраховувати чисельно методом скінченних елементів або методом кінцевих різниць [5, 6, 11]. Кожен з цих методів має як свої переваги, так і свої недоліки. При цьому граничні умови при розрахунку математичних моделей термоелектричних елементів можуть бути прийняті наступними: нульовий електричний потенціал $\varphi_0=0$ В на крайніх торцевих поверхнях правої нижньої контактної комутаційної пластини термоелектричного елемента; нульова температура $t_0=0$ °С всіх нижніх поверхонь нижніх контактних комутаційних пластин термоелектричних елементів; дві крайні торцеві поверхні нижніх контактних комутаційних пластин всіх термоелектричних елементів вважались нерухомими. Під час розрахунку зовнішні поверхні термоелектричних елементів вважались адіабатично теплоізованими. Термоелектричні коефіцієнти напівпровідників *P*- та *N*-типу, ізотропні питомі електричні опори, ізотропні коефіцієнти теплопровідності, модулі пружності Юнга, коефіцієнти Пуассона та інші розрахункові коефіцієнти для однотипних електротехнічних матеріалів [12] у всіх моделях термоелектричних елементів приймалися однаковими.

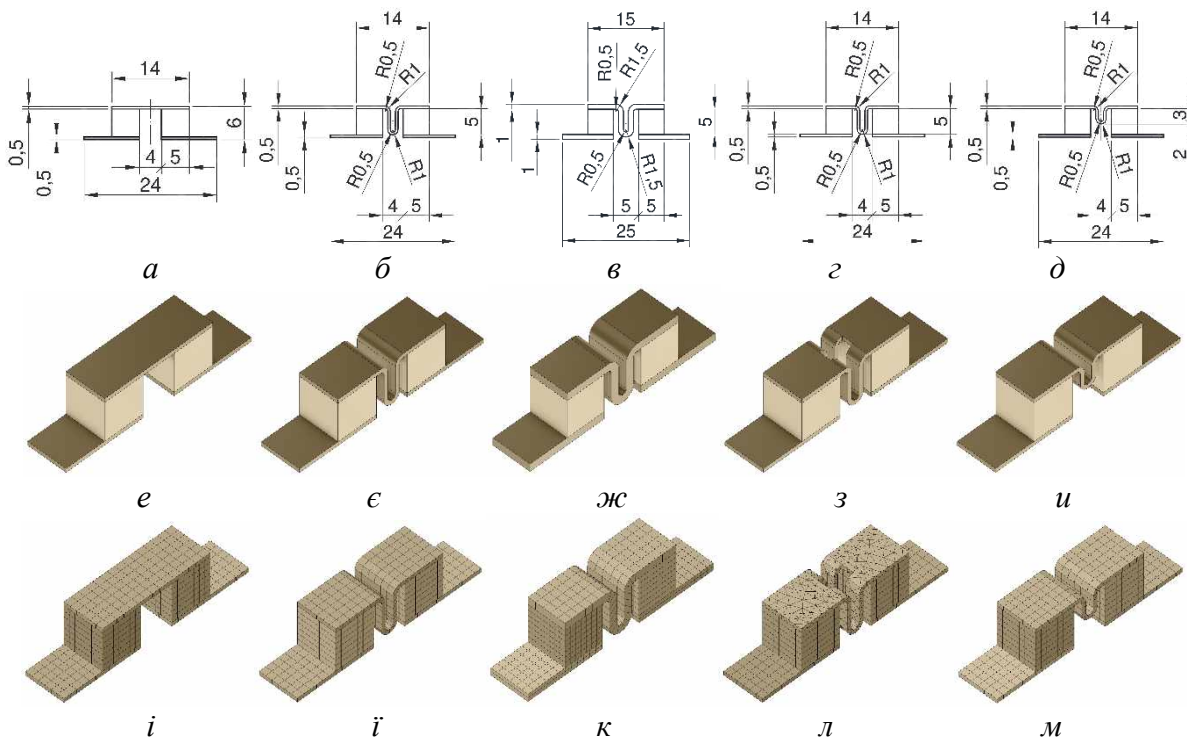


Рисунок 1 – Креслення (а-д), геометричні (е-и) та кінцево-елементні (і-м) моделі термоелектричних елементів: класична конструкція (а, е, і); конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (б, є, і); конструкція з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (в, ж, к); конструкція з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (г, з, л); конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (д, и, м)

Результати розрахунку моделей термоелектричних елементів, що підлягали аналізу, представлено в графічній формі на рис. 2-4. Графічно максимальним значенням в діапазонах робочих параметрів відповідає чорний колір (темні області моделей), середнім і мінімальним значенням робочих параметрів – сірий та білий кольори (сірі та світлі області моделей).

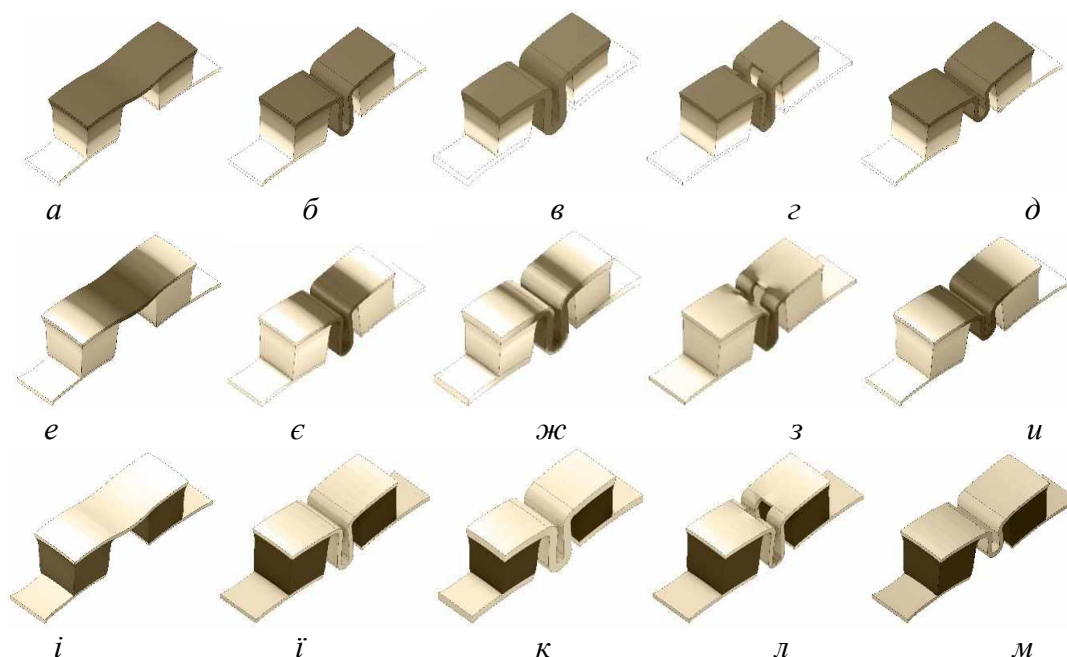


Рисунок 2 – Розподіл температури t [°C] (*a-d*), густини теплового потоку q [Вт/м²] (*e-u*) і резистивного нагріву J [Вт/м³] (*i-m*) по моделям термоелектричних елементів при силі робочого струму $I=5$ А: в діапазоні t [0; 55,7], q [0,1; $1,4 \cdot 10^4$], J [$9,0 \cdot 10^2$; $4,3 \cdot 10^5$] для класичної конструкції (*a, e, i*); в діапазоні t [0; 56,0], q [0,1; $2,0 \cdot 10^4$], J [$9,0 \cdot 10^2$; $4,3 \cdot 10^5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (*б, є, і*); в діапазоні t [0; 55,7], q [0,3; $1,2 \cdot 10^4$], J [$2,1 \cdot 10^2$; $4,3 \cdot 10^5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (*в, ж, к*); в діапазоні t [0; 56,1], q [0,1; $3,4 \cdot 10^4$], J [$1,5 \cdot 10^2$; $4,3 \cdot 10^5$] для конструкції з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (*г, з, л*); в діапазоні t [0; 55,8], q [0,1; $2,1 \cdot 10^4$], J [$9,0 \cdot 10^2$; $4,3 \cdot 10^5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (*д, и, м*)

Температурні максимуми t зафіксовано на верхніх (гарячих) мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 2, *a-d*). Середні значення температури t по моделям термоелектричних елементів були наступними: 25,9 °C (рис. 2, *a*), 29,5 °C (рис. 2, *б*), 25,3 °C (рис. 2, *в*), 30,9 °C (рис. 2, *г*), 28,5 °C (рис. 2, *д*). Найбільші значення теплового потоку q зосереджено на верхніх (гарячих) мідних контактних комутаційних пластинах в зонах між напівпровідниками (рис. 2, *e-u*). Середні значення густини теплового потоку q по моделям термоелектричних елементів становили: 3114 Вт/м² (рис. 2, *e*), 4380,2 Вт/м² (рис. 2, *є*), 2857,2 Вт/м² (рис. 2, *ж*), 5285,1 Вт/м² (рис. 2, *з*), 4028,5 Вт/м² (рис. 2, *и*). Максимальні значення резистивного нагріву J спостерігались в напівпровідниках (рис. 2, *i-m*). Середні значення резистивного нагріву J по моделям термоелектричних елементів були наступними: $3,1 \cdot 10^5$ Вт/м³ (рис. 2, *i*), $2,9 \cdot 10^5$ Вт/м³ (рис. 2, *ї*), $2,5 \cdot 10^5$ Вт/м³ (рис. 2, *к*), $2,2 \cdot 10^5$ Вт/м³ (рис. 2, *л*), $2,9 \cdot 10^5$ Вт/м³ (рис. 2, *м*).

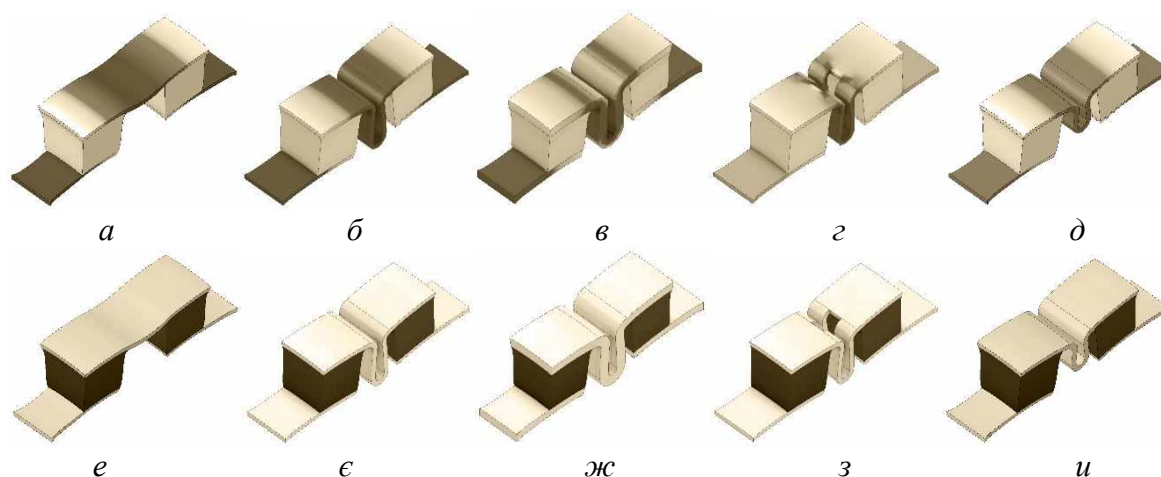


Рисунок 3 – Розподіл густини струму j [A/m^2] ($a-d$) і напруженості електричного поля E [$\text{В}/\text{м}$] ($e-u$) по моделям термоелектричних елементів при силі робочого струму $I=5$ А: в діапазоні j [$7,7 \cdot 10^3$; $2,1 \cdot 10^6$], E [0 ; $4,5$] для класичної конструкції (a, e); в діапазоні j [$8,4 \cdot 10^3$; $2,8 \cdot 10^6$], E [0 ; $4,5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (b, e); в діапазоні j [$1,0 \cdot 10^3$; $1,7 \cdot 10^6$], E [0 ; $4,5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (v, zh); в діапазоні j [$2,8 \cdot 10^3$; $4,8 \cdot 10^6$], E [0 ; $4,6$] для конструкції з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (z, z); в діапазоні j [$8,4 \cdot 10^3$; $2,9 \cdot 10^6$], E [0 ; $4,5$] для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (d, u)

Найбільші значення густини струму j сконцентровано на верхніх (гарячих) мідних контактних комутаційних пластинах в зонах між напівпровідниками (рис. 3, $a-d$). Середні значення густини струму j по моделям термоелектричних елементів були наступними: $6,1 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, a), $7,7 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, b), $4,6 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, v), $9,0 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, z), $7,3 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, d). Скупчення максимальних значень напруженості електричного поля E було зосереджено в об'ємах напівпровідникових матеріалів (рис. 3, $e-u$). Середні значення напруженості електричного поля E по моделям термоелектричних елементів були наступними: 2,7 В/м (рис. 3, e), 2,4 В/м (рис. 3, e), 2,3 В/м (рис. 3, zh), 2,3 В/м (рис. 3, z), 2,5 В/м (рис. 3, u).

Пікові значення еквівалентного стресу σ спостерігались на ребрах верхніх граней напівпровідників (рис. 4, $a-d$). Середні значення еквівалентного стресу σ в напівпровідниках були наступними: $1,3 \cdot 10^7$ Па (рис. 4, a), $1,3 \cdot 10^7$ Па (рис. 4, b), $1,3 \cdot 10^7$ Па (рис. 4, v), $1,3 \cdot 10^7$ Па (рис. 4, z), $1,3 \cdot 10^7$ Па (рис. 4, d). Зони максимальних деформацій ϵ в термоелектричному елементі з класичною конструкцією та термоелектричних елементах з компенсованою комутаційною пластиною розташовані в різних місцях (рис. 4, $e-u$). Середні деформації ϵ в напівпровідниках були наступними: $2,9 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4, e), $1,9 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4, e), $2,9 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4, zh), $1,9 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4, z), $2,1 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4, u).

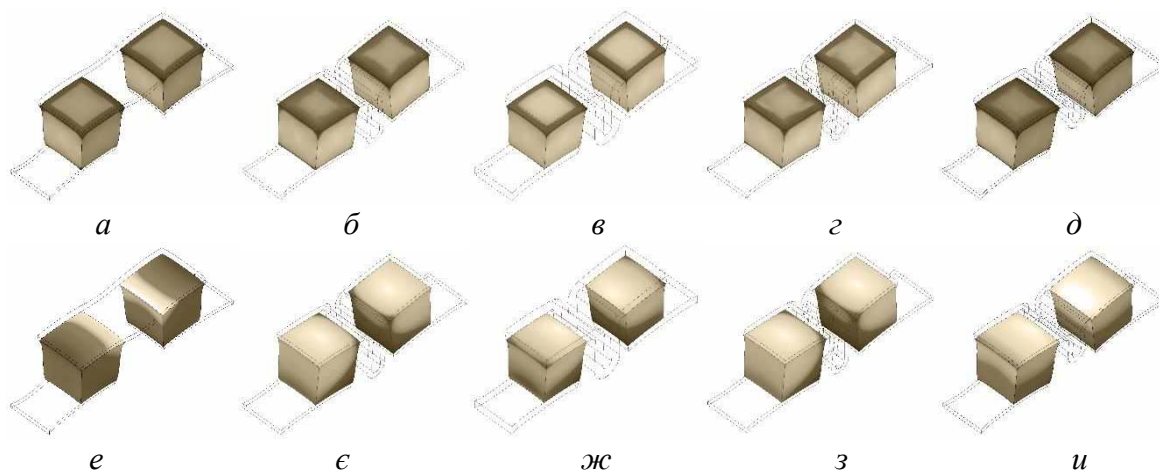


Рисунок 4 – Розподіл еквівалентного стресу σ [Па] (*a-d*) і деформацій ε [м] (*e-u*) в напівпровідниках моделей термоелектричних елементів при силі робочого струму $I=5$ А: в діапазоні σ $[1,0 \cdot 10^6; 6,4 \cdot 10^7]$, ε $[1,6 \cdot 10^{-6}; 3,5 \cdot 10^{-6}]$ для класичної конструкції (*a, e*); в діапазоні σ $[1,0 \cdot 10^6; 5,9 \cdot 10^7]$, ε $[3,7 \cdot 10^{-7}; 4,2 \cdot 10^{-6}]$ для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (*б, є*); в діапазоні σ $[1,1 \cdot 10^6; 7,3 \cdot 10^7]$, ε $[9,6 \cdot 10^{-7}; 3,9 \cdot 10^{-6}]$ для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (*в, ж*); в діапазоні σ $[1,0 \cdot 10^6; 5,9 \cdot 10^7]$, ε $[1,5 \cdot 10^{-7}; 4,7 \cdot 10^{-6}]$ для конструкції з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (*г, з*); в діапазоні σ $[1,0 \cdot 10^6; 6,0 \cdot 10^7]$, ε $[5,4 \cdot 10^{-7}; 3,7 \cdot 10^{-6}]$ для конструкції з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (*д, и*)

Отримані результати для термоелектричних елементів дозволяють встановити зони максимального та мінімального розподілу їх основних робочих параметрів. На додаток до розподілу електричних і теплових параметрів в термоелектричних елементах розглянуто механічні параметри – еквівалентний стрес σ та деформації ε , які може бути використано для оцінки міцності та довговічності напівпровідників.

На базі п'яти створених моделей термоелектричних елементів шляхом їх з'єднання в П-подібну змійку сформовано п'ять моделей відповідних термоелектричних модулів для пристроїв суднової енергетики. Один з них з класичною конструкцією, а чотири інших з компенсованими контактними комутаційними пластинами (рис. 5). Кожен такий термоелектричний модуль складався з 39 напівпровідникових термопар, містив 20 напівпровідників *P*-типу і 20 напівпровідників *N*-типу. Верхні (гарячі) контактні комутаційні пластини у кількості 20 шт. представляли собою компенсовані комутаційні пластини у формі пластин-ресор (рис. 5, *б, в, г, д*), термоелектричний модуль з класичною конструкцією не містив компенсаційних елементів (компенсаторів). Габаритні розміри термоелектричних модулів (без врахування товщин пластин ізоляційного корпусу) були наступними: $50 \times 59 \times 6$ мм (рис. 5, *а, б, г, д*); $52 \times 62 \times 7$ мм (рис. 5, *в*).

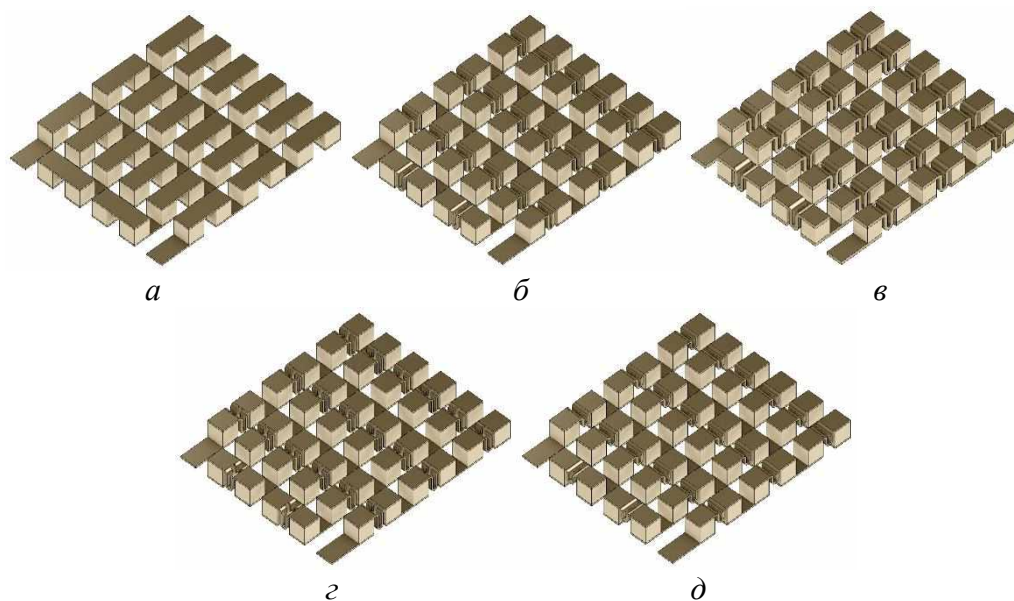


Рисунок 5 – Геометричні моделі термоелектричних модулів: 1 – класична конструкція (а); 2 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (б); 3 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (в); 4 – конструкція з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (г); 5 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (д)

Кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів пристроїв суднової енергетики показано на рис. 6.

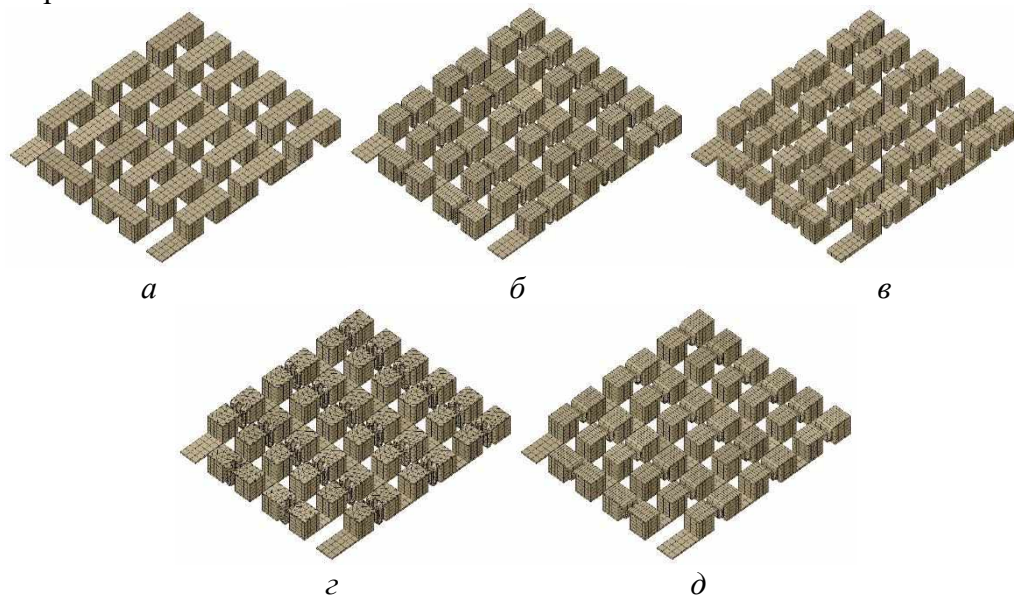


Рисунок 6 – Кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів: 1 – класична конструкція (а); 2 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (б); 3 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм (в); 4 – конструкція з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм (г); 5 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм (д)

Граничні умови при розрахунку термоелектричних модулів: нульовий електричний потенціал $\varphi_0=0$ В на крайній торцевій поверхні останньої контактної комутаційної пластини;

нульова температура $t_0=0\text{ }^\circ\text{C}$ на нижніх поверхнях нижніх (холодних) контактних комутаційних пластин; крайні торцеві поверхні першої і останньої контактної комутаційної пластини вважались нерухомими. Налаштування розрахункових коефіцієнтів моделей термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики подібні до налаштувань попередньо створених відповідних моделей термоелектричних елементів, на базі яких їх було сформовано.

Результати розрахунку термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики представлено на рис. 7-8.

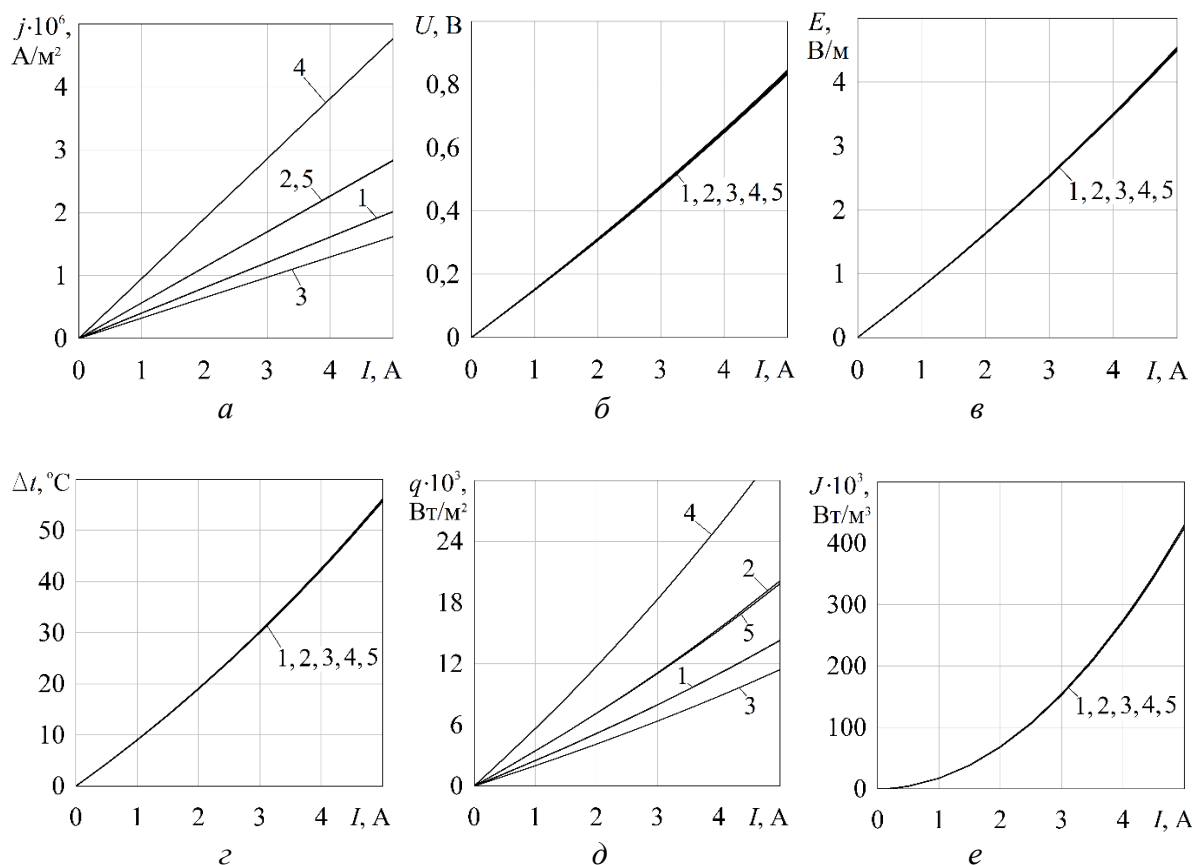


Рисунок 7 – Функціональні залежності $j(I)$, $U(I)$, $E(I)$, $\Delta t(I)$, $q(I)$, $J(I)$ густини струму j (а), напруги U (б), напруженості електричного поля E (в), різниці температур Δt (г), густини теплового потоку q (д) і резистивного нагріву J (е) за моделями термоелектричних модулів від сили робочого струму I : 1 – класична конструкція; 2 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм; 3 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм; 4 – конструкція з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм; 5 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм

Аналіз результатів розрахунку термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами показав, що залежності для напруги U , напруженості електричного поля E , різниці температур Δt між гарячими та холодними контактними комутаційними пластинами, резистивного нагріву J при варіаціях сили струму I від 0 до 5 А практично ідентичні (рис. 7, б, в, г, е). Різними є залежності для густини струму j (рис. 7, а) та густини теплового потоку q (рис. 7, д) за тих же варіаціях сили струму I , вони визначаються впливом конкретної конструкції термоелектричного модуля.

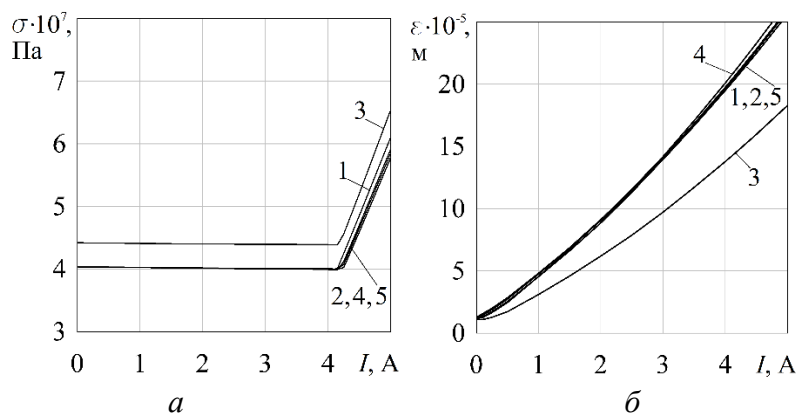


Рисунок 8 – Функціональні залежності $\sigma(I)$, $\epsilon(I)$ еквівалентного стресу σ (а) та деформацій ϵ (б) в напівпровідниках моделей термоелектричних модулів від сили робочого струму I :
 1 – класична конструкція; 2 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм; 3 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 1 мм і довжиною вигину 5 мм; 4 – конструкція з двома малими пластинами-ресорами товщиною 0,5 мм і довжиною вигину 5 мм; 5 – конструкція з пластиною-ресорою товщиною 0,5 мм зі зменшеною довжиною вигину 3 мм

Встановлено, що еквівалентний стрес σ при зміні робочого струму I від 0 до 5 А для конструкцій 1, 2, 4, 5 термоелектричних модулів змінюється однаково (ідентичні криві 1, 2, 4, 5 на рис. 8, а), для конструкції 3 за рахунок збільшення товщини контактних комутаційних пластин з 0,5 мм до 1 мм еквівалентний стрес був збільшеним (крива 3 на рис. 8, а розташована еквідистантно вище за інші криві). Крім того, розрахунки показали, що на графіку рис. 8, а присутня екстремальна точка біля значення сили струму 4,1 А, після якої характер кривих змінюється, а значення еквівалентного стресу σ стрімко зростають. Деформаційні процеси для конструкцій 1, 2, 4, 5 термоелектричних модулів схожі (криві 1, 2, 4, 5 на рис. 8, б), при збільшенні сили струму деформації збільшуються. Для конструкції 3 термоелектричного модуля внаслідок застосування більшої товщини контактної комутаційної пластини значення деформацій менші (крива 3 на рис. 8, б).

Висновок. В роботі на конкретних прикладах проведено змістовне теоретичне дослідження термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. З використанням чисельного методу розрахунку встановлено робочі характеристики цих термоелектричних модулів для густини струму j , напруги U , напруженості електричного поля E , різниці температур Δt між гарячими і холодними контактними комутаційними пластинами, густини теплового потоку q , резистивного нагріву J , еквівалентного стресу σ та деформацій ϵ при зміні робочого струму від 0 до 5 А.

Встановлено, що застосування розглянутих типів компенсаторів у формі пластин-ресор на гарячій стороні в конструкціях термоелектричних модулів надає помітний вплив на термічні напруження при зміні їх товщини. Одночасно для функціональних залежностей еквівалентного стресу σ при зміні сили струму в діапазоні від 0 до 5 А встановлено наявність екстремальної точки біля значення сили струму 4,1 А, після якої характер кривих змінюється, а значення еквівалентного стресу σ стрімко зростають. Застосування компенсованих комутаційних пластин на гарячій стороні термоелектричних модулів не зменшило ефективність термоелектричного ефекту Пельтьє.

ЛІТЕРАТУРА

1. Анатичук Л.И. Термоэлектричество: монография. Термоэлектрические преобразователи энергии: термоэлементы. Элементная база термоэлектричества. Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. Т.2. 376 с.

2. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Институт термоэлектричества. Черновцы: ПРУТ, 1992. 264 с.
3. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник. Киев: Наук. думка, 1979. 768 с.
4. Бурак А.А., Карпова Н.Б. Термоэлектричество: вчера, сегодня, завтра. Кишинев: Штиинца, 1987. 72 с.
5. 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.
6. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
7. 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>
8. 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. Серія: Технічні науки. Київ: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2018. Том 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
9. 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.
10. Кириченко О.С. Модернізований термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для транспортного електрообладнання. // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання – 2021», м. Київ, 8 грудня 2021р. Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. 2022. С. 99-101.
11. Костюшко І.А., Любашенко Н.Д., Третиник В.В. Методи обчислень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 243 с.
12. Леонтьев В.О., Бевз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.
13. Манасян Ю.Г. Судовые термоэлектрические устройства и установки. Л.: Судостроение, 1968. 285 с.
14. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин судових ГРЩ / С.В. Тараненко та ін. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ, 2021. № 3 (34). С. 13-21.
15. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Пріступа С.В., Пастух О.В. Термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для установок і пристроїв судової енергетики. // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання – 2021», м. Київ, 23 грудня 2021р. Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. 2022. С. 88-92.
16. Тараненко С.В., Голубева С.М. Аналіз показників надійності судових електродвигунів, що використовуються у сучасному судовому обладнанні. // Водний транспорт, 2021. № 2(33). С. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01
17. Тараненко С.В., Голубева С.М. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу судових електродвигунів. // Транспортні системи і технології, 2022, №40, С. 149-158. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13>
18. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. London: IntechOpen, 2019. 142 p.

19. 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

20. H. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. 278p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7

REFERENCES

1. Anatichek L.I. Termoelektrichestvo: monografiya. Tom 2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii: termoelementi. Elementnaya baza termoelektrichestva / L.I. Anatichek. – Chernovtsi: Institut termoelektrichestva, 2003. – 376 s.

2. Anatichek L.I. Optimalnoe upravlenie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov / L.I. Anatichek, V.A. Semenyuk; Ukraina, Institut termoelektrichestva. – Chernovtsi: PRUT, 1992. – 264 s.

3. Anatichek L.I. Termoelementi i termoelektricheskie ustroistva: spravochnik / L.I. Anatichek. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 768 s.

4. Buryak A.A. Termoelektrichestvo: vchera, segodnya, zavtra / A.A. Buryak, N.B Karpova. – Kishinev: Shtiintsa, 1987. – 72 s.

5. Vysloukh S.P. Kompiuterne modeliuвання protsesiv ta system. Chyselni metody / S.P. Vysloukh, O.V. Voloshko, H.S. Tymchyk, M.V. Filipova. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politehnika», 2021. – 228 s.

6. Karvatskyi A.Ia. Metod skinchennykh elementiv u zadachakh mekhaniky sutsilnykh seredovykh. Prohramna realizatsiia ta vizualizatsiia rezultativ [Elektronnyi resurs]. – K.: NTUU «KPI», 2015. – 391 s.

7. Kyrychenko O.S. Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznymy heometrychnymy formamy napivprovodnykiv dlia elektroobladnannia transportu / O.S. Kyrychenko // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: TNU im. V.I. Vernadskoho, 2023. – Tom 34 (73). № 1. – S. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>

8. Kyrychenko O.S. Chyselne trymirne modeliuвання termoelektrychnoho okholodzhuvacha vymiriuvalnogo elektroustatkuvannia avtomatychnykh system / O.S. Kyrychenko, I.S. Biliuk, D.Iu. Shareiko, A.M. Fomenko, S.O. Havrylov, L.I. Buhrim // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: TNU im. V.I. Vernadskoho, 2018. – Tom 29 (68). Ch. 1. № 6. – S. 58-63.

9. Kyrychenko O. S. Kryterii formuvannia hotovnosti do profesiinoi diialnosti inzheneriv na osnovi 3D-modeliuвання. / O.S. Kyrychenko // Osvitolohichni dyskurs: naukove elektronne vydannia. – Kyiv. – 2017. – № 3-4 (18-19). – S. 296-308.

10. Kyrychenko O.S. Modernizovanyi termoelektrychnyi element z kompensovanoi komutatsiinoiu plastynoiu dlia transportnogo elektroobladnannia / O.S. Kyrychenko // Materialy III mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Dniprovski chytannia – 2021» (m. Kyiv, 8 hrudnia 2021 roku). – Kyiv: vyd-vo Kyivskoho instytutu vodnogo transportu imeni hetmana Petra Konashevycha-Sahaidachnogo Derzhavnogo universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. – 2022. – S. 99-101.

11. Kostiushko I.A. Metody obchyslen / I.A. Kostiushko, N.D. Liubashenko, V.V. Tretynyk. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politehnika», 2021. – 243 s.

12. Leontiev V.O. Elektrotekhnichni materialy / V.O. Leontieva, S.V. Bevz, V.A. Vydmysh. – Vinnytsia: VNTU, 2013. – 122 s.

13. Manasian Yu.H. Судовые термоэлектрические устройства y ustanovky / Yu.H. Manasian. – L.: Sudostroenye, 1968. – 285 s.

14. Taranenko S.V. Modeliuвання statsionarnoho teplovoho polia strumoprovodnykh shyn sudnovykh HRShch / S.V. Taranenko, O.S. Kyrychenko, V.V. Kolesnyk, V.I. Kostiuchenko, S.V.

Pristupa, O.V. Pastukh, S.M. Golubieva // Vodnyi transport. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. – K.: DUIT, 2021. – Vypusk 3 (34). – S. 13-21.

15. Taranenko S.V. Termoelektrychnyi element z kompensovanoi komutatsiinoiu plastynoiu dlia ustanovok i prystroiv sudnovoi enerhetyky / S.V. Taranenko, O.S. Kyrychenko, V.V. Kolesnyk, S.V. Pristupa, O.V. Pastukh // Materialy II mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Dniprovski chytannia – 2021» (m. Kyiv, 23 hrudnia 2021 roku). – Kyiv: vyd-vo Kyivskoho instytutu vodnoho transportu imeni hetmana Petra Konashevycha-Sahaidachnoho Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. – 2022. – S. 88-92.

16. Taranenko S.V., Golubieva S.M. Analiz pokaznykiv nadiinosti sudnovykh elektrodvyhuniv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladdanni. // Vodnyi transport, 2021. № 2(33). S. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01

17. Taranenko S.V., Golubieva S.M. Vykorystannia «dereva vidmov» yak lohiko-ymovirnisnoho metodu analizu sudnovykh elektrodvyhuniv. // Transportni systemy i tekhnolohii, 2022, №40, S. 149-158. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13>

18. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. – London: IntechOpen, 2019. – 142 p.

19. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshch D., Hnat H. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 464 r. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1

20. H. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. – 278 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7

**Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Pristupa S.V., Golubieva S.M., Pastukh A.V.
THERMOELECTRIC MODULES WITH COMPENSATED CONNECTION PLATES FOR SHIP POWER DEVICES**

The article analyzes thermoelectric modules with compensated connection plates for ship power devices. The study is related to topical issues of elimination or reduction to acceptable limits of thermal stresses in thermoelectric modules. Thermal stresses arise in them due to the existing thermal expansions and contractions of electrical materials, which are the result of simultaneous heating and cooling in semiconductors. On the basis of five created models of thermoelectric elements, by connecting them into «the Π-shaped snake», five models of the corresponding thermoelectric modules were formed. One module had the classic design, and four others had compensated contact connection plates. Each of these thermoelectric modules consisted of 39 semiconductor thermocouples, containing 20 P-type semiconductors and 20 N-type semiconductors. Upper (hot) contact connection plates in the amount of 20 pcs. were compensated connected plates in the form of spring plates, the thermoelectric module with the classic design did not contain compensating elements (compensators). The overall dimensions of the five thermoelectric modules to be analyzed were as follows: one classic design and three designs with compensators 50×59×6 mm, one design with an increased thickness of the compensator 52×62×7 mm. Based on the results of the calculation, the distribution of the main operating parameters over the volume of thermoelectric elements was obtained. The performance characteristics of thermoelectric modules are constructed and analyzed with a change in the operating current from 0 to 5 A for current density, voltage, electric field strength, temperature difference between hot and cold contact switching plates, heat flux density, resistive stress heating and strain magnitude. The advantages of using numerical calculation methods for solving field problems of the ship power industry are shown.

Keywords: thermoelectric modules, thermoelectric elements, compensated connection plates, thermal stresses, devices, ship power engineering, water transport.