

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.11>

УДК 004.49

Комплексні системи управління тепловими режимами радіоелектронної апаратури

Зайков Володимир Петрович¹⁾

Канд. техніч. наук, старший науковий співробітник

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4078-3519>; gradan@i.ua, Scopus Author ID: 57192640250

Мещеряков Володимир Іванович²⁾

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 Сергійович²⁾

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

Наведено аналіз системи забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури, що є необхідною підсистемою таких сучасних інформаційних систем, як бортових рухомих об'єктів, з підвищеними вимогами до показників надійності, динаміки та керованості. Виокремлено спосіб генерації охолоджувальної енергії на основі ефекту Пельтьє, що має такі переваги, як можливість створення температури, нижчої за навколишнє середовище, малі габарити, масу та підвищені показники надійності порівняно з аналогічними охолоджувачами інших фізичних принципів. Показано, що в розподілених системах з тепло навантаженими елементами необхідна функція транспортування теплових потоків, а найперспективніша для розв'язування задач реалізується на гнучких теплових трубах, які узгоджуються з термоелектричними охолоджувачами за показниками надійності, масо габаритними характеристиками. Розглянуто метод зниження масогабаритних характеристик систем забезпечення теплових режимів з імпульсним тепловиділенням, характерних для систем стеження або бортових систем. Зазначено, що теплота фазового переходу речовин, що плавляться, дає змогу формувати теплові акумулятори, які в разі узгодження з динамічними характеристиками теплових процесів системи дають змогу суттєво знижувати масо габаритні характеристики системи забезпечення теплових режимів. Використання теплових акумуляторів у системах з імпульсно-періодичним впливом дозволяє підвищити також показники надійності за рахунок фільтрації високочастотних теплових викидів у теплонавантажених елементах. Обґрунтовано доцільність системного підходу до проектування термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури з тепловими трубами і тепловими акумуляторами шляхом синтезу багатовимірного регулятора типу «множинний вхід – множинний вихід» (МІМО). Обґрунтовано, що для задоволення основних принципів багатовимірних систем кріюкості та робастності необхідно задовольнити умову створення якісної моделі термоелектричної системи забезпечення теплових режимів тепло навантаженої електронної апаратури.

Ключові слова: термоелектричні охолоджувачі; теплові труби; теплові акумулятори; надійність; масо габаритні характеристики; багатовимірний регулятор

Актуальність. Процес удосконалення радіоелектронної апаратури характеризується збільшенням її складності та щільності компонування з незмінним підвищенням ступеня інтеграції елементної бази. Висока щільність компонування особливо характерна для апаратури спеціального призначення, що має володіти необхідною багатофункціональністю, високою швидкодією і безвідмовністю за мінімально можливих маси і габаритів. Використовувана елементна база має кінцеве значення коефіцієнта корисної дії, тому досить значна частина споживаної апаратурою потужності неминуче перетворюється на теплову, спричиняючи неприпустимий перегрів елементів [1].

У цілій низці приладів від 40–95 % потужності, що підводиться, перетворюється на тепло, яке має відводитися спеціальними системами забезпечення теплових режимів (СЗТР) [2]. Водночас непоодинокими є випадки, коли необхідні параметри елементів апаратури можуть бути отримані тільки за порівняно низьких і навіть кріогенних температур. У цих умовах стає неминучим пошук і технічна реалізація ефективних способів забезпечення теплових режимів з урахуванням її конструктивних особливостей і умов експлуатації. Складність і актуальність проблеми досліджень і розроблення ефективних засобів забезпечення теплових режимів апаратури зумовлена ще й тим, що вона

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

експлуатується в умовах впливу безлічі дестабілізаційних чинників, які різко знижують показники надійності апаратури, одним з яких є кліматичні впливи, коливання температури середовища й умов теплообміну.

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

Нині існують кілька перспективних СЗТР [3]:

- з природним повітряним (рідинним) охолодженням;
- з примусовим повітряним (рідинним) охолодженням;
- випарного типу, зокрема на базі теплових труб і теплосифонів;
- з робочою речовиною, що плавиться;
- з конструктивним охолодженням;
- з використанням вихрових ефектів;
- з охолодженням випромінювального типу.

До числа найбільш раціональних і перспективних для термостабілізації апаратури слід віднести:

- системи з примусовим повітряним і рідинним охолодженням;
- системи з термоелектричним охолодженням;
- системи кріогенного охолодження.

Одним із найприйнятніших способів забезпечення теплового режиму елементів і складових частин радіоелектронної апаратури є термоелектричний [4], як найефективніший у широкому діапазоні робочих температур від 140К до 350К. Термоелектричні пристрої (ТЕП) дають змогу керувати величиною теплового потоку за рахунок простої зміни величини робочого струму. Крім того, термоелектричні пристрої мають унікальну особливість функціонування в режимі охолодження – нагріву за рахунок зміни напрямку робочого струму. Основні переваги термоелектричного способу охолодження перед іншими полягають у високій надійності та малих габаритних розмірах ТЕП, простоті керування та швидкодії [5]. Ці переваги за своєю суттю є наслідком твердотільної природи таких охолоджувачів.

Для розв'язання низки завдань із відведення теплової потужності необхідно забезпечити транспортування теплового потоку від джерела тепла до радіатора повітряного охолодження на відстань, що визначається компонованням елементів і складових частин апаратури, пристроїв охолодження в блоці через спеціальні пристрої - гнучкі теплові труби. Теплова труба являє собою герметичний випарно-конденсаторний пристрій, у якому передача теплового потоку забезпечується за рахунок перенесення парою прихованої теплоти пароутворення теплоносія, а циркуляція теплоносія забезпечується дією капілярних сил. Зони підведення і відведення теплового потоку в гнучкій тепловій трубі з'єднані гнучким елементом – сифоном [6].

Нині теплові труби використовують у вузлах і блоках радіоелектронної апаратури з елементами підвищеної потужності. Їх ефективно використовувати в тих випадках, коли [7]:

- джерело тепла (елемент або група елементів) знаходяться на відстані від місця, де можна забезпечити теплознімання;
- необхідно підвищити компактність і знизити масо-енергетичні характеристики СЗТР і всього виробу.

Слід зазначити, що при використанні теплової труби (ТТ) підвищується ефективність як активної, так і пасивної систем охолодження. У цьому разі використання ТТ дає змогу поліпшити компоновання і зменшити масогабаритні характеристики виробу, поліпшити теплознімання (відведений від виробу тепловий потік), зменшити вартість виробу і підвищити показники надійності. Надійність ТТ можна визначити як властивість зберігати в часі значення термічного опору, що характеризує здатність ТТ передавати тепловий потік від елементів електронної апаратури до тепловідведення (радіатора, несучої конструкції, охолоджувальної рідини, повітря довкілля тощо).

Для відведення теплової потужності від теплонавантажених елементів, що працюють у короткочасних (циклічних) режимах, можна використовувати речовини, що плавляться – термоаккумулятори, які дозволяють у ряді практичних випадків отримати вигоду в масі і розмірах тепловідводів (радіаторів суцільнометалевих) [8]. Так як розміри і маса суцільнометалевих радіаторів розраховується виходячи з умови досягнення стаціонарного режиму незалежно від часу роботи в циклі. Розміри та маса наповнених радіаторів розраховується виходячи з нестационарного режиму з урахуванням теплоємності та теплоти плавлення робочих речовин (наприклад азотнокислий нікель), що знаходиться в ємності наповненого радіатора.

Забезпечення високого рівня надійності електронного обладнання нерозривно пов'язане з використанням СЗТР її елементів і складових частин, а підвищення надійності будь-яких складних систем полягає в підвищенні надійності їх складових. Під час функціонування електронної апаратури та її складової частини – СЗТР необхідно відстежувати (контролювати) критичні параметри розподілених теплонавантажених елементів, обробляти їх, ухвалювати рішення в реальному часі та керувати елементами СЗТР. Додатковими засобами управління, характеристиками і показниками надійності ТЕП є фізичні параметри матеріалів термоелементів, величина робочого струму, напруги живлення, умови теплообміну, зв'язку тепловідвідного радіатора із середовищем.

Технологічні проблеми виготовлення є типовими для планарної та гібридної напівпровідникової техніки і суттєво впливають на показники надійності термоелектричних охолоджувальних пристроїв. Основний вплив мають неоднорідність складу вихідних матеріалів і стабілізація технологічних режимів.

Експлуатація являє собою найменш визначений фактор впливу на показники надійності, оскільки заздалегідь неможливо передбачити ступінь впливу в кожному конкретному випадку прояву кліматичних, механічних, електромагнітних та інших впливів. Умови використання термоелектричних систем забезпечення теплових режимів настільки різноманітні, що вкрай складно їх врахувати під час проектування.

Принципом розв'язання цієї суперечності може бути процес управління інтегральними показниками термоелектричних охолоджувачів у процесі експлуатації, що потребує проведення досліджень зв'язку показника управління з динамічними характеристиками та показниками надійності. Динамічні характеристики вкрай важливі під час включення термоелектричних охолоджувачів у зворотній зв'язок системи регулювання інформаційної системи, оскільки визначають стійкість управління. Показники надійності визначаються і від кількості каскадів термоелектричних охолоджувачів, що передбачає необхідність проведення відповідних досліджень.

Таким чином, під час побудови високонадійних радіотехнічних комплексів із СЗТР однією з ключових проблем є необхідність оцінювання та прогнозування показників надійності ТЕП і визначення шляхів їх підвищення. При цьому в рамках прийнятої моделі з'являється можливість окреслити підходи та методи розв'язання практичних завдань з управління показників надійності ТЕП в системах СЗТР заданої конструкції.

Термоелектричний охолоджувач можна віднести до об'єктів, що повністю управляються, оскільки існує такий вплив, визначений на скінченному інтервалі часу, який переводить його з будь-якого початкового стану в будь-який кінцевий стан у робочому діапазоні зміни робочих струмів.

Для побудови ефективної термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури необхідно [9]:

- розроблення математичної моделі СЗТР на основі ТЕП для оцінювання впливу умов теплообміну тепловідвідного радіатора із середовищем на основні параметри, показники надійності, динамічні та енергетичні характеристики ТЕП за заданого температурного рівня охолодження T_0 , теплового навантаження Q_0 , температури середовища T_c , геометрії гілок термоелементів (відношення l/S) для різних струмових режимів роботи.

У рамках цієї моделі необхідно дослідити можливість:

зменшення

- відносної інтенсивності відмов λ/λ_0 ;
- величини робочого струму I ;
- кількості витраченої енергії N ;
- часу виходу на стаціонарний режим роботи τ ;

збільшення

- холодильного коефіцієнта E ;
- ймовірності безвідмовної роботи P ;
- падіння напруги U .

Об'єднуючою ланкою комплексної системи передачі теплових потоків є система управління взаємопов'язаними розподіленими об'єктами як складова термоелектричної системи забезпечення теплових режимів. У загальному випадку така система має забезпечити рух виходу системи до певного значення, незважаючи на впливові збурення. Для побудови багатовимірного регулятора зазвичай використовують два принципи: принцип поділу та принцип внутрішніх моделей [10]. Принцип поділу ґрунтується на тому, що багатовимірний регулятор складається з регулятора стану і спостерігача стану, причому обидві частини синтезуються незалежно. Регулятор стану обчислює процес управління, використовуючи вектор стану системи, спостерігач оцінює недоступний для вимірювань вектор стану за вимірними значеннями входу і виходу системи. Принцип внутрішніх моделей використовується для введення завдання і фільтрації збурень за методом інверсної компенсації.

Під час розроблення багатовимірних систем використовують також загальносистемний принцип – принцип крихкості, який дає змогу сформулювати вимоги створюваної системи управління. Принцип крихкості свідчить про те, що чим якісніші перехідні процеси має забезпечити створюваний регулятор, тим точніше має бути відома вихідна модель. З огляду на можливі відхилення виходу системи за неконтрольованих зовнішніх впливів значна увага приділяється принципу робастності, тобто здатності зберігати стійкість за незначних відхилень від стабільного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Borshchev N., Belyavskiy A., Antonov V. “Analysis of the systems for thermal modes of domestic spacecrafts”. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2022; 7: 1–19. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-7-2193>.
2. Cai Y., Wang Y., Liu D., Zhao F.-Y. “Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: updated review on the parametric investigations and model developments”. *Appl. Therm. Eng.* 2019; 148: 238–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.014>.
3. 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>.
4. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. “Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices”. *Chem. Rev.* 2020; 120: 7399–7515. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00026>.
5. Tang J., Ni H., Peng R.-L., Wang N., Zuo L. J. J. “A review on energy conversion using hybrid photovoltaic and thermoelectric systems”. *Journal of Power Sources*. 2023; 562: 232785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232785>.
6. Praful S., Prajwal Rao V., Vijeth, V., Bhagavath Skanda V., Seetharamu K N., Narasimha Rao R. “On the operating temperature of heat pipes”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1473 (1): 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012025>. ISSN 1742-6588.
7. Kim K. M., Bang I. C. “Effective energy management design of spent fuel dry storage based on hybrid control rod-heat pipe”. *International Journal of Energy Research*. 2020; 45 (2): 2160–2176. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5910>.

8. Carlson F., Davidson J. H. “On the use of thermal energy storage for flexible baseload power plants: Thermodynamic analysis of options for a nuclear Rankin cycle”. *J. Heat Transfer*. 2020; 142 (5): 052904. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4045230>.

9. 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>.

10. 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>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.11>

UDC 004.49

Complex systems for controlling thermal modes of radio-electronic equipment

Vladimir P. Zaykov¹⁾

PhD, Senior Researcher

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4078-3519>; gradan@i.ua. Scopus Author ID: 57192640250

Vladimir I. Mescheryakov²⁾

Dr. Sc., Professor, Department of Information Technology

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0499-827X>; meshcheryakovvi48@gmail.com, Scopus Author ID: 57192640885

Andriy S. Ustenko²⁾

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 Zmiienskij Str, Odesa, 65082, Ukraine

ABSTRACT

The system of providing thermal conditions of radio-electronic equipment, which is a necessary subsystem of such modern information systems as on-board mobile objects with high requirements to reliability, dynamics and controllability, is analyzed. A solid-state method of cooling energy generation based on the Peltier effect is highlighted, which has such advantages as the possibility of creating a temperature below ambient, small dimensions, mass and increased reliability compared to similar coolers of other physical principles. It is shown that in distributed systems with heat-loaded elements the function of transporting heat flows is necessary, and the most promising for the solved problems is realized on flexible heat pipes, which agree with thermoelectric coolers in terms of reliability, mass and dimensional characteristics. The method of reducing the mass and dimensional characteristics of systems for providing thermal modes with impulse heat generation, typical for tracking systems or on-board systems, is considered. It is noted that the heat of phase transition of melting substances allows to form thermal accumulators, which, when coordinated with the dynamic characteristics of thermal processes of the system, allows to significantly reduce the mass and dimensional characteristics of the system for providing thermal modes. The use of thermal accumulators in systems with pulse-periodic influence allows to increase also reliability indicators due to filtration of high-frequency thermal emissions in heat-loaded elements. The expediency of the system approach to the design of the thermoelectric system for ensuring thermal modes of electronic equipment with heat pipes and thermal accumulators by synthesizing a multidimensional regulator type “Multiple Input - Multiple Output” (MIMO) is substantiated. It is substantiated that to satisfy the basic principles of multidimensional systems of fragility and robustness it is necessary to satisfy the condition of creation of a qualitative model of the thermoelectric system of provision of thermal modes of heat-loaded electronic equipment.

Keywords: Thermoelectric coolers; heat pipes; thermal accumulators; reliability; mass-dimensional characteristics; multidimensional controller