

Тараненко С.В., Кириченко О.С., Прістуна С.В., Голубєва С.М.

ДЕМПФУВАННЯ ТЕРМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛЯХ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Дослідження пов'язане з актуальними питаннями зменшення до прийняттого рівня термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. Термічні напруження виникають в них через теплові деформації в термоелектричних матеріалах внаслідок їх одночасного розширення та стискання при термоелектричному ефекті. На основі трьох створених моделей термоелектричних елементів шляхом їх з'єднання в термоелектричний ланцюг у формі П-подібної змійки сформовано три моделі відповідних термоелектричних модулів. Один модуль мав класичну конструкцію без демпфування, а два інших мали в своєму складі одношарові демпферні вставки з пластичного матеріалу. Кожен з цих термоелектричних модулів складався з термоелектричного ланцюга з 39 напівпровідникових Р-Н-термопар, містив 20 напівпровідників Р-типу і 20 напівпровідників N-типу, 41 контактну комутаційну пластину. Габаритні розміри (без врахування товщини ізоляційного корпусу) у спроєктованих термоелектричних модулях класичної конструкції без демпфування та конструкцій з великими та малими демпферами були відповідно $30 \times 25,5 \times 7$ мм та $30 \times 25,5 \times 8$ мм. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими для дослідження цих пристроїв в більш напружених режимах роботи та для оцінки впливу на них максимальних термічних напружень. За результатами розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів по об'єму термоелектричних модулів. Побудовано та проаналізовано робочі характеристики термоелектричних модулів суднового електрообладнання при варіаціях робочого струму від 0 до 3 А для густини струму j , напруги U , напруженості електричного поля E , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ і деформацій ϵ . На основі отриманих результатів обрано найкращу конструкцію термоелектричного модуля, в якому демпферні вставки ефективно зменшують рівень термічних напружень. Показано переваги застосування сучасних чисельних методів розрахунку для вирішенні польових задач при проєктуванні суднового електрообладнання.

Ключові слова: *термоелектричні модулі, проєктування, чисельні методи, термоелектричний ефект, термічні напруження, одношарове демпфування, суднове електрообладнання.*

Постановка проблеми. Джерелом механічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання є температурні деформації. Вони пов'язані з одночасним тепловим розширенням і стисканням через нагрів та охолодження в термоелектричних матеріалах внаслідок термоелектричного ефекту. В науковій та науково-методичній літературі для подібних механічних напружень досить часто використовується термін термічні напруження. Термічні напруження здатні завдати значної шкоди судновому електрообладнанню, інколи можуть призвести до небажаних поломок в термоелектричних вузлах суднового електрообладнання.

Способів повного усунення термічних напружень в класичних конструкціях термоелектричних модулів практично не існує, проте запропоновано ряд оригінальних конструктивних рішень для їх зменшення до прийняттого рівня. Одним з найбільш ефективних

конструктивних рішень, яке значно зменшує термічні напруження, є застосування одношарового демпфування або так званих демпферних вставок з пластичного матеріалу. В якості пластичного матеріалу цих вставок досить часто використовують свинець, вісмут або їх сплави.

Враховуючи вищезазначене актуальними залишаються питання дослідження одношарових демпферних вставок з пластичних матеріалів в термоелектричних модулях. Вони зменшують термічні напруження до прийняттого рівня для нормальної і безпечної роботи термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час проводиться багато вагомих досліджень щодо зниження негативного впливу термічних напружень в термоелектричних матеріалах при термоелектричних ефектах в транспортному електрообладнанні. В публікаціях за даним напрямком показано різні оригінальні та дієві способи зменшення термічних напружень до прийняттого рівня для нормальної і безпечної роботи термоелектричних модулів. Також, корисними при проектуванні термоелектричних пристроїв можуть виявитись деякі роботи по судновому електрообладнанню.

В [1] в пізнавальній формі детально викладено сутність основних термоелектричних ефектів Зеєбека, Пельтьє, Томсона, роль першовідкривача термоелектрики Алессандро Вольта. З поміж іншого висвітлено про розробку академіком А.Ф. Іоффе сучасної теорії термоелектрики з використанням поняття «добротність». Також, відзначається об'єднана термоелектрична теорія, яка запропонована академіком Л.І. Анатичуком з використанням сформульованого ним закону термоелектричної індукції. Крім того, стисло описано про новітні досягнення вчених-термоелектриків.

Загальні основи теорії термоелектричних ефектів з відповідним математичним описом, а також оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів висвітлено в [2, 3, 4, 5].

Окремі розділи [6] можуть виявитись корисними при проектуванні термоелектричних модулів з прийнятним рівнем термічних напружень. Роботи [7, 8] можуть бути використані для аналізу показників надійності суднового електрообладнання, а робота [9] при дослідженні стаціонарних теплових полів суднового електрообладнання.

Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту проведено в [10], а в [11] виконано чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. Критеріальні особливості формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання висвітлено в [12].

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

В [14] показано термоелектричний модуль з особливим способом контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів, в якому вплив термічних напружень значно знижується.

Мета дослідження полягає в аналізі одношарового демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Розглянемо процедуру проектування термоелектричних модулів суднового електрообладнання (рис. 1). Після отримання технічного завдання відбувається синтез технічних об'єктів, він включає в себе вибір структури об'єкту – структурний аналіз, створення моделі і вибір його параметрів (параметричний синтез) [15]. Якщо серед варіантів структури термоелектричних модулів суднового електрообладнання шуканим є не прийнятний варіант, а найкращий, то задачу синтезу називають структурною оптимізацією. Вибір параметрів структури, оптимальних з

позиції деякого критерія при заданій структурі об'єкту, називають параметричною оптимізацією.

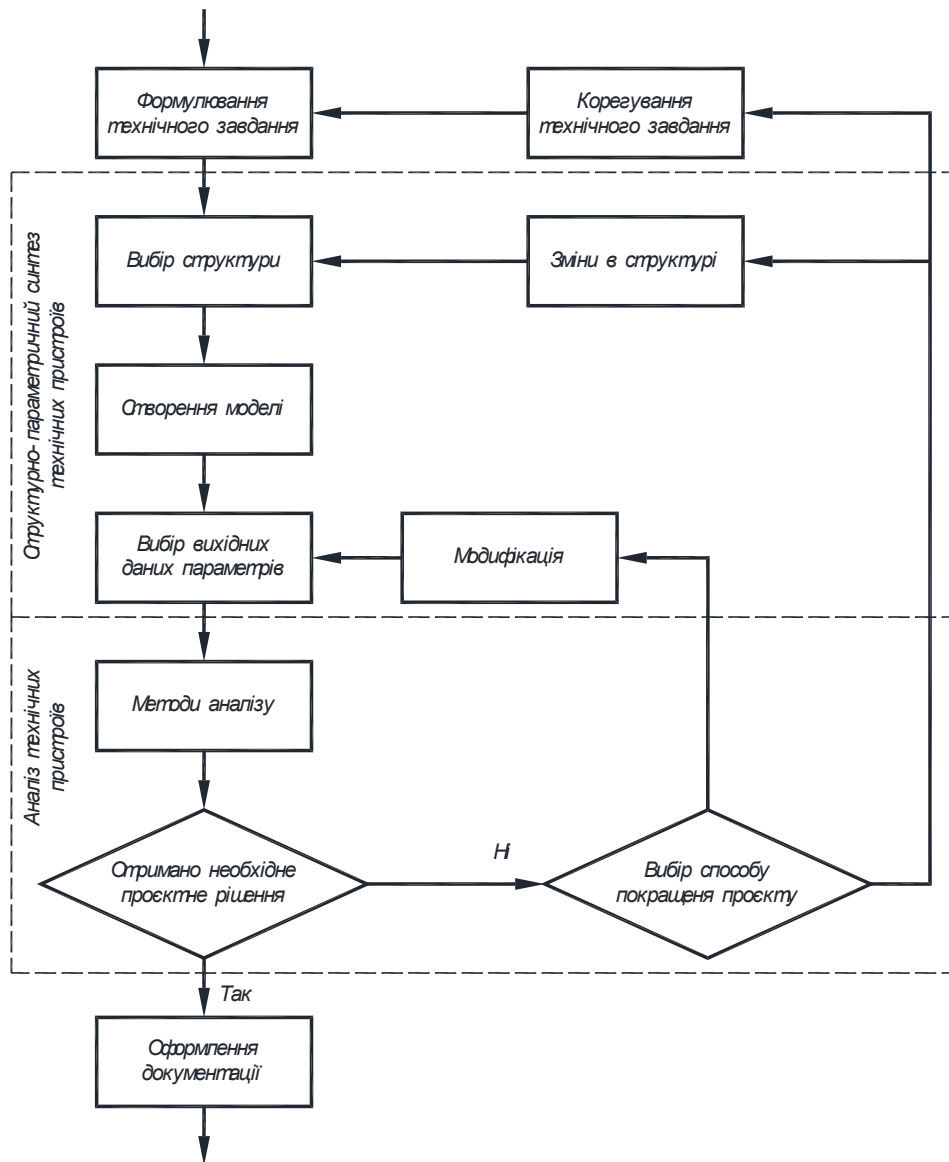


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму процедури проектування термоелектричних модулів суднового електрообладнання

Наступний етап проектування – аналіз технічних об'єктів. На цьому етапі відбувається дослідження властивостей обраної структури об'єкту проектування (його моделі) при різних внутрішніх параметрах. Результати аналізу визначають завершальний етап проектування – виготовлення технічної документації.

Фізичні процеси в термоелектричних модулях суднового електрообладнання доводиться описувати складними диференціальними рівняннями або навіть системою таких рівнянь. Зазвичай диференціальні рівняння для опису фізичних процесів включають в себе залежності не тільки від часу, а й від трьох координат у просторі, а найчастіше і від інших змінних.

Щоб отримати розв'язання таких складних завдань, застосовуються такі основні підходи:

– максимальне спрощення вихідної моделі фізичного процесу – наприклад, можна виключити залежність від часу, якщо для завдання допустимо прийняти, що вона є статичною (стаціонарною);

– поділ моделі на більш дрібні та прості моделі;

– застосування наближених чисельних алгоритмів, щоб максимально точно апроксимувати справжнє рішення.

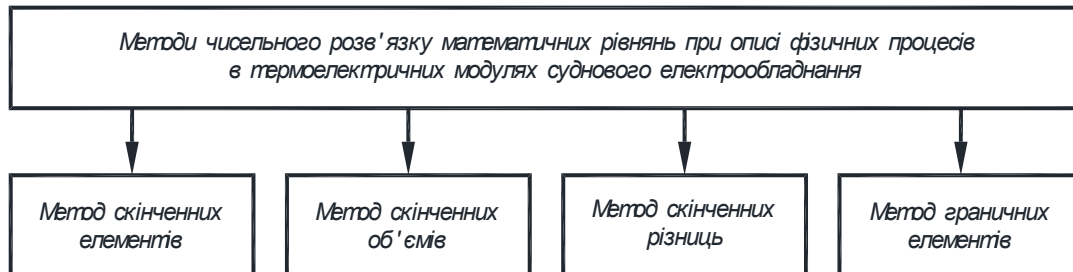


Рисунок 2 – Сучасні чисельні методи для автоматизованої роботи з математичними моделями термоелектричних модулів суднового електрообладнання

Науковці та інженери користуються багатьма чисельними методами вирішення математичних рівнянь для опису фізичних процесів [16-18], найбільш відомі з них (рис. 2): метод скінченних елементів; метод скінченних (контрольних) об'ємів; метод скінченних різниць; метод граничних елементів. Метод скінченних елементів і метод скінченних різниць стали найбільш популярними у використанні, кожен з них має свої переваги та недоліки.

Метод скінченних різниць, як і метод скінченних елементів, теж використовує дискретизацію, але вона відбувається іншим чином, з чого випливають відмінності у підходах до складання та вирішення рівнянь. Замість кінцевих елементів рішення знаходиться лише в окремих точках розрахункової області. І той, і інший метод здатні забезпечити отримання результату з достатньою з практичної точки зору точністю, тому сфера їх застосування обумовлена швидше особливостями та зручністю реалізації для конкретного класу задач. Метод скінченних різниць – це більш старий метод, ніж метод скінченних елементів, він вимагає меншої обчислювальної потужності, проте не застосовується для багатьох задач через похибки дискретизації. Метод скінченних елементів дозволяє отримати точніші результати (особливо на елементах другого порядку), але вимагає більшої обчислювальної потужності, також він більш вимогливий до якості розрахункової сітки.

Різноманіття рівнянь в часткових похідних, що описують фізичні явища, включає велику кількість окремих випадків, що не дозволяє надати їх короткий та в той же час вичерпний опис. Проте можна об'єднати більшу частину рівнянь, які широко використовуються, в три великі класи, кожен з яких описує достатньо окремий тип явища:

– рівняння еліптичного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \quad (1)$$

– рівняння параболічного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

– рівняння гіперболічного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Наведені основні рівняння (1)-(3) математичної фізики використовуються при вирішенні задач різних типів. Рівняння еліптичного типу (1) широко застосовуються в задачах електротехніки, механіки та теплотехніки. Зазвичай разом з цими рівняннями використовуються граничні умови одного з наступних типів:

– граничні умови Діріхле

$$F(s) = F_0 = f_0(s); \quad (4)$$

– граничні умови Неймана

$$\frac{\partial F}{\partial n}(s) = f_0(s); \quad (5)$$

– змішані граничні умови

$$F(s) + \frac{\partial F}{\partial n}(s) = f_0(s). \quad (6)$$

Рівняння параболічного типу застосовуються в задачах дифузії і задачах електротехніки при проникненні струмів, що наводяться, в провідне тіло. Існують наступні типи граничних умов, що зустрічаються сумісно з рівняннями параболічного типу:

- граничні умови Діріхле, Неймана або змішані на границі області;
- початкові умови ($t=0$) на всій області.

Рівняння гіперболічного типу характеризують явища розповсюдження хвиль, наприклад, хвилі вібрації механічного типу або електромагнітні хвилі. Граничні умови, що пов'язані з розповсюдженням, – це умови Коші в початковий момент (задані функція та її часова похідна $\partial u / \partial t$).

Розглянемо приклад одношарового демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання, під час роботи над яким використано наведену вище блок-схему алгоритму процедури проектування. Спочатку було створено моделі термоелектричних елементів (рис. 3): класичної конструкції без демпфування (рис. 3, а), конструкції з великими демпферами (рис. 3, б) та конструкції з малими демпферами (рис. 3, в). В якості матеріалу демпферів, що представляли собою прямокутні пластини товщиною 0,5 мм, обрано електротехнічний матеріал з доброю пластичністю – свинець [19, 20]. Кожен термоелектричний елемент містив P - N -пару напівпровідників в формі паралелепіпедів $3 \times 3 \times 6$ мм. Мідні контактні комутаційні пластини геометрично представляли собою паралелепіпеди $7,5 \times 3 \times 0,5$ мм. Великі та малі свинцеві демпфери представляли собою паралелепіпеди з розмірами відповідно $7,5 \times 3 \times 0,5$ мм та $3 \times 3 \times 0,5$ мм.

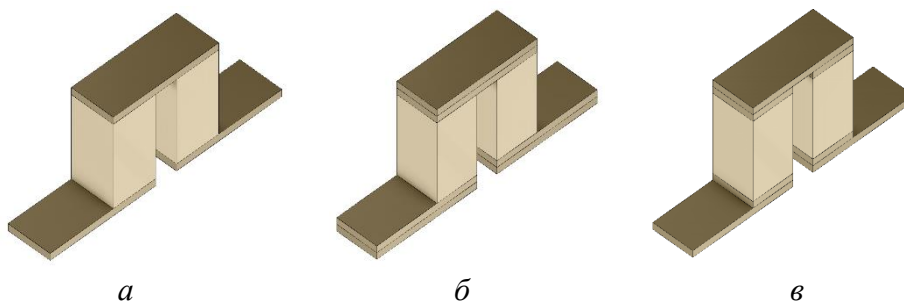


Рисунок 3 – Геометричні моделі термоелектричних елементів: класична конструкція (а); конструкція з великими демпферами (б); конструкція з малими демпферами (в)

Формування геометричних моделей термоелектричних модулів суднового електрообладнання (рис. 4, *а-в*) здійснено шляхом послідовного з'єднання відповідних моделей термоелектричних елементів (рис. 3) в ланцюг П-подібної змійки. Даний термоелектричний ланцюг містив 39 напівпровідникових термоелектричних пар з 20 напівпровідниками *P*-типу і 20 напівпровідниками *N*-типу, а також 41 мідну контактну комутаційну пластину. Термоелектричні модулі з великими та малими демпферами (рис. 4, *б, в*) додатково містили відповідно 41 та 81 демпферні вставки. Габаритні розміри (без врахування товщини ізоляційного корпусу) у спроектованих термоелектричних модулях класичної конструкції без демпфування та конструкцій з великими та малими демпферами були відповідно $30 \times 25,5 \times 7$ мм та $30 \times 25,5 \times 8$ мм.

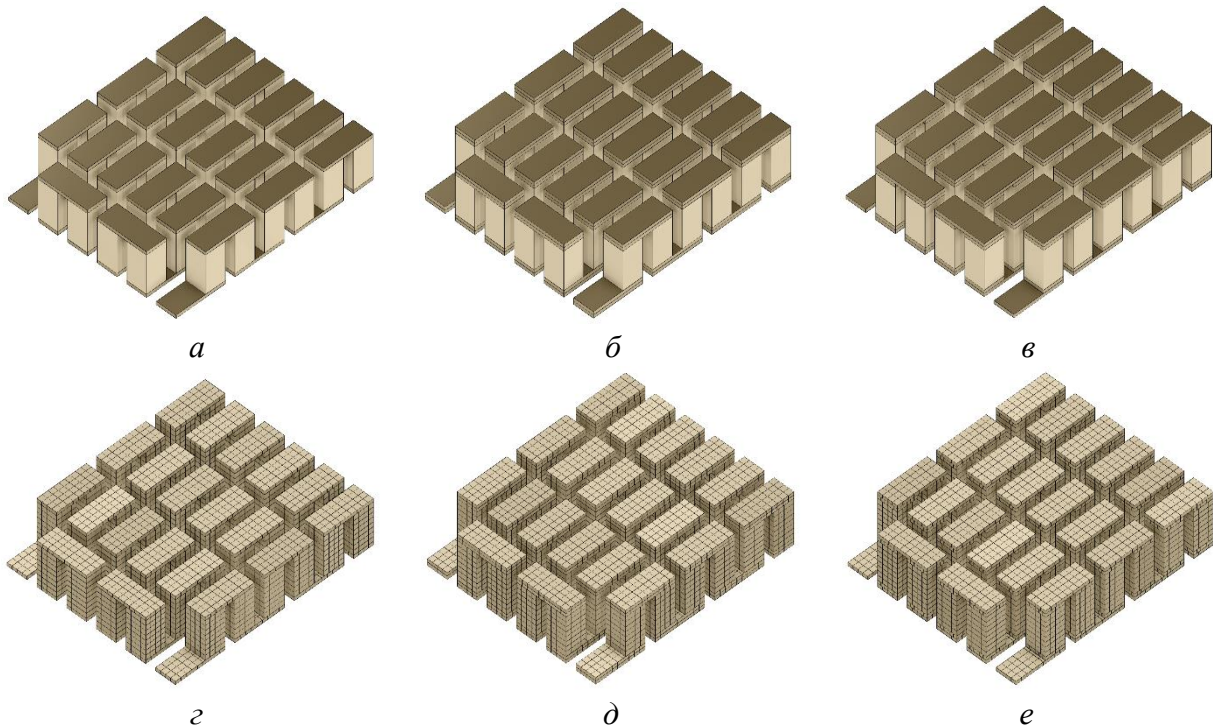


Рисунок 4 – Геометричні (*а-в*) та кінцево-елементні (*z-e*) моделі термоелектричних модулів: класична конструкція (*а, z*); конструкція з великими демпферами (*б, d*); конструкція з малими демпферами (*в, e*)

На основі сформованих геометричних моделей термоелектричних модулів суднового електрообладнання можна створити розрахункові моделі (рис. 4, *z-e*), які зручно розрахувати чисельним методом. Граничні умови при розрахунку термоелектричних модулів суднового електрообладнання можуть бути наступними: нульовий електричний потенціал $\phi_0=0$ В на крайній торцевій поверхні останньої в термоелектричному ланцюзі контактної комутаційної пластини; нульова температура $t_0=0$ °С на нижніх поверхнях нижніх (холодних) контактних комутаційних пластин; крайні торцеві поверхні першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі вважались нерухомими. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими для дослідження цих пристроїв в більш напружених режимах роботи та для оцінки впливу на них максимальних термічних напружень. 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 у всіх моделях термоелектричних модулів приймались однаковими.

Результати розподілу основних робочих параметрів по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям суднового електрообладнання представлено

на рис. 5-7. Максимальним значенням в діапазонах розподілу робочих параметрів відповідає чорний колір (темні області моделей), середнім і мінімальним значенням робочих параметрів – відповідно сірий та білий кольори (сірі та світлі області моделей).

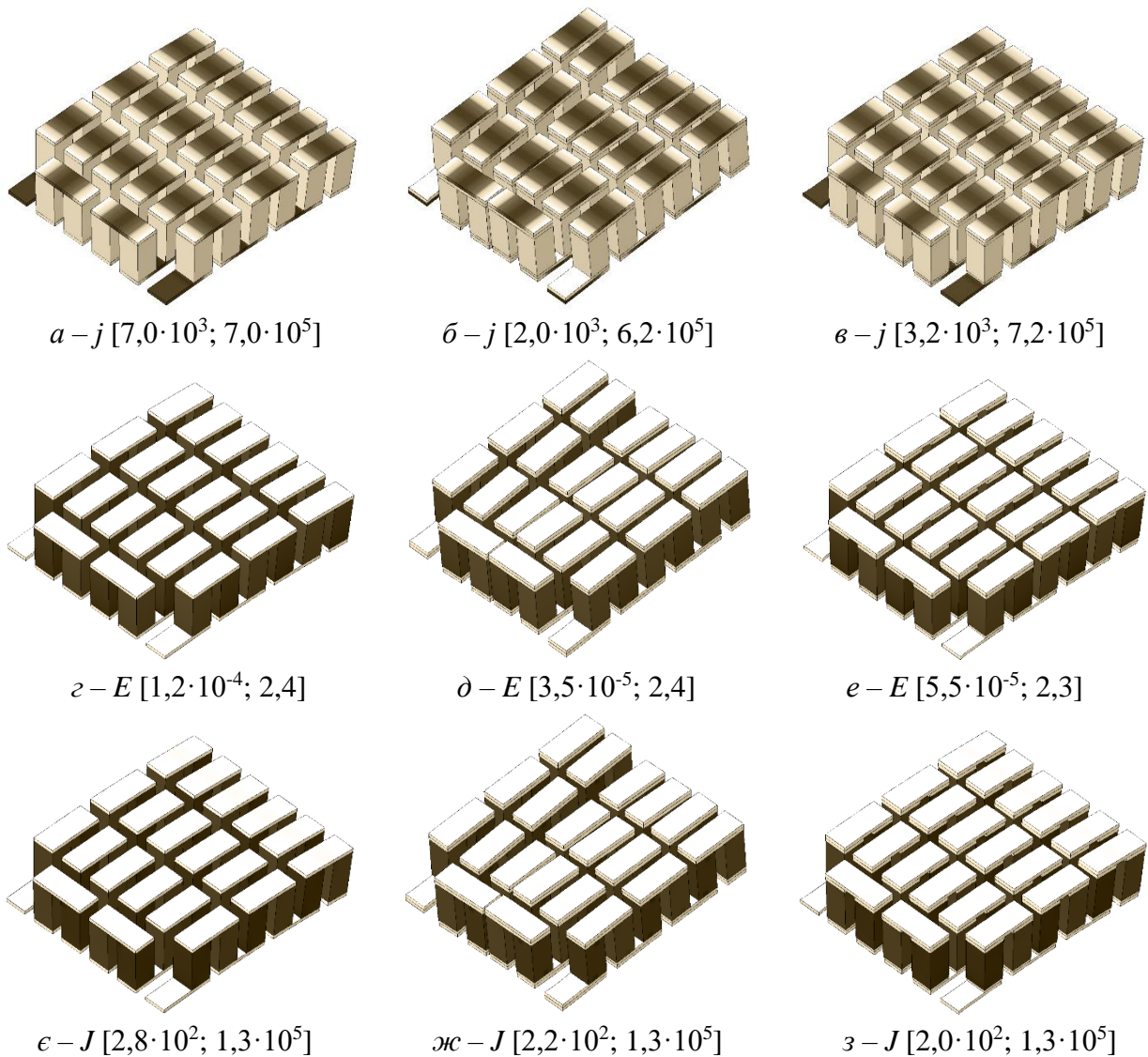
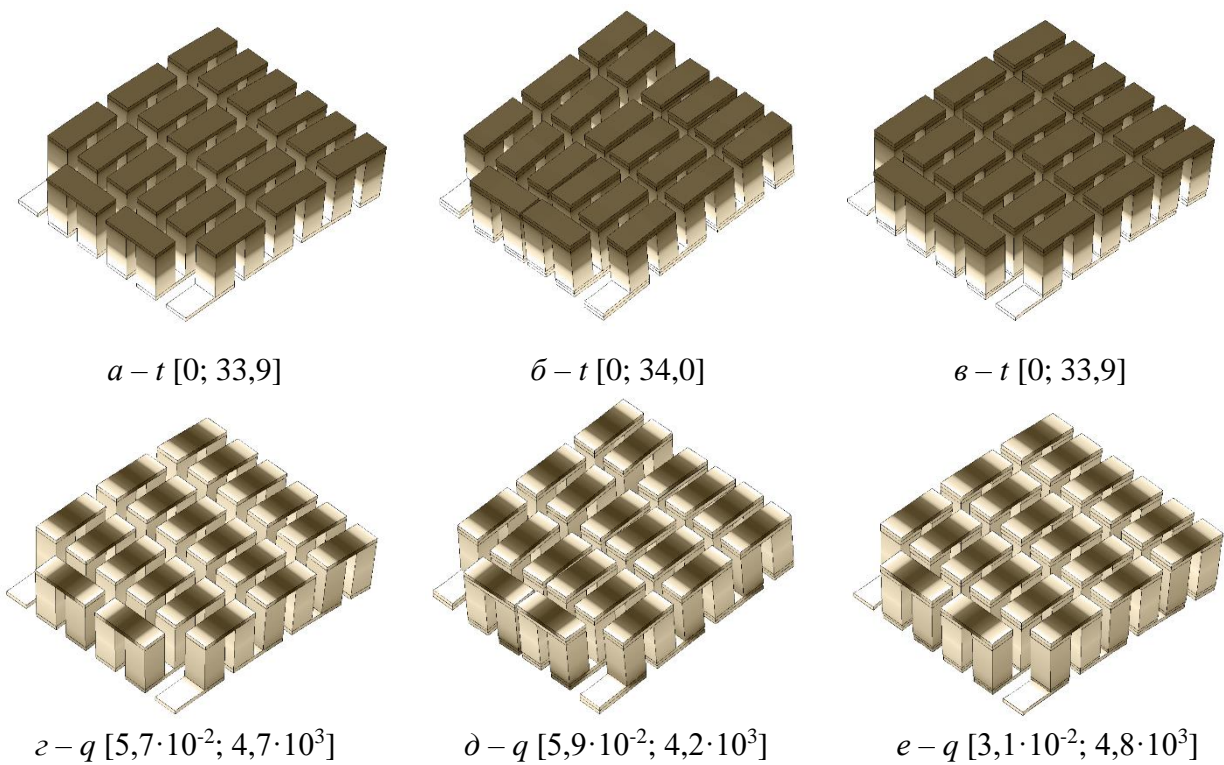


Рисунок 5 – Розподіл густини струму j [A/m^2] (*a*-*в*), напруженості електричного поля E [V/m] (*г*-*е*) та омичного нагріву J [$Вт/м^3$] (*є*-*з*) по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям при робочому струмі $I=1$ А: класична конструкція (*a*, *г*, *є*); конструкція з великими демпферами (*б*, *д*, *ж*); конструкція з малими демпферами (*в*, *е*, *з*)

Цілком очікувано, що максимальні значення густини струму j зосереджені в мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 5, *a*-*в*) через їх кращу електропровідність. Максимуми напруженості електричного поля E (рис. 5, *г*-*е*) та омичного нагріву J (рис. 5, *є*-*з*) розташовані в напівпровідникових матеріалах термоелектричних модулів. Використання демпфування не призвело до небажаного збільшення омичного тепла в загальному тепловому балансі термоелектричних модулів з великими та малими демпферами.

Температурні максимуми t зафіксовано на верхніх (гарячих) мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 6, *a*-*в*). При цьому для всіх розглядуваних термоелектричних модулів максимальна температура t при робочому струмі 1 А була практично однаковою та

становила приблизно 34 °С. Найбільші значення теплового потоку q зосереджені, також, в мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 6, $z-e$).



$a - t [0; 33,9]$

$b - t [0; 34,0]$

$v - t [0; 33,9]$

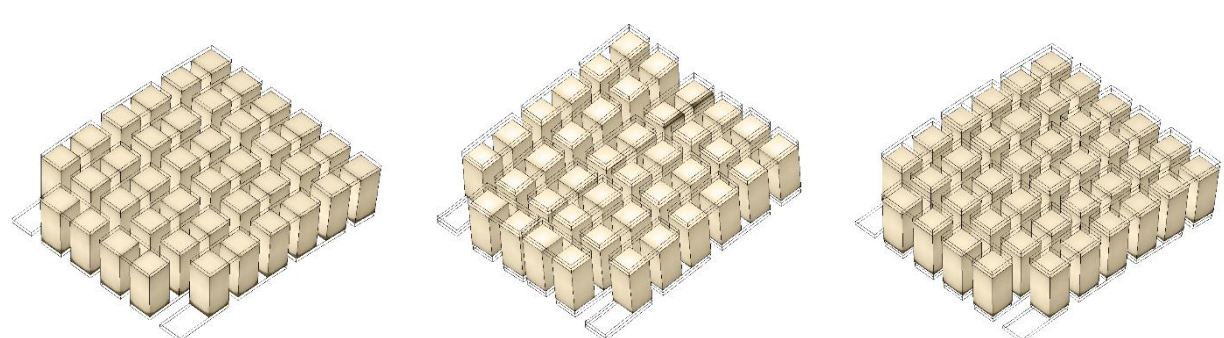
$z - q [5,7 \cdot 10^{-2}; 4,7 \cdot 10^3]$

$d - q [5,9 \cdot 10^{-2}; 4,2 \cdot 10^3]$

$e - q [3,1 \cdot 10^{-2}; 4,8 \cdot 10^3]$

Рисунок 6 – Розподіл температури t [°C] ($a-v$) та густини теплового потоку q [Вт/м²] ($z-e$) по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям при робочому струмі 1 А: класична конструкція (a, z); конструкція з великими демпферами (b, d); конструкція з малими демпферами (v, e)

Окрім розподілу електричних і теплових параметрів в термоелектричних модулях суднового електрообладнання розглянуто механічні параметри – еквівалентний стрес σ та деформації ε , які використано для оцінки рівня впливу термічних напружень. Пікові значення еквівалентного стресу σ (рис. 7, $a-v$) переважно спостерігались в нижніх частинах напівпровідників, де відбувалось їх стискання внаслідок охолодження. Рівень еквівалентного стресу σ в термоелектричних модулях з демпфуванням у визначених діапазонах струмів був меншим ніж в модулі без демпфування. Зони найбільших деформацій ε в термоелектричних модулях показано на рис. 7, $z-e$. Максимальні деформації ε в термоелектричних модулях з демпфуванням у визначених діапазонах струмів були меншими ніж в класичному термоелектричному модулі без демпфування.



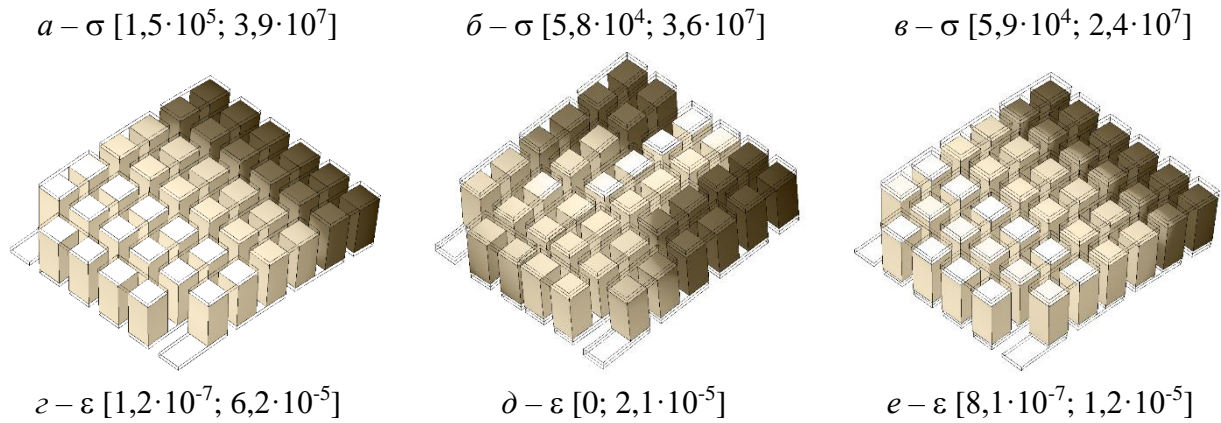


Рисунок 7 – Розподіл еквівалентного стресу σ [Па] ($a-v$) та деформацій ϵ [м] ($z-e$) в напівпровідниках термоелектричних модулів при робочому струмі 1 А: класична конструкція (a, z); конструкція з великими демпферами (b, d); конструкція з малими демпферами (v, e)

Таким чином, було продемонстровано зони максимального та мінімального розподілу основних робочих параметрів при робочому струмі 1 А для електричної, теплової і механічної частини розрахунку термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Для спроектованих термоелектричних модулів побудовано функціональні залежності $U(I)$, $E(I)$, $j(I)$, $t(I)$, $q(I)$, $J(I)$, $\sigma(I)$, $\epsilon(I)$ для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ , деформацій ϵ від сили робочого струму I в діапазоні від 0 до 3 А (рис. 8-9). Криві 1-3 для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q і омичного нагріву J на рис. 8 вказують на перебіг електричних і теплових процесів в термоелектричних модулях, в той час як криві 1-3 для еквівалентного стресу σ , деформацій ϵ на рис. 9 визначають рівень впливу термічних напружень в модулях.

Аналіз кривих 1-3 на рис. 9, a для функціональних залежностей еквівалентного стресу σ вказує на те, що перебіг механічних процесів в різних термоелектричних модулях відбувається по різному. Спільним для всіх термоелектричних модулів є наявність критичної точки при певному значенні робочого струму, після якої рівень термічних напружень починає стрімко зростати. Так, в термоелектричному модулі з класичною конструкцією без демпфування термічні напруження були приблизно на однаковому рівні до критичної точки при струмі 1,25 А. В термоелектричному модулі з великими демпферами початковий рівень термічних напружень був найбільшим і далі спадав в діапазоні від 0 до 0,5 А, після 0,5 і до 0,9 А термічні напруження залишались практично незмінними, після критичної точки 0,9 А термічні напруження стрімко зростали. Отже, термоелектричний модуль з великими демпферами мав нижчі термічні напруження ніж модуль класичної конструкції без демпфування термічних напружень лише у вузькому діапазоні струмів від 0,4 і до 1 А.

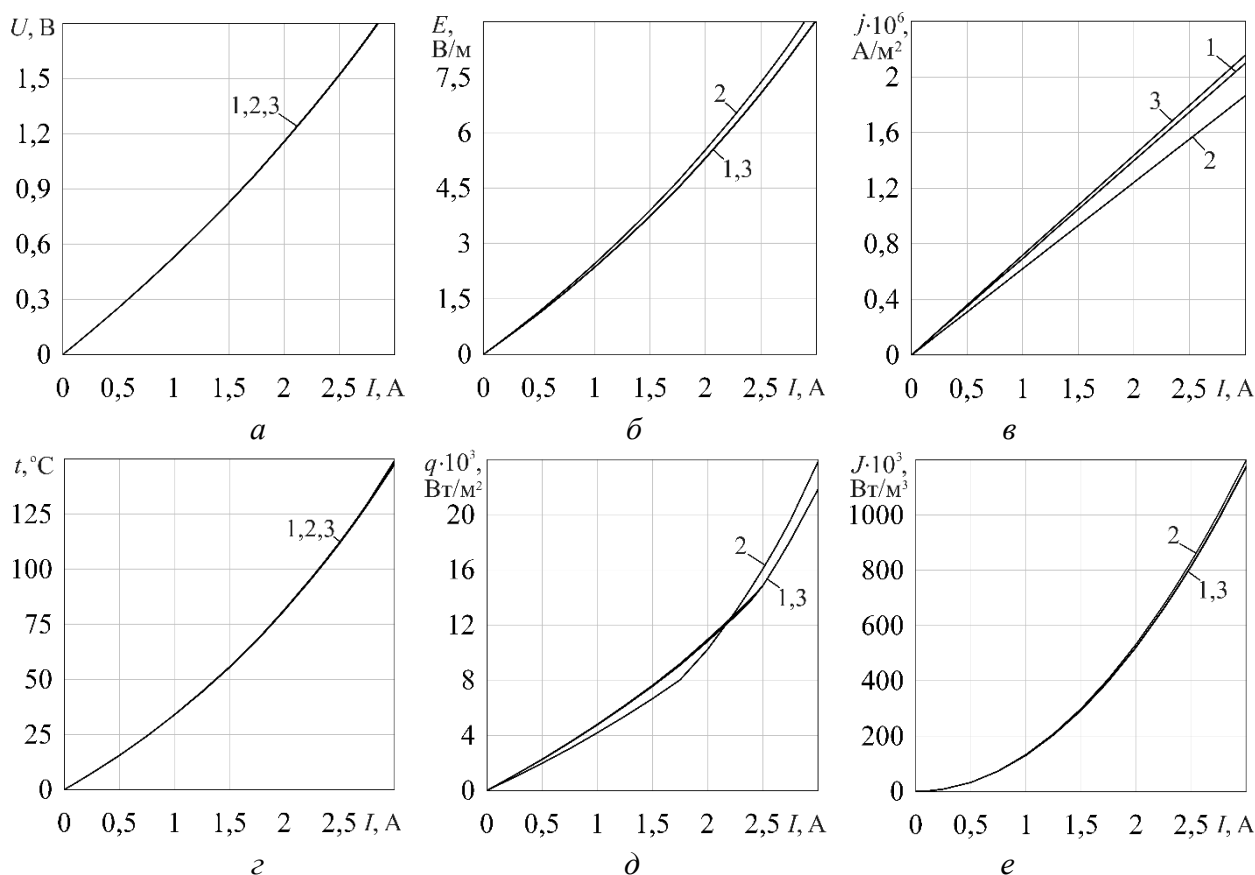


Рисунок 8 – Функціональні залежності $U(I)$, $E(I)$, $j(I)$, $t(I)$, $q(I)$, $J(I)$ напруги U (а), напруженості електричного поля E (б), густини струму j (в), температури на гарячій стороні t (г), густини теплового потоку q (д) і омичного нагріву J (е) в термоелектричних модулях від сили робочого струму I : 1 – крива для класичної конструкції; 2 – крива для конструкції з великими демпферами; 3 – крива для конструкції з малими демпферами

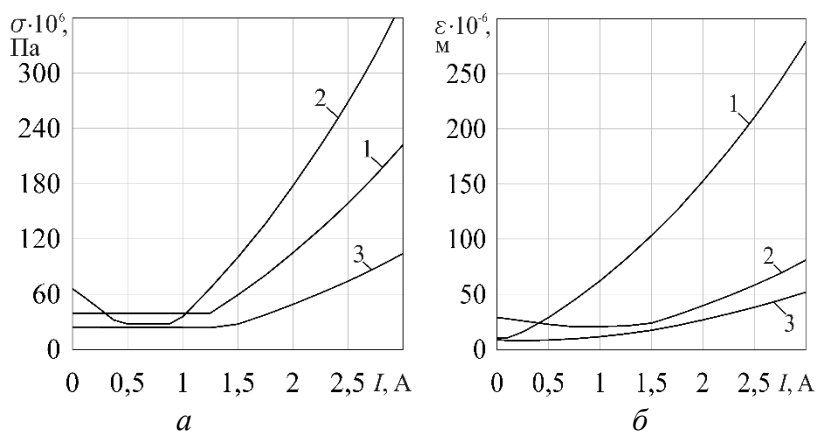


Рисунок 9 – Функціональні залежності $\sigma(I)$, $\epsilon(I)$ еквівалентного стресу σ (а) та деформацій ϵ (б) в напівпровідниках термоелектричних модулів від сили робочого струму I : 1 – крива для класичної конструкції; 2 – крива для конструкції з великими демпферами; 3 – крива для конструкції з малими демпферами

Еквівалентний стрес σ та деформації ϵ в термоелектричному модулі з малими демпферами (крива 3 на рис. 9, а, б) були найменшими при всіх варіаціях струму в діапазоні від 0 до 3 А, що визначає цю конструкцію з демпфуванням (рис. 4, в) як найбільш ефективну.

Висновок. В статті проаналізовано одношарове демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях, кожен з яких містив 39 напівпровідникових *P-N*-термопар. З використанням конкретного прикладу показано вплив термічних напружень на одну модель термоелектричного модуля з класичною конструкцією без демпфування з габаритами $30 \times 25,5 \times 7$ мм та на дві різні моделі термоелектричних модулів з демпфуванням з габаритами $30 \times 25,5 \times 8$ мм. Моделі всіх зазначених модулів було сформовано на основі попередньо створених моделей відповідних термоелектричних елементів. Отриманий розподіл робочих параметрів та побудовані робочі характеристики термоелектричних модулів суднового електрообладнання для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячих комутаційних пластинах t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ та деформацій ε при зміні робочого струму від 0 до 3 А дозволили встановити, що застосування одношарових свинцевих малих демпферних вставок суттєво зменшує рівень термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання, а ефективність термоелектричного ефекту при цьому не зменшується. Отримані результати можуть виявитись корисними для науковців і фахівців при проектуванні та експлуатації суднового електрообладнання з термоелектричними вузлами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фреїк Д.М., Никурий Л.І., Криницький О.С. Досягнення і проблеми термоелектрики. // Фізика і хімія твердого тіла. Т. 13. № 2. 2012. С. 297-318.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество: монография. Термоэлектрические преобразователи энергии: термоэлементы. Элементная база термоэлектричества. Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. Т.2. 376 с.
3. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Черновцы: ПРУТ, 1992. 264 с.
4. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник. Киев: Наук. думка, 1979. 768 с.
5. Н. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / Н. Julian Goldsmid. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. 278 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7
6. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshch D., Hnat H. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Тараненко С.В., Голубева С.М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. // Водний транспорт, 2021. № 2(33). С. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01
8. Тараненко С.В., Голубева С.М. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. // Транспортні системи і технології, 2022. №40. С. 149-158. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13
9. 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.
10. 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
11. 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.

12. 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.

13. 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>

14. 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>

15. 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>

16. 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.

17. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.

18. Костюшко І.А., Любашенко Н.Д., Третиник В.В. Методи обчислень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 243 с.

19. Леонт'єв В.О., Бєвз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.

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

REFERENCES

1. Freik, D.M., Nykuryi, L.I., & Krynytskyi, O.S. (2012). Dosiahnennia i problemy termoelektryky [Achievements and problems of thermoelectricity]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and chemistry of solids*. (Vols. 13), (pp. 297-318). [in Ukrainian].

2. Anatychuk, L.I. (2003). Termoelektrichestvo. Termoelektricheskie preobrazovateli energii: termoelementi. Elementnaya baza termoelektrichestva. [Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters: thermoelements. Elemental base of thermoelectricity.]. Chernovtsi: Institut termoelektrichestva [in Russian].

3. Anatychuk, 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 Russian].

4. Anatychuk, L.I. (1979). Termoelementi i termoelektricheskie ustroistva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Nauk. dumka [in Russian].

5. Julian Goldsmid, H. (2016). Introduction to Thermoelectricity. Second Edition. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010*. DOI: 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. Taranenko, S.V., & Golubieva, S.M. (2021). Analiz pokaznikov nadiinosti sudnovikh yelektrodviguniv, shcho vikoristovuyutsya u suchasnomu sudnovomu obladnanni [Analysis of indicators of the reliability of ship electric motors that are currently used by ships]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 2(33)), (pp. 5-12). doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01 [in Ukrainian].
8. Taranenko, S.V., & Golubieva, S.M. (2022). Vikoristannya «dereva vidmov» yak logiko-imovirnisnogo metodu analizu sudnovikh yelektrodviguniv [The development of the “tree of views” as a logical and conceptual method for analyzing ship electric motors]. *Transportni sistemi i tekhnologii – Transport systems and technologies*. (Vols. 40), (pp. 149-158). <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13> [in Ukrainian].
9. Taranenko, S.V., Kirichenko, O.S., Kolesnik, V.V., Kostyuchenko, V.I., Pristupa, S.V., Pastukh, O.V., & Golubieva S.M. (2021). Modelyuvannya statsionarnogo teplovogo polya strumoprovidnikh shin sudnovikh 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].
10. Kirichenko, O.S. (2023). Porivnyalnii analiz kharakteristik termoelektrichnikh moduliv z riznimi geometrichnimi formami napivprovidnikov dlya yelektroobladnannya 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].
11. Kirichenko, 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 avtomatichnikh 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].
12. Kirichenko, 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].
13. Taranenko, S.V., Kirichenko, O.S., Pristupa, S.V., Golubieva, S.M., & Pastukh, O.V. (2023). Termoelektrichni moduli z kompensovanimi komutatsiinimi plastinami dlya pristroiv sudnovoi 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].
14. Kirichenko, O.S. (2023). Termoelektrichni moduli z riznimi sposobami kontaktnogo z'ednannya napivprovidnikovikh termoelementiv [Thermoelectric modules with various methods of contact connection of conductor thermoelements]. *Visnik Skhidnoukraïnskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira 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].
15. 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].
16. 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, Politekhnikha [in Ukrainian].

18. Kostyushko, I.A., Lyubashenko, N.D., & Tretinik, V.V. (2021). Metodi obchislen [Calculation methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, Politehnika [in Ukrainian].
19. Leontiev, V.O., Bevz, S.V., & Vidmish, V.A. (2013). Yelektrotekhnichni materiali [Electrical materials]. Vinnitsa: VNTU [in Ukrainian].
20. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. (2019). London: IntechOpen.

S.V. Taranenko, O.S. Kyrychenko, S.V. Pristupa, S.M. Golubieva DAMPING OF THERMAL STRESSES IN THERMOELECTRIC MODULES OF SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT

The research is related to the urgent issues of reducing to an acceptable level thermal stresses in the thermoelectric modules of the ship's electrical equipment. Thermal stresses arise in them due to thermal deformations in thermoelectric materials as a result of their simultaneous expansion and contraction during the thermoelectric effect. Based on the three created models of thermoelectric elements by connecting them into a thermoelectric circuit in the form of a U-shaped snake, three models of the corresponding thermoelectric modules were formed. One module had a classic design without damping, and the other two had single-layer damping inserts made of ductile material. Each of these thermoelectric modules consisted of a thermoelectric chain of 39 semiconductor P-N-thermocouples, contained 20 P-type semiconductors and 20 N-type semiconductors, 41 contact commutation plates. The overall dimensions (excluding the thickness of the insulating case) of the designed thermoelectric modules of the classic design without damping and designs with large and small dampers were $30 \times 25.5 \times 7$ mm and $30 \times 25.5 \times 8$ mm, respectively. The outer surfaces of the thermoelectric modules were considered adiabatically heat-insulated for the study of these devices in more stressful modes of operation and for evaluating the influence of maximum thermal stresses on them. According to the results of the calculation, the distribution of the main operating parameters by volume of thermoelectric modules was obtained. The operating characteristics of the thermoelectric modules of the ship's electrical equipment at variations of the operating current from 0 to 3 A for current density j , voltage U , electric field strength E , temperature on the hot side t , heat flux density q , ohmic heating J , equivalent stress σ and deformations ϵ . Based on the obtained results, the best design of the thermoelectric module was chosen, in which the damper inserts effectively reduce the level of thermal stresses. The advantages of using modern numerical calculation methods for solving field problems in the design of ship electrical equipment are shown.

Keywords: *thermoelectric modules, design, numerical methods, thermoelectric effect, thermal stresses, one-layer damping, ship electrical equipment.*