

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.17>  
УДК 004.49

## Модель виконавчого органу термоелектричної системи забезпечення теплових режимів

Мещеряков Володимир Іванович<sup>1)</sup>

Д-р техніч. наук, проф каф. Інформаційних технологій

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0499-827X>; meshcheryakovvi48@gmail.com

Журавльов Юрій Іванович<sup>2)</sup>

Канд. техніч. наук, доцент каф. Технології матеріалів та судоремонту

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-1031>; ivanovich1zh@gmail.com

Устенко Андрій Сергіович<sup>1)</sup>

Аспірант каф. Інформаційних технологій

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0546-7019>; uas059877@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885

<sup>1)</sup> Національний університет ім. І. І. Мечникова. Одеса, Україна

<sup>2)</sup> Національний університет “Одеська морська академія”. Одеса, Україна

### АНОТАЦІЯ

Розглянуто умови створення математичної моделі термоелектричного охолоджувального пристрою надійності орієнтованого типу. В якості бази моделі використано конструктивну особливість термоелектричних охолоджувачів, що полягає в послідовному електричному з'єднанні однакових термоелементів з однорідними фізичними характеристиками. Це дозволило використовувати математичний апарат теорії надійності, що істотно спрощує опис процесу, прийнявши припущення про однорідність складових. Введення коефіцієнтів зв'язку інтенсивності відмов виробу з відмовою одного термоелемента дозволило пов'язати цей показник з впливом енергетичних показників, які відображають модуляцію теплофізичних показників термоелементів. Представлення енергетичних показників у відносних одиницях дозволило перейти від якісної моделі зв'язку інтенсивності відмов з конструктивними та енергетичними показниками до кількісної. Актуальність розвитку надійності орієнтованої моделі в напрямку виявлення екстремальних залежностей зв'язку показників термоелектричного охолоджувача очевидна. Розроблено математичну модель зв'язку тепловідвідної здатності тепловідводу від таких енергетичних показників, як теплопродуктивність, відносний робочий струм, перепад температур. Попередній аналіз моделі показав наявність екстремумів залежностей, що потенційно дозволяє мінімізувати масогабаритні характеристики тепловідводу, що відноситься до найважливіших параметрів бортових систем літальних апаратів. Показано, що при проектуванні системи забезпечення теплових режимів «об'єкт – термоелектричний охолоджувач – тепловідвідний пристрій» існує ряд уніфікованих серій промислово випускаються пристроїв. При цьому необхідна мінімізація масогабаритних характеристик системи забезпечення, що складаються з обмеженої номенклатури вироблених виробів. Для вирішення цього завдання розроблено оптимізаційну модель, що дозволяє отримувати квазіоптимальне значення при обмеженій кількості номенклатури. Отримано вирази, які дозволяють аналізувати поведінку термоелектричного охолоджувача при різних режимах роботи. Показано, що для режиму максимальної холодопродуктивності досягається оптимізоване значення тепловідвідної здатності від відносного перепаду температури. Отримано математичні моделі термоелектричного охолоджувального пристрою, які пов'язують конструктивні, енергетичні, масогабаритні та характеристики надійності. Аналіз цих залежностей дозволяє зробити багато корисних теоретичних і практичних висновків щодо екстремальних значень, діапазону зміни, зіставлення значень при різних струмових режимах роботи, впливу перепадів температур, доцільних областей застосування.

**Ключові слова:** математична модель; інтенсивність відмов; тепловідвідна здатність; енергетичні показники

**Вступ.** Основними виконавчими органами термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури є термоелектричні охолоджувачі, параметри і показники яких значною мірою позначаються на характеристиках інформаційних систем. Першим етапом досліджень є створення математичної моделі термоелектричного виконавчого органу. При розробці моделі охолоджувача прийняті наступні припущення [1]:

- відмови термоелементів незалежні і раптові;
- інтенсивність відмов окремих термоелементів не залежить від часу, тобто виключені періоди припрацювання і інтенсивного старіння;
- термоелементи включені послідовно, вихід з ладу одного термоелемента призводить до виходу з ладу термоелектричного охолоджувача;
- час до відмови розподілений за експоненціальним законом, що відповідає центральній граничній теоремі.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

**Основна частина.** З даних припущень, які були багаторазово перевірені експериментальними дослідженнями [1], випливає, що інтенсивність відмов термоелектричного охолоджувача, що складається з послідовно з'єднаних термоелектричних елементів, можна представити у вигляді:

$$\lambda = \sum \lambda_i n_i; \quad (1)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмови  $i$ -го термоелемента;  $n_i$  – кількість термоелементів.

І якщо прийняти, що всі термоелементи однакові і впливом умов експлуатації центральних і периферійних елементів можна знехтувати, вираз (1) набуває вигляду [2]:

$$\lambda = \lambda_i n_i, \quad (2)$$

що свідчить про пряму залежність інтенсивності відмов виробу від необхідної кількості термоелементів для досягнення необхідної холодопродуктивності  $Q_0$ .

Оскільки інтенсивність відмов термоелемента  $\lambda$  залежить від багатьох факторів [3], вводять поняття номінальної інтенсивності відмов одного термоелемента  $\lambda_0$  і коефіцієнти значущості факторів [1]:

$$\lambda = \lambda_0 K_p K_\rho K_\theta K_\phi n, \quad (3)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт режиму, що характеризує залежність показників надійності від величин електричного та теплового навантаження, перепаду температур  $\Delta T$ . Для термоелектричних охолоджувачів його представляють у вигляді відношення робочої напруги, струму, холодопродуктивності та перепаду температур до гранично допустимого значення;  $K_\rho$  – коефіцієнт, що враховує умови експлуатації;  $K_\phi$  – коефіцієнт, що залежить від функціонального призначення (приймають = 1).

Очевидно, що це якісне уявлення показників надійності [4] від таких значущих показників як робочого струму  $I$ , перепаду температур  $\Delta T$ , холодопродуктивності  $Q_0$ , напруги живлення  $U$ . Якщо ввести обмеження від мінімуму до максимуму даних метричних величин [5] і використовувати відносні значення, можна перейти до кількісного опису коефіцієнта режиму [1]:

$$K_p = K_u K_I K_{Q_0} K_{\Delta T}, \quad (4)$$

де:

$$K_I = \frac{I}{I_{\max}} = B; \quad (5)$$

$$K_{\Delta T} = \theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}; \quad (6)$$

$$K_u = \frac{U}{U_{\max}} = \frac{B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta}{1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta}; \quad (7)$$

$$K_{Q_0} = \frac{Q_0}{Q_{0\max}} = \frac{2B - B^2 - \theta}{1 - \theta}, \quad (8)$$

$B$  – відносний робочий струм, відн. од.;

$\Delta T_{\max}$  – максимальний перепад температур, К;

$\Delta T = T - T_0$  – робочий перепад температур від відповідно поглинаючого та тепловиділяючого спайів, К;

$\theta$  – відносний перепад температур, відн. од.

Підставивши ці уявлення (3), отримуємо важливе співвідношення відносної інтенсивності відмов від значущих показників термоелектричного охолоджувача [1]:

$$\frac{\lambda}{n\lambda_0} = \frac{B\theta(2B - B^2 - \Theta) \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right)}{(1 - \theta) \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right)} K_T. \quad (9)$$

Наслідком цього співвідношення є можливість отримання нових кількісних моделей. Холодопродуктивність ТЕП  $Q_0$  можна записати у вигляді [2]:

$$Q_0 = nI_{\max}^2 R(2B - B^2 - \Theta), \quad (10)$$

де  $I_{\max} = \frac{eT_0}{R} = e\sigma T_0 \frac{s}{l}$  – максимальний робочий струм, А;

$R = \frac{l}{\sigma s}$  – електричний опір гілки термоелемента, Ом;

$\frac{l}{s}$  – відношення висоти до площі поперечного перерізу гілки (геометрія) термоелемента, см<sup>-1</sup>;

$\Delta T_{\max} = 0,5 z T_0^2$  – максимальний перепад температури, К.

Вираз (10) можна записати у вигляді:

$$Q_0 = n\gamma(2B - B^2 - \Theta), \quad (11)$$

де  $\gamma = e^2 \sigma T_0^2 \frac{s}{l}$  – максимальна термоелектрична потужність охолоджуючого термоелемента, Вт.

Отже, холодопродуктивність ТЕУ прямо пропорційна кількості термоелементів  $n$ , максимальної термоелектричної потужності охолодження  $\gamma$  і залежить від режиму роботи  $B$  (відносного робочого струму) і відносного перепаду температури  $\Theta$ .

В режимі  $Q_{0\max}$ : при  $B = 1$ ,  $\Delta T \rightarrow 0$ ,  $\Theta \rightarrow 0$  вираз (11) можна подати у вигляді:

$$Q_{0\max} = n\gamma. \quad (12)$$

Потужність споживання ТЕП можна записати як:

$$W = 2n\gamma B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (13)$$

Таким чином, потужність споживання прямо пропорційна величині  $\gamma$ .

Холодильний коефіцієнт визначається відомим виразом [2]:

$$E = \frac{Q_0}{W} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{2B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)} \quad (14)$$

та не залежить від  $\gamma$ .

Відносну величину інтенсивності відмов можна записати у вигляді [6]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = nB^2 (\Theta + C) \frac{\left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2} K_T, \quad (15)$$

де  $C = \frac{Q_0}{nI_{msx}^2 R} = \frac{Q_0}{n\gamma}$  – відносна величина теплового навантаження:

$\lambda_0$  – номінальна інтенсивність відмов ( $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$  1/год), 1/год:

$K_T$  – коефіцієнт значимості, що залежить від температури.

Імовірність безвідмовної роботи  $P$  можна визначити за відомою формулою [1]:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (16)$$

де  $t$  – ресурс, год.

Кількість термоелементів  $n$  можна визначити із співвідношення [7]

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (17)$$

Потужність споживання  $W_K$  ТЕП можна визначити з виразу:

$$W_K = 2nI_{\max K}^2 R_K B_K \left( B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (18)$$

Падіння напруги

$$U_K = W_K / I. \quad (19)$$

Холодильний коефіцієнт  $E$  можна визначити за формулою

$$E = Q_0 / W_K. \quad (20)$$

Для оцінки впливу відносного теплового навантаження на показники стійкості до відмови ТЕП використані результати досліджень [8], що показують залежність інтенсивності відмов  $\lambda_{\Sigma}$  2-х каскадного ТЕП від відносного теплового навантаження. З отриманих результатів випливає, що зі збільшенням навантаження при різних значеннях відношення кількості термоелементів, при різних температурах спостерігається зростання відносної інтенсивності відмов, отже, зменшується можливість безвідмовної роботи. Цей показник є значним і значною мірою визначає стійкість до відмови при експлуатації.

Розширимо моделі за рахунок урахування впливу тепловідвідного радіатора на систему забезпечення тепловими режимами теплонавантажених елементів інформаційної системи. При природно-конвективному теплообміні радіатора із середовищем маса та габарити останнього часто превалюють і досить значно над масою та габаритами ТЕП.

Крім того, із зменшенням тепловідвідної здатності радіатора ( $\alpha F$ ) зменшується холодильний коефіцієнт  $E$ , збільшується: величина робочого струму  $I$ , відносна величина інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$ , а, отже, зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$  всього пристрою.

За рахунок удосконалення технології виготовлення ТЕП вдалося знизити їх розміри та масу на одиницю холодопродуктивності. Це призвело до зростання щільності теплових потоків на тепловідляючій поверхні ТЕП і більш гостро постає питання про мінімізацію тепловідвідної поверхні радіатора, особливо при природній конвекції та для бортових інформаційних систем. Робочий діапазон зміни тепловідвідної здатності радіатора знаходиться в межах  $\infty > \alpha F \geq \alpha F_{\min}$ . Тому раціональне проектування ТЕП нерозривно пов'язане з урахуванням характеристик радіатора з теплопровідністю.

Проведемо аналіз впливу параметрів тепловідвідного радіатора на показники надійності функціонування одно каскадних пристроїв, що охолоджують.

Співвідношення для визначення тепловідвідної здатності радіатора ( $\alpha F$ ) можна записати у вигляді [6]:

$$\alpha F = Q/(T - T_c) \quad (21)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $F$  – площа поверхні радіатора, м<sup>2</sup>;

$Q = Q_0(1 + 1/E)$  – теплопродуктивність ТЭП;

$Q_0$  – величина теплового навантаження, Вт;

$E = \frac{2B - B^2 - \Theta}{2B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}$  – холодильний коефіцієнт, відн. од.;

$$E = \frac{2B - B^2 - \Theta}{2B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}$$

$T_c$  – температура середовища, К;

$\Theta = T/\Delta T_{\max}$  – відносний перепад температури, відн. од.;

$\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$  – максимальний перепад температури, К;

$\bar{z}$  – ефективність термоелектричного матеріалу у модулі, 1/К;

$R = l/(\sigma S)$  – електричний опір гілки термоелемента, Ом;

$\bar{e}, \bar{\sigma}$  – відповідно, коефіцієнт термоЕРС, В/К та електропровідність, См/см гілки термоелемента.

Вираз (21) можна подати у вигляді:

$$\alpha F = \frac{Q_0 \left[ B^2 + 2B \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right) - \Theta \right]}{(2B - B^2 - \Theta) \Delta T_{\max} (\Theta - \Theta_c)}, \quad (22)$$

або

$$K = \frac{\alpha F \Delta T_{\max}}{Q_0} = \frac{B^2 + 2B \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right) - \Theta}{(2B - B^2 - \Theta) \Delta T_{\max} (\Theta - \Theta_c)}. \quad (23)$$

Оскільки при  $\alpha F \rightarrow \infty$  та  $K \rightarrow \infty$  доцільно у подальшому розглядати величину  $a = 1/K = Q_0/(\alpha F \Delta T_{\max})$ ;

$$a = \frac{1}{K} = \frac{Q_0}{\alpha F \Delta T_{\max}} = \frac{(2B - B^2 - \Theta) \Delta T_{\max} (\Theta - \Theta_c)}{B^2 + 2B \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right) - \Theta}, \quad (24)$$

де  $\Theta_c = (T_c - T_0)/\Delta T_{\max}$ ;  $T - T_c = \Delta T_{\max}(\Theta - \Theta_c)$ .

У деяких випадках проектування системи забезпечення теплових режимів «об'єкт-ТЕП-радіатор тепловідведення» у розпорядженні розробника є уніфіковані ряди як ТЕП. так і тепловідвідних радіаторів ( $\alpha F$ ).

У цьому випадку необхідно при заданих значеннях  $\alpha F$  тепловідвідних радіаторів, а також теплового навантаження  $Q_0$  і термоелектричної ефективності модулів  $\bar{z}$  ( $\Delta T_{\max}$ ) вибрати таку конструкцію ТЕП, яка забезпечує задані умови функціонування системи. Для цього можна використовувати співвідношення (24).

$$\Theta^2 B(2 - B) - \Theta [2B(1 - \alpha \Delta T_{\max}/T_0) - B^2 + \Theta_c + \alpha] + \alpha B(2 + B) + B\Theta_c(2 - B) = 0 \quad (25)$$

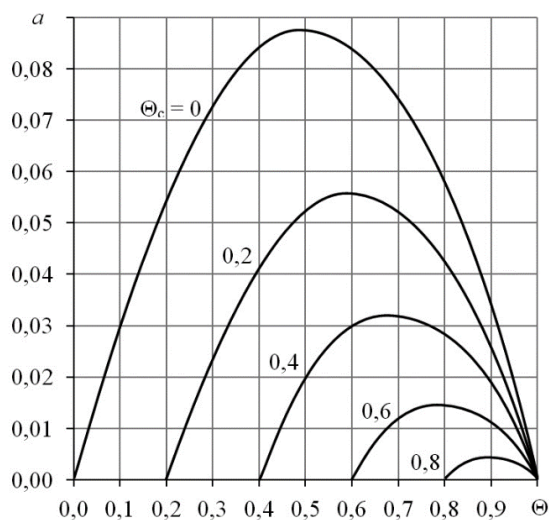
Аналіз виразів (24), (25) показує, що якщо температура тепловиділяючих спаїв  $T$  близька до температури навколишнього середовища  $T_c$ , то для відведення теплової потужності потрібна велика розвинена поверхня теплообміну  $\alpha F \rightarrow \infty$ ,  $a \rightarrow 0$ . У разі, якщо різниця температур ( $T - T_c$ ) буде досить велика, то при цьому суттєво зменшується холодильний

коефіцієнт  $E$ , внаслідок цього зростає тепловий потік на тепловідділяючих з'яях, що потребує збільшення поверхні радіатора. Визначення максимуму функції  $a = f(\Theta)$  при оптимальному відносному перепаді температури  $\Theta_{opt}$  дозволяє знайти мінімальну тепловідвідну поверхню радіатора  $\alpha F_{min}$ .

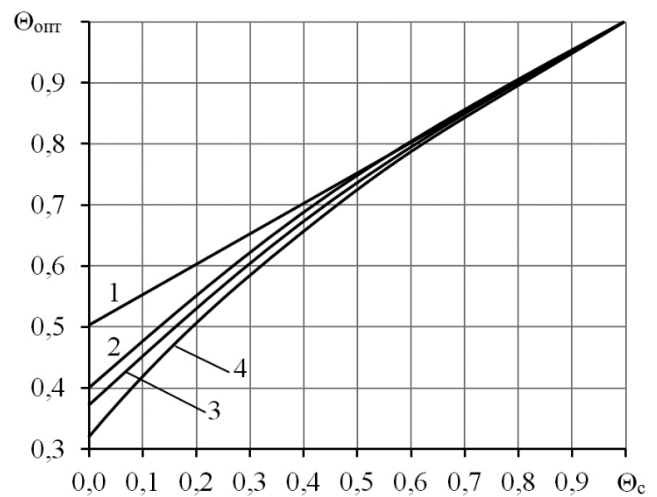
З умови  $da/(d\Theta) = 0$  отримаємо співвідношення для визначення оптимального відносного перепаду температури  $\Theta_{opt}$ , відповідного мінімальній тепловідвідній здатності радіатора  $\alpha F_{min}$  для різних струмових режимів роботи (рис. 1).

$$\Theta_{opt}^2 \left( 1 - 2B \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \right) - 2\Theta_{opt} (B^2 + 2B) + (2B + B^2 + \Theta_c)(B^2 + 2B) - \left( 1 - 2B \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \right) (2B - B^2) \Theta_c = 0 \quad (26)$$

На рис. 1 та рис. 2 представлені залежності величин від величини відносного перепаду температур.



**Рис. 1. Залежність величини  $a = Q_0/(\alpha F \Delta T_{max})$  від відносного перепаду температури  $\Theta$  однокаскадного ТЕП при  $T = 300$  К для різних значень  $\Theta_c$  в режимі  $Q_{0max}$**



**Рис. 2. Залежність оптимального значення відносного перепаду температури однокаскадного ТЕУ від величини  $\Theta_c$  при  $T = 300$  К;  $Q_0 = 0,5$  Вт для різних режимів роботи:  
1 – режим  $Q_{0max}$ ; 2 – режим  $(Q_0/I)_{max}$ ;  
3 – режим  $(Q_0/I^2)_{max}$ ; 4 – режим  $\lambda_{min}$**

Отримані вирази дозволяють аналізувати поведінку ТЕП за різних режимів роботи. Зокрема, для режиму максимальної холодопродуктивності  $Q_{0max}$  ( $B=1$ ), скористаємося співвідношенням (24) для розгляду функціональної залежності  $a = f(\Theta)$  при заданому тепловому навантаженні  $Q_0 = 0,5$  Вт,  $T_c = 300$  До в режимі  $Q_{0max}$  для різних значень  $\Theta_c$ .

Функціональна залежність  $a = f(\Theta)$  має максимум для різних  $\Theta_c$ , що відповідає оптимальному відносному перепаду температури  $\Theta_{opt}$ .

Для режиму  $Q_{0max}$  ( $B=1$ ) співвідношення (26) набуде вигляду:

$$\Theta^2 \left( 1 - 2 \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \right) - 6\Theta + 3(1 + \Theta_c) - \Theta_c \left( 1 - 2 \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \right) = 0, \quad (27)$$

або

$$\Theta^2 \left( 1 - 2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right) - 6\Theta + 3 + 2\Theta_c \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right) = 0.$$

Аналіз рис. 1 показує, що при різних значеннях відносних перепадів температур відношення холодопродуктивності до тепловідвідної спроможності радіатора (максимальний перепад температур – константа) має явно означені екстремуми. Відповідно, з'являється реальна можливість мінімізувати масогабаритні характеристики системи відводу теплових потоків, що важливо для бортових систем.

### Висновки

1. Отримано математичні моделі термоелектричного охолоджуючого пристрою, які пов'язують конструктивні, енергетичні, масогабаритні та надійнісні характеристики.

2. Аналіз цих залежностей дозволяє зробити багато корисних теоретичних та практичних висновків щодо екстремальних значень, діапазону зміни, зіставлення значень при різних струмових режимах роботи, впливу перепадів температур, доцільних областей застосування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. “Prediction of reliability on thermoelectric cooling devices. KN.1 Single-stage devices”. *Publ. Politehperiodika*. Odesa: Ukraine. 2009.

2. Tsai H. L., Lin J. M. “Model building and simulation of thermoelectric module using matlab/Simulink”. *Journal of Electronic Materials*, 2010; 39 (9): 2105–2111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-009-0994-x>.

3. Yu J., Zhu Q., Kong L., Wang H., Zhu H. “Modeling of an integrated thermoelectric generation–cooling system for thermoelectric cooler waste heat recovery.” *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University. Harbin, China. Energies*. 2020; 13 (18): 4691. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184691>.

4. Zhang J., Huadong Z., Feng B., Song X., Zhang X., Zhang R. “Numerical simulations and optimized design on the performance and thermal stress of a thermoelectric cooler”. *International Journal of Refrigeration*. 2022; 146: 314–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.11.010>.

5. Yu J., Zhu Q., Kong L., Wang H., Zhu H. “Modeling of an Integrated Thermoelectric Generation–Cooling System for Thermoelectric Cooler Waste Heat Recovery”. *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China. Energies*. 2020; 13 (18): 691. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184691>.

6. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. “Analysis of dynamics and prediction of reliability indicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches”. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2018; 5/8 (95): 41–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123890>.

7. Zaykov V. P., Mescheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. “Influence of the thermal load on reliability indices of two-stage thermoelectric cooling devices”. *East European Journal of Advanced Technologies. Applied Information Technology*. 2011; 4/9 (52): 34 – 38.

8. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. “Prediction of reliability indicators, thermoelectric cooling devices. Book 4. Dynamics of functioning of single-stage TED”. *Polytehpriodika*. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.17>

UDC 004.49

## Model of the executive body of a thermoelectric system providing thermal regimes

Vladimir I. Meshcheryakov<sup>1)</sup>

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0499-827X>; meshcheryakovvi48@gmail.com

**Yurii I. Zhuravlov<sup>2)</sup>**

Ph.D., Assoc. Associate Professor of the Department of Materials and Ship Repair Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-1031>; ivanovich1zh@gmail

**Andrii S. Ustenko<sup>1)</sup>**

Graduate Student of the Department of Information Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0546-7019>; uas059877@gmail.com

<sup>1)</sup> Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

<sup>2)</sup> National University “Odesa Maritime Academy”. Odesa, Ukraine

## ABSTRACT

The conditions for creating a mathematical model of a thermoelectric cooling device of a reliability-oriented type are considered. The design feature of thermoelectric coolers, which consists in the serial electrical connection of identical thermoelements with uniform physical characteristics, is used as the basis of the model. This made it possible to use the mathematical apparatus of the reliability theory, which significantly simplifies the description of the process, assuming the homogeneity of the components. The introduction of coefficients of connection of the product failure intensity with the failure of one thermoelement made it possible to connect this indicator with the influence of energy indicators, which reflect the modulation of the thermophysical indicators of thermoelements. The representation of energy indicators in relative units made it possible to move from a qualitative model of the connection of the failure intensity with constructive and energy indicators to a quantitative one. The relevance of the development of a reliability-oriented model in the direction of identifying extreme dependencies of the connection of the indicators of a thermoelectric cooler is obvious. A mathematical model of the relationship between the heat dissipation capacity of the heat sink and such energy indicators as heat output, relative operating current, and temperature difference has been developed. A preliminary analysis of the model has shown the presence of extrema of dependencies, which potentially allows minimizing the mass-dimensional characteristics of the heat sink, which is one of the most important parameters of aircraft onboard systems. It is shown that when designing a system for providing thermal regimes “object - thermoelectric cooler - heat sink device”, there are a number of unified series of industrially produced devices. In this case, it is necessary to minimize the mass-dimensional characteristics of the system, consisting of a limited range of manufactured products. To solve this problem, an optimization model has been developed that allows obtaining a quasi-optimal value with a limited number of nomenclatures. Expressions have been obtained that allow analyzing the behavior of the thermoelectric cooler under different operating modes. It is shown that for the maximum cooling capacity mode, an optimized value of the heat dissipation capacity from the relative temperature difference is achieved. Mathematical models of a thermoelectric cooling device have been obtained, which link the structural, energy, mass-dimensional and reliability characteristics. Analysis of these dependencies allows us to make many useful theoretical and practical conclusions regarding extreme values, range of change, comparison of values at different current operating modes, influence of temperature differences, and appropriate areas of application.

**Keywords:** mathematical model; failure rate; heat dissipation capacity; energy performance