DOI: https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.10
УДК 004.49

Управління показниками надійності термоелектричних систем забезпечення теплових режимів при обмеженому енергоспоживанні

Зайков Володимир Петрович[1)]
Канд. техніч.наук, старший науковий співробітник
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4078-3519; gradan@i.ua. Scopus Author ID: 57192640250
Мещеряков Володимир Іванович[2)]
Д-р техніч.наук, професор, каф. Інформаційних технологій
ORCID:https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
Устенко Андрій Сергійович[2)]
Аспірант, каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019; uas059877@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
[1)] Науково дослідний інститут ШТОРМ. Одеса, Україна
[2)] Національний університет ім. І. І. Мечнікова, вул. Всеволода Змієнка, 2, Одеса, 65082, Україна

АНОТАЦІЯ

Температурна залежність радіоелектронних компонентів істотно впливає на технологію створення і методи конструювання інформаційних систем. Системи забезпечення теплових режимів є необхідною складовою бортових систем, для яких найважливішими вимогами є надійність, маса, габарити та енергоспоживання. Термоелектричний метод відбору тепла належить до найперспективніших для виробів із локалізованим і нерівномірно розподіленим розташуванням теплонавантажених елементів. Вимога підвищення показників надійності системи при підвищенні динаміки та зниженні маси належить до фундаментальних проблем, її розв'язання актуальне, а пошук компромісних рішень між показниками надійності та динаміки є метою досліджень. У роботі показано, що основними значущими показниками термоелектричних систем забезпечення теплових режимів є надійність, динаміка, енергоспоживання та управління. Розроблено математичну модель системи забезпечення теплових режимів, що складається з: теплонавантаженого об'єкта – термоелектричного охолоджувача – пристрою передачі тепла в навколишнє середовище. Виявлено визначальний зв'язок інтенсивності відмов з геометрією термоелементів і струмовими режимами, динаміки з енергетичними показниками та фізичними властивостями матеріалу термоелементів, можливості пошуку компромісів між показниками надійності та динаміки охолоджувача. Обґрунтовано доцільність оптимізованого управління виконавчим органом за комплексом взаємопов'язаних основних енергетичних, часових, показників надійності і галузей їх переважного використання. Практична доцільність досліджень полягає в інтенсифікації теплообміну тепловідводу із зовнішнім середовищем, зменшенні перепаду температур, що дає змогу зменшити інтенсивність відмов і покращати динамічні характеристики термоелектричних систем забезпечення теплових режимів.

Ключові слова: інтенсивність відмов; динамічні характеристики; енергоємність; комплексні показники управління

Актуальність. Системи забезпечення теплових режимів є необхідною складовою інформаційних систем, оскільки щільність виділення тепла мікроелектронною апаратурою, теплонавантаженими перетворювачами істотно перевершує можливості природного поверхневого теплообміну з навколишнім середовищем [1]. Зростання температури електронних компонентів на кожні 10^0 С призводить до дворазового збільшення інтенсивності відмов і виходу з ладу елементів за умови перевищення допустимої температури, зокрема й під час перехідних процесів. Порівняльний аналіз засобів відбору тепла від теплонавантажених елементів показує, що за показниками надійності, швидкодії, масогабаритними характеристиками за потужності відбору до 0.5 КВт найприйнятнішими виявляються термоелектричні охолоджувальні пристрої (ТЕП) [2]. За моделлю надійності тепловидільний і охолоджувальний елемент включено послідовно, тому вимоги до показників надійності термоелектричного охолоджувача мають бути не нижчими за вимоги до критичного елемента і до інформаційної системи в цілому [3]. Якщо розглядати ТЕП як виконавчий орган системи автоматичного керування, що має один вхід та один вихід, підходимо до класичної SISO-інформаційної моделі, в якій фізичні потоки замінено

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

інформаційними [4]. Основними показниками автоматичної системи забезпечення теплових режимів є постійна часу та час запізнювання, які визначають за перехідними процесами можливості функціонування та робастності системи [5]. Аналіз сучасних методів синтезу регуляторів Циглера-Ніколсона, Коена-Куна та робастного з фільтрацією показав, що за відношення часу запізнювання до сталої часу менше ніж три всі методи синтезу є результативними [6]. Аналіз структур одновимірних систем керування з компенсацією йде у двох напрямках: формування багатоконтурних систем і вимірювання збурень [7]. Представником першого напряму є каскадна схема, у якій SISO-об'єкт розбивається на дві або більше послідовно з'єднаних частин – менш та більш інерційну. Налаштування здійснюється від зовнішнього контуру до внутрішнього, що сприяє підвищенню стійкості системи керування. Представником другого напряму є система вимірювання збурень, які можуть бути як вимірюваними, так і не вимірюваними, що наближає її до розімкнутої системи з відповідним підвищенням швидкодії. Основним критичним елементом системи забезпечення залишається охолоджувач, оскільки він безпосередньо контактує з теплонавантаженим елементом, а обробна частина регулятора може розташовуватися в більш комфортних температурних умовах [8]. Підвищення вимог до апаратури і, як наслідок, показників надійності, динаміки та керованості термоелектричних охолоджувачів, як найкритичнішого елемента системи забезпечення теплових режимів, видається актуальним.

Метою дослідження є визначення основних показників надійності і управління термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури при обмеженнях в енергопостачанні.

Найважливішими показниками термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури є: інтенсивність відмов, динамічні та енергетичні характеристики, фактори управління. Отримано вираз для інтенсивності відмов λ, яка характеризує якість виробу, здатність зберігати працездатність у мінливих кліматичних, механічних, радіаційних умовах експлуатації, причому відмова охолоджувача може призвести до виходу з ладу всієї системи [9].

Відносну величину інтенсивності відмов можна представити у вигляді зв'язку з конструктивними та енергетичними показниками: $\frac{\lambda}{\lambda_0}=\frac{nB^2\left(\Theta+C_1\right)\left(B+\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right)^2}{\left(1+\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right)^2}K_T,$

де n – кількість термоелементів; B – відносний робочий струм; Θ – перепад температури; $C_1=\frac{Q_0}{nI_{\max}^2R}=\frac{Q_0}{n\gamma}$ – відносне теплове навантаження; T – температура тепловидільного спаю; $\Delta T_{\max}=0{,}5\bar{Z}T_0^2$ – максимальний перепад температури; γ – потужність охолодження; Q_0 – теплове навантаження; K_T – коефіцієнт температурної значущості.

Аналіз розрахункових значень основних параметрів і показників надійності показав, що зі зменшенням конструктивного параметра – відношення l/S за заданого перепаду температури ΔT і теплового навантаження Q_0 у режимі $(Q_0/I)_{max}$ зменшується інтенсивність відмов λ (рис. 1,а), збільшується ймовірність безвідмовної роботи P, постійних значень потужності споживання W і холодильного коефіцієнту E. Максимальний перепад температури $\Delta\Theta_{\text{стац}}^{\max}=\Theta_0+B-\left[B^2+2\Theta_0B+2K_{\text{н}}\left(1+2\xi_{\text{к}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$, який досягається за оптимальної густини струму $\nu_T^o=\frac{\left[B^2+2\Theta_0B+2K_{\text{и}}\left(1+2\xi_{\text{к}}\right)\right]^{1/2}-B}{1+2\xi_{\text{к}}}$. Відносний робочий струм $B = (1+B_{i1})(1+2\zeta_к)$ і перепад температури $\Delta\Theta=\Theta_0-\Theta$ між спаями термоелемента дозволив уявити перепад у вигляді $\Delta\Theta=\Theta_{стац}-f(F_0)$, де $f(F_0)=\sum_{K=1}^{\infty}A_{\text{к}}\exp\left(-\delta_{\text{к}}^2F_{\text{о}}\right)$. При цьому

$\Delta\Theta_{\text{стац}} = \frac{\nu\Theta_0\left(0{,}5+\xi_к\right)\nu^2 - K_н}{1+\nu+B_{i1}}$. Ряд f визначає швидкість наближення температури теплопоглинаючого спаю до стаціонарного значення [10].

Аналіз отриманих співвідношень дав змогу стверджувати, що:

– зі зростанням коефіцієнта тепловіддачі B_{i1}=5 і η_1=0 залежність $\Delta\Theta=f(\nu)$ має екстремум і перепад температури в точці екстремуму перевершує стаціонарний ($\nu\geq1.0$);

– для отримання більш простого співвідношення $\Delta\Theta=f(F_0)$ зручно використовувати модель термоелемента з напівнескінченною довжиною гілки термоелемента, за якої критерій Фур'є $F_0=at/l^2<<<1$.

Це забезпечує можливість комп'ютерної реалізації співвідношення в реальному масштабі часу та управління перепадом температури у теплопоглинаючому спаї у функції часу.

– зі зростанням струму вплив термічних опорів на теплопоглинаючому спаї зменшується, а вплив теплоємності та електричного опору збільшується;

– зі зростанням теплоємності на теплопоглинаючому спаї сповільнюється темп охолодження.

Так, за теплоємності об'єкта, що набагато перевищує теплоємність комутаційних пластин, додатковий ефект нестаціонарного охолодження незначний і становить 1-2 % від стаціонарного.

Перевага пропонованого підходу полягає в можливості підвищення швидкості реагування термоелектричного охолоджувача на стрибкоподібний тепловий вплив. Це дає змогу створити термоелектричні системи забезпечення теплових режимів для теплонавантажених елементів підвищеної енергостійкості. Ефективність таких систем визначатиметься не тільки обмеженнями, прийнятими під час розроблення моделі нестаціонарного термоелектричного охолоджувача, а й системою керування. Вхідні показники системи керування, датчики, що використовуються, алгоритми оброблення даних мають також впливати на інерційність і показники надійності термоелектричної системи охолодження, що потребує подальших досліджень. Так, за теплоємності об'єкта, що набагато перевищує теплоємність комутаційних пластин, додатковий ефект нестаціонарного охолодження незначний і становить 1-2 % від стаціонарного.

Аналіз наведених даних показує, що час виходу на режим τ' збільшується порівняно з τ_0. Наприклад, за теплового навантаження Q_0 = 5.0 Вт:

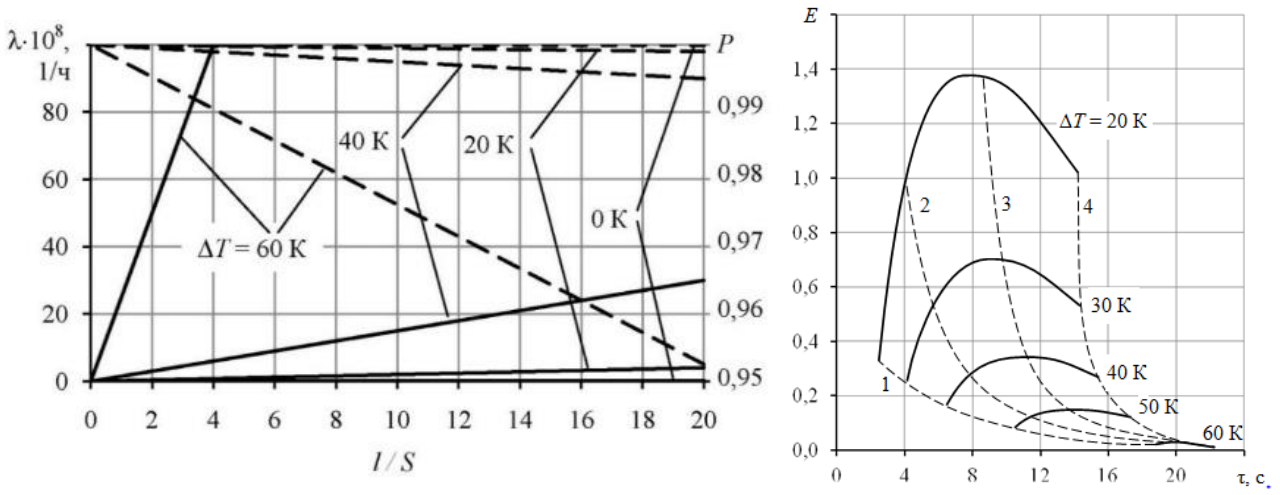
– у режимі Q_{0max} τ_0 = 9.0 с; τ' = 15.9 с, тобто збільшення становить 77 %;
– у режимі $(Q_0/I)_{max}$ τ_0 = 8.6 с; τ' = 16.7 с, тобто збільшення становить 94 %;
– у режимі E_{max} τ_0 = 7.7 с; τ' = 17.7 с, тобто збільшення становить 130 %;
– у режимі λ_{min} τ_0 = 6.1 с; τ' = 20 с, тобто збільшення становить 228 %.

Час виходу на стаціонарний режим роботи власне однокаскадного ТЕП в діапазоні робочих перепадів температури ΔT і різного теплового навантаження Q_0 залежить від відносного робочого струму (струмові режими роботи) за заданої геометрії гілок термоелементів l/S = 4.5 і становить:

– від τ = 0.6 с при ΔT = 5 К до τ = 22.6 с при ΔT = 60 К у режимі Q_{0max};
– від τ = 1.7 с при ΔT = 5 К до τ = 23.1 с при ΔT = 60 К у режимі $(Q_0/I)_{max}$;
– від τ = 9.3 с при ΔT = 5 К до τ = 24.1 с при ΔT = 60 К у режимі $(Q_0/I^2)_{max}$;
– від τ = 16.8 с при ΔT = 5 К до τ = 24.8 с при ΔT = 60 К у режимі λ_{min}.

Отримані результати (Рис. 1,б) засновані на розробленій моделі однокаскадного термоелектричного охолоджувального пристрою для заданої динаміки перехідного процесу. Дослідження проведено в діапазоні 20 до 60 К за типових значень теплового навантаження Q_0=0.5 Вт для l/S=10 см$^{-1}$ і різних характерних струмових режимів роботи.

Особливістю запропонованої моделі, порівняно з наявними моделями, є врахування впливу конструктивних і технологічних елементів на динамічні характеристики та показники надійності охолоджувача.



а б

Рис. 1. **Залежність:**
а – інтенсивності відмов λ (суцільні лінії) і ймовірності безвідмовної роботи *P* (пунктирні лінії) від відношення *l/s* при *T* = 300 К; Q_0 = 2,0 Вт і різних значеннях Δ*T* в режимі $(Q_0/I)_{max}$);
б – холодильного коефіцієнту *E* від часу виходу на стаціонарний режим τ при *l/S*=10 см$^{-1}$; Q_0=0.5 Вт при різних перепадах температур Δ*T* для режимів роботи:
1 – режим Q_{0max}; 2 – режим $(Q_0/I)_{max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{max}$; 4 – режим λ_{min}

Аналіз результатів розрахунків основних параметрів і показників надійності показав, що зі зростанням часу виходу на стаціонарний режим роботи τ для різних перепадів температури ΔT:

– збільшуються: відносний робочий струм $B_к$, величина робочого струму I, кількість термоелементів n, величина падіння напруги U, відносна величина інтенсивності відмов λ/λ_0;

– зменшуються: холодильний коефіцієнт E і ймовірність безвідмовної роботи P.

До числа основних параметрів ТЕП, що забезпечують заданий тепловий режим функціонування належать: кількість термоелементів n, величина робочого струму I, відносна інтенсивність відмов λ/λ_0, імовірність безвідмовної роботи P, час виходу на стаціонарний режим роботи τ, тепловідвідна здатність радіатора αF. Цим визначається комплекс взаємопов'язаних основних параметрів, що впливають на тепловий режим функціонування ТЕП. Під час раціонального проектування режимом ТЕП слід прагнути до зменшення: кількості термоелементів n, величини робочого струму I, інтенсивності відмов λ, часу виходу на стаціонарний режим роботи τ, тепловідвідної здатності радіатора αF і збільшення ймовірності безвідмовної роботи P. Перераховані основні параметри взаємопов'язані між собою. Тому варіюючи основними параметрами $(n, I, \lambda, \tau, \alpha F)$ і мінімізуючи різні їхні поєднання, можна досягти оптимальних теплових режимів роботи.

Порівняльний аналіз основних параметрів, показників надійності та динаміки функціонування однокаскадного ТЕП в різних характерних струмових режимах роботи засвідчив можливість оптимального управління тепловим режимом роботи за рахунок вибору теплового режиму роботи з урахуванням вагомості кожного з обмежувальних факторів.

Відмітна особливість використання комплексу основних параметрів замість управління за кожним із них полягає в тому, що крім підвищення швидкості реагування системи з термоелектричним охолоджувачем у зворотного зв'язку, забезпечується й оптимізація енергетичних показників.

Так, мінімізація комплексу у взаємозв'язку з показниками надійності та динамікою функціонування термоелемента забезпечує:

– максимальний холодильний коефіцієнт E_{max} і мінімальну тепловідвідну здатність радіатора αF_{min} у режимі $(nI\lambda/\lambda_0\tau)_{min}$ і не залежить від геометрії гілок термоелементів;

– мінімальна кількість витраченої енергії N_{min} і мінімальне падіння напруги U_{min} у режимі $(nI)_{min}$;

– мінімальний час виходу на стаціонарний режим роботи τ_{mIn} і мінімальну кількість термоелементів n_{mIn} у режимі Q_{0max};

– мінімальну величину робочого струму I_{min}, мінімальну відносну інтенсивність відмов $(\lambda/\lambda_0)_{min}$, а, отже, максимальну ймовірність безвідмовної роботи P_{max} і максимальне падіння напруги U_{max} у режимі λ_{min}.

Проаналізовано конструктивні обмеження використання запропонованої моделі, які засвідчили, що зі зростанням відношення l/S за заданого перепаду температури ΔT=40K і теплового навантаження Q_0=0.5Вт:

– збільшується кількість термоелементів n, падіння напруги U, відносна інтенсивність відмов λ/λ_0;

– зменшується величина робочого струму I, імовірність безвідмовної роботи P.

Дослідження експлуатаційних обмежень показали, що зі зростанням перепаду температури ΔT при тепловому навантаженні Q_0=0.5Вт і l/S=4.5:

– збільшується відносний робочий струм B, величина робочого струму I, час виходу на стаціонарний режим роботи τ, тепловідвідна здатність радіатора αF, відносна інтенсивність відмов λ/λ_0, кількість витраченої енергії N і кількість термоелементів n для режимів Q_{0max}, $(nI^2)_{min}$, $(n\alpha F)_{min}$;

– зменшується: холодильний коефіцієнт E, імовірність безвідмовної роботи P, холодопродуктивність Q_0 за заданої кількості термоелементів n у режимі Q_{0max}, $(nI^2)_{min}$, $(n\alpha F)_{min}$.

Практична значущість проведених досліджень полягає в оптимізації управління термоелектричними охолоджувачами в системі забезпечення теплонавантажених елементів. Це досягається за рахунок того, що для режимів роботи $(nI)_{min}$, $(nI\alpha F)_{min}$, $(nI\lambda/\lambda_0\tau)_{min}$, $(nI\lambda/\lambda_0)_{min}$, λ_{min} функціональна залежність $Q_0=f(\Theta)$ має максимум для різних Θ, а залежність $n=f(\Delta T)$ має мінімум для різних ΔT. Подальші дослідження спрямовані на мінімізацію інтенсивностей відмов термоелектричного охолоджувача в робочому діапазоні перепадів температур і мінливих температурних умовах експлуатації.

Розроблений метод оптимального управління тепловим режимом однокаскадного ТЕП на основі мінімізації комплексу основних параметрів дає можливість пошуку і вибору компромісних рішень з урахуванням вагомості кожного з обмежувальних факторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Patil N. G., Hotta T. K. “Combined liquid cold plate and heat sink based hybrid cooling approach for the temperature control of integrated circuit chips”. *ASME*. 2022; 14: 111013. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4054849.

2. Venkatesan K.,·Venkataramanan M. “Experimental and simulation studies on thermoelectric cooler: A performance study approach. *International Journal of Thermophysics.* 2020. 41 (4): 38. DOI: https://doi.org/10.1007/s10765-020-2613-2.

3. Ebale L. O., Pierre Gomat L. J., Nzonzolo L., Mavoungou M. R., Kibongani F. “Optimization of a thermoelectric cooling system with Peltier Effect”. *Am. J. Energ. Eng.* 2019. 7 (3): 55–63. DOI: https://doi.org/10.11648/j.sjee.20190703.12.

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. Memon S., Kalhoro A. N. “Design of multivariable PID controllers: A comparative study”. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2021; 21 (8): 377–384. DOI: https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.8.47.

6. Nebeluk R., Ławryńczuk M. “Tuning of multivariable model predictive control for industrial tasks”. *Algorithms*. 2021. 14 (1): 10. DOI: https://doi.org/10.3390/a14010010.

7. Xie S., Zeng Y., Qian J., Yang F., Li Y. “CPSOGSA optimization algorithm driven cascaded 3DOF-FOPID-FOPI controller for load frequency control of DFIG-containing interconnected power system”. *Energies.* 2023. 16, 1364. DOI: https://doi.org/10.3390/en16031364.

8. Wu Y., Zhang P., Chen S., Zhi C., Shi T., Gong T., Ming T. “Performance optimization of the transient thermoelectric cooling for the temperature control of the chip working under dynamic power”. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 58: 104350. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104350.

9. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Y. “Reliability control of a thermoelectric cooler with changes in ambient temperature”. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023; 6 (2): 152–162. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.10.

10. Zaykov V. P., Mescheryakov V. I., Zhuravlov Yu. I. “Controlling the reliability performance of a thermoelectric cooler under variable heat load”. *Herald of Advanced Information Technology.* 2023; 6 (1): 69–80. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.4.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.10
UDC 004.49

Reliability indicators management of thermoelectric systems for thermal modes under limited power consumption

Vladimir P. Zaykov[1)]
PhD, Senior Researcher
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4078-3519; gradan@i.ua. Scopus Author ID: 57192640250
Vladimir I. Mescheryakov[2)]
Dr. Sc., Professor, Department of Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
Andriy S. Ustenko[2)]
Postgraduate Student, Department of Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019: uas059877@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
[1)] Research Institute “STORM”. Odesa, Ukraine
[2)] Odesa I. I. Mechnikov National University. 2, Vsevolod Zmiienkj Str, Odesa, 65082, Ukraine

ABSTRACT

The temperature dependence of electronic components has a significant impact on the technology and design methods of information systems. Thermal management systems are an essential component of on-board systems, for which the most important requirements are reliability, weight, dimensions and power consumption. The thermoelectric method of heat extraction is one of the most promising for products with localized and unevenly distributed heat-loaded elements. The requirement to improve system reliability while increasing dynamics and reducing weight is a fundamental problem, its solution is relevant, and finding compromise solutions between reliability and dynamics is the goal of research. The paper shows that the main significant indicators of thermoelectric systems for ensuring thermal conditions are reliability, dynamics, power consumption and controllability. A mathematical model of a thermal management system consisting of: a heat-loaded object - a thermoelectric cooler - a device for discharging heat into the environment. The determining relationship between the intensity of failures and the geometry of thermocouples and current modes, dynamics and energy indicators and physical properties of the thermocouple material, and the possibility of finding compromises between reliability indicators and cooler dynamics are revealed. The expediency of optimized management of the executive body by a set of interrelated basic energy, time, reliability indicators and the areas of their preferred use is substantiated. The practical value of the research lies in the intensification of heat exchange of the heat sink with the external environment, reduction of the temperature difference, which makes it possible to reduce the intensity of failures and dynamic characteristics of thermoelectric systems for ensuring thermal conditions.

Keywords: Failure intensity; dynamic characteristics; energy intensity; complex controllability indices