

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.18>

УДК 004.49

Системи забезпечення теплових режимів як складова частина інформаційних систем

Мещеряков Володимир Іванович¹⁾

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

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

Журавльов Юрій Іванович²⁾

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

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

Устенко Андрій Сергієвич¹⁾

Аспірант каф. Інформаційних технологій

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

¹⁾ Національний університет ім. І. І. Мечникова. Одеса, Україна

²⁾ Національний університет “Одеська морська академія”. Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглянуто передумови створення системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури як необхідної складової частини сучасних інформаційних систем, особливо бортових. Виділення джоулево тепла є природним супроводом процесу переробки інформації напівпровідниковими елементами. За умови перевищення температури ядра вище допустимої система стає недієздатною і примусове відведення тепла є обов'язковою функцією інформаційної системи. Побудова математичної моделі системи обробки інформації, яке включає структурну і параметричну ідентифікацію, спрямовану на підвищення показників надійності і динаміки, є актуальним завданням. Показано, що первинними умовами побудови математичної моделі є інформація про характер розподілу теплового потоку в ядрі, найважливішим параметром якої є середня температура теплового ядра системи. Вона визначає той мінімум теплової енергії, яку потрібно відібрати для того, щоб система могла досягти номінальних теплових режимів апаратури. Моделі нагрітої зони в найпростішому випадку розглядаються як ізотермічні із середньою температурою, що прийнятно тільки для виробів з однорідною структурою. При нестационарних процесах утворюються анізотропні нагріті зони, які описуються відповідними неоднорідними рівняннями в часткових похідних, рішення яких представляє значні складності. При заданих обмеженнях на параметри алгоритм синтезу електронної апаратури за допустимою температурою може бути отриманий на основі вирішення зворотної задачі теплопровідності. Сучасний математичний апарат не дозволяє отримати аналітичне рішення інтегрального рівняння зворотної задачі теплопровідності при довільному законі зміни допустимої температури по об'єму електронного блоку. Показано, що одним із можливих варіантів вирішення задачі зниження нерівномірності тепловиділення в контрольованому обсязі є забезпечення теплонавантажених елементів стоками відповідної площі, які розсіюють тепло, наближаючи їх поверхневу температуру до середньооб'ємної. Однак, введення стоків впливає на збільшення масових і габаритних характеристик радіоелектронних систем, що особливо критично для бортової апаратури. Вимоги до показників надійності бортової апаратури постійно зростають одночасно з підвищенням питомої щільності виділення тепла елементами системи і зменшенням масогабаритних параметрів, що знаходиться у взаємній суперечності і становить наукову та прикладну проблему. На підставі наведеного аналізу показано: середньооб'ємна температура може служити опорним базисом для систем забезпечення теплових режимів з досить рівномірним розташуванням джерел і низькою просторовою анізотропією теплопровідності; для систем з теплонавантаженими елементами, що різко відрізняються від фонового температурного поля, та обмеженнями за масогабаритними характеристиками проаналізовані підходи є неприйнятними.

Ключові слова: математична модель; електронна апаратура; інформаційна система; теплообмін; температура; теплонавантажені елементи

Вступ. Під інформаційною системою розуміємо сукупність взаємопов'язаних апаратно-програмних засобів для автоматизації та обробки інформації, спрямовану на створення та застосування систем збору, передачі, обробки, зберігання та накопичення інформації.

Загальну структуру інформаційної системи зазвичай розглядають як об'єднання підсистем, що забезпечують:

- інформаційне забезпечення, як єдність системи класифікації, кодування інформації, схем інформаційних потоків, методології побудови баз даних;
- технічне забезпечення, як комплекс технічних засобів, відповідна документація та технологічні процеси;
- програмне забезпечення, як поєднання програм регулярного застосування, необхідних для вирішення функціональних завдань;

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

- математичне забезпечення, як суму математичних методів, моделей і алгоритмів обробки інформації;
- лінгвістичне забезпечення, як групу мовних засобів, що використовуються в системі;
- організаційне забезпечення, як цілісність кадрового, ергономічного, правового забезпечення, що регламентують процеси створення та функціонування як системи, так і персоналу.

Основна частина. Незалежно від типу інформаційної системи, необхідною функцією є відведення надлишкового тепла, оскільки перетворення інформації супроводжується виділенням джоулевого тепла. Це проявляється при створенні DATA-центрів, які споживають велику кількість енергії для своєї роботи і потребують охолодження для забезпечення оптимальної продуктивності.

Особливістю експлуатації сучасних електронних систем є необхідність відведення надлишків теплової енергії, яка є обов'язковою складовою функції перетворення інформації. Наявність таких теплонавантажених елементів, як напівпровідникові лазери, ультразвукові та локаційні випромінювачі, силові перетворювачі та процесорні компоненти інформаційних систем, призводить до необхідності відбору тепла від об'єктів з високою щільністю енергії. Виникає необхідність у забезпеченні теплових режимів як самої апаратури, так і локальних теплонавантажених елементів, температура яких істотно відрізняється від середньої температури апаратури.

З огляду на різноманітність геометрії електронних компонентів, щільності їх розподілу, відмінності тепловиділення або поглинання тепла за основу береться середня поверхнева або об'ємна температура нагрітої зони для всіх елементів. Очевидно, що при повністю рівномірному об'ємному тепловиділенні апаратури середня температура є інформативною ознакою даного простору, а кількість енергії, необхідна для скидання надлишкового тепла до заданої температури, мінімальна.

У сучасних засобах обробки даних 30–90% споживаної енергії перетворюється на нагрівання як самої елементної бази, так і навколишнього середовища [1]. При цьому необхідно враховувати, що надійність напівпровідникових виробів залежить від температури, оскільки нестійкість системи відповідно до закону Арреніуса збільшується приблизно в 2 рази при зростанні температури на кожні 10°C . При підвищенні температури від 20°C до 80°C інтенсивність відмов зростає у: випрямних приладів в 1,5–2 рази; резисторів в 2–3 рази; напівпровідників в 3–4 рази; мікросхем в 6–10 разів. Відмови апаратури, викликані відхиленням температури від допустимих значень, становлять майже 80% від усіх відмов і призводять до зниження ресурсу апаратури та різних функціональних порушень.

При досягненні деяких критичних значень (для кремнієвих електронних компонентів приблизно 85°C) працездатність виробів можлива тільки за умови примусового охолодження апаратури. З огляду на скінченність електричного опору, наявність перехідних процесів при перемиканнях елементів проблема теплової надійності електронної апаратури є фундаментальною. Підвищення щільності монтажу електронних компонентів, зниження їх габаритів і концентрація енергії, що виділяється або поглинається критичними елементами, лише поглиблюють цю проблему.

Системи забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури покликані знизити температуру компонентів до рівня прийнятної надійності функціонування елементів.

Системи охолодження поділяються на повітряні, рідинні, кондукторні та комбіновані, а їх використання залежить від необхідної щільності теплового потоку, який слід відвести від теплонавантаженого об'єкта [1]: до 10 Вт/м^2 – природне повітряне охолодження; до 1000 Вт/м^2 – повітряне примусове охолодження; до 50000 Вт/м^2 – рідинне охолодження; більше 50000 Вт/м^2 – випарні системи охолодження.

Більшість радіоелектронних систем має повітряне охолодження внаслідок простоти реалізації, проте інтенсивність теплопередачі при природному охолодженні вкрай невисока.

В основу класифікації систем охолодження покладено фізичний стан холодоагенту, що акумулює тепло. За цією ознакою розрізняють: повітряні природні та примусові (газові), рідинні, випарні, кондуктивні (твердотільні) та комбіновані системи охолодження.

Таким чином, забезпечення теплових режимів електронних пристроїв є необхідною, але не єдиною умовою надійного функціонування інформаційних систем. Оскільки електронні компоненти при перетворенні інформації виділяють значну частку тепла, проблема є фундаментальною. Основним способом забезпечення теплового режиму є створення теплової рівноваги, тобто забезпечення балансу кількості енергії, що виділяється або поглинається елементами і розсіюється в навколишнє середовище. В силу принципу каузальності ідеальний баланс в динамічній системі неможливий, оскільки охолодження завжди є наслідком впливу на теплове поле теплонавантаженого елемента, появу якого складно передбачити, а вимірювання і формування реакції пов'язане з кінцевим часом.

Побудова теплової моделі таких складних об'єктів, як радіоелектронні системи обробки інформації, є нетривіальним завданням, що включає структурну (якісну) і параметричну (кількісну) ідентифікацію. Якісна ідентифікація передбачає вибір способу опису системи, яка приводиться у відповідність до теплових процесів досліджуваного об'єкта. Кількісна ідентифікація полягає у визначенні параметрів моделі, яка забезпечує кореляцію теоретичних і експериментальних результатів.

Завдання ідентифікації відносяться до класу обернених, математично некоректних і найчастіше нестійких. Для вирішення обернених завдань використовують методи регуляризації, які дозволяють за певних умов отримувати стійкі рішення. Математичні моделі теплових процесів часто нелінійні, тому застосовуються методи ітераційної регуляризації за квадратичним функціоналом температури, засновані на теорії оптимізації та градієнтних методах. Ітераційна регуляризація проводиться на основі варіаційного методу Тихонова, який може бути використаний в приватних нелінійних випадках, однак він не має єдиного підходу до визначення параметра регуляризації. Математичні моделі, що описують фізичну систему в диференціальних рівняннях в часткових похідних, являють собою функції теплофізичних процесів, розподілу потенціалу всередині системи, похідні за часом і координатами. Аналітичне рішення моделей таких систем можливе тільки для окремих випадків, а основним методом рішення є ітераційні методи з усіма властивими їм обмеженнями, одним з яких є нестійкість рішення.

З точки зору теплообміну електронна система з теплонавантаженими елементами являє собою трикомпонентну структуру, що включає ядро з радіоелектронними компонентами, систему відбору надлишку теплового потоку і систему взаємодії із зовнішнім середовищем. Система взаємодії із зовнішнім середовищем являє собою поверхню, яка або конвекцією в повітряному або рідинному середовищі, або радіаційним випромінюванням передає енергію в навколишній простір. Проміжний тепловідвід здійснює відбір тепла безпосередньо від електронних плат і таких теплонавантажених елементів, як лазерні та ультразвукові випромінювачі, приймачі інфрачервоного випромінювання, силові комутатори на систему взаємодії із зовнішнім середовищем.

Найважливішим параметром цієї проміжної системи є середня температура теплового ядра системи. Вона визначає той мінімум теплової енергії, який потрібно відібрати для того, щоб система могла досягти номінальних теплових режимів апаратури. Типовим представником систем проміжного тепловідведення є рідинна схема, в якій відбір теплового потоку здійснюється перекачуванням фреону на зовнішню поверхню виробу, що взаємодіє із зовнішнім середовищем відповідно до закону Фур'є під дією різниці температур. Математично задача визначення температурного поля в проміжному тепловідводі відома для різних випадків формалізації граничних умов. Тривимірність задачі і змішані граничні умови призводять до необхідності розробки розрахунку в елементах конструкції виробу.

Застосування проміжного тепловідводу дозволяє істотно знизити теплове навантаження на критичних елементах при незначному зниженні наявного температурного напору.

Моделі нагрітої зони в найпростішому варіанті розглядаються як ізотермічні із середньою температурою, що прийнятно тільки для виробів з однорідною структурою, наприклад блоків пам'яті. При нестационарних процесах утворюються анізотропні нагріті зони, які описуються відповідними неоднорідними рівняннями в часткових похідних. Розглянуто вплив теплових взаємозв'язків між елементами і платами радіоелектронної апаратури, що дозволяє застосувати до нагрітої зони поняття квазіоднорідного тіла з ефективною провідністю по координатах.

Основною складністю створення моделі температурного поля є змінна інтенсивність локального теплообміну по поверхні об'єкта при вільній конвекції, вимушеній конвекції, радіаційному теплообміні. На ефективність теплового обміну впливають підбір конструктивних матеріалів з необхідними властивостями, ребра радіаторів, перемішування теплоносія і швидкість рідини при теплообміні, вплив мікронерівностей теплообмінників і конструктивні особливості системи.

Представлено результати з оптимізованого проектування конкретної радіоелектронної апаратури з повітряним охолодженням та отримано наступні якісні результати і рекомендації:

- правильна орієнтація блоку відносно напрямку руху повітря дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 11 %;
- оптимальне розміщення плат в межах кожного каналу дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 13-19 %;
- оптимальний розподіл повітря між каналами дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 12 %;
- послідовний продув плат по відношенню до паралельного дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 12 %;
- часткова оптимізація розміщення елементів і розподіл повітря в блоці дозволяє знизити інтенсивність відмов на 25-30 %, а повна оптимізація – на 45 %.

На якість функціонування системи забезпечення теплових режимів впливають обсяг розсіювання тепла V_i , розсіювана потужність W_i , допустима температура на поверхні елемента і допустима температура навколишнього середовища, рекомендовані коефіцієнти навантаження по потужності K_i , показники надійності, S_i – площа теплообміну. При цьому в якості критерію запропоновано використовувати комплекс для найбільш теплонавантаженого елемента, що сприяє встановленню за заданим обсягом і енергетикою тепловиділення вимог досягнення заданого рівня надійності функціонування. Спроба емпіричного пошуку прийнятного варіанту конструкцій стає невиправданою.

З огляду на різноманітність геометрії електронних компонентів, щільності їх розподілу, відмінності тепловиділення або поглинання тепла за основу береться середня поверхнева або об'ємна температура нагрітої зони для всіх елементів [2]. Очевидно, що при повністю рівномірному об'ємному тепловиділенні радіоелектронної апаратури середня температура є інформативною ознакою даного простору, а кількість енергії, яка необхідна для скидання надлишкового тепла до заданої температури, мінімальна.

Математична модель складної системи являє собою тришарову структуру, що включає нагріту зону, ізоляційну зону і оболонку, яка дозволила створити аналітичний апарат для розрахунку середніх поверхневих температур [3]. Поверхня нагрітої зони і кожух розглядаються як ізометричні поверхні із середньою поверхневою температурою t_k і t_s , проте модель не дозволяє досліджувати об'ємне температурне поле нагрітої зони, характерне для сучасної мікроелементної бази. Теплопровідні властивості елементарної комірки і системи в цілому можуть змінюватися в трьох основних напрямках осей симетрії системи λ_x λ_y λ_z ,

тобто отримане тіло слід розглядати як анізотропне за теплопровідністю вздовж головних осей симетрії.

Якщо система призначена для тривалого функціонування, то температура в нагрітій зоні обмежена за рахунок стоків з питомою потужністю $Q(x, y, z, \vartheta, \tau)$ з нагрітої зони з питомою потужністю $Q_s(s, \vartheta, \tau)$.

Якщо має місце тотожність, то в усталеному режимі

$$W \equiv Q \text{ при } 0 < \tau \leq \infty,$$

отримаємо повністю збалансовану (ідеальну з точки зору теплообміну) систему, в якій перегрів і викликане ним зниження показників надійності буде виключено [3]. Якщо вираз виконується після виходу на усталений режим через час $\tau_{уст}$ після включення апаратури

$$W > Q; \quad 0 < \tau \leq \tau_{уст}; \quad W \equiv Q; \quad \tau_{уст} < \tau < \infty,$$

то елементи нагрітої зони накопичують певну частину теплової енергії, що представляється інтегралом

$$\Delta T = \int_0^\tau \int_0^V (W - Q) dV d\tau,$$

що викликає зміну температури в різних точках апарату. Системи, в яких виконуються наведені умови, є стійкими з точки зору теплообміну і здатні до тривалого і багаторазового функціонування. Така постановка задачі дозволяє при синтезі системи розглядати систему, що складається з радіоелектронної системи і системи забезпечення її теплових режимів.

Диференціальне рівняння теплопровідності для квазіоднорідного анізотропного твердого тіла з джерелами W і об'ємними Q , і поверхневими Q_s стоками теплової енергії, граничні та початкові умови запишуться в наступному вигляді [3]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad} Q] + \frac{W}{c\gamma} - \frac{Q}{c\gamma}, \quad -\lambda \frac{\partial Q}{\partial n} \Big|_s = Q_s,$$

$$Q(x, y, z, 0) = 0, \quad Q(x, y, z, \tau) = t(x, y, z, \tau) - t_c$$

де $c(x, y, z)$ – питома теплоємність, Дж/м град; $\gamma(x, y, z)$ – щільність, кг/м³; n – напрямок нормалі до поверхні нагрітої зони; t – температура навколишнього середовища, °С.

При цьому передбачається, що теплофізичні коефіцієнти c , λ , γ в діапазоні робочих температур напівпровідників практично не залежать від температури, а залежності λ від координат анізотропні вздовж основних осей X , Y , Z і нормальні до поверхонь граней нагрітої зони. З обмежень

$$Q(x, y, z, \Theta, \tau) = Q_0 + q_0 \Theta; \quad Q_s = K \Theta,$$

де q_0 – об'ємний температурний коефіцієнт потужності або теплообміну, K – коефіцієнт теплообміну через щілину від нагрітої зони до кожуха, з яких випливає, що об'ємні стоки тепла Q розподілені рівномірно по всьому об'єму зони нагріву, а поверхневі стоки по поверхні лінійно зростають із зростанням температури елементів і поверхні нагрітої зони.

Розподіл виділення і скидання тепла в моделі представлені у вигляді [3]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\lambda_x \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} \right] + \frac{W(x, y, z)}{c\gamma} - Q_0(x, y, z) - \frac{q_v \Theta}{c\gamma},$$

а відведення тепла здійснюється або з поверхні кожуха, або безпосередньо з поверхні нагрітої зони шляхом природної конвекції, вимушеної конвекції газу або рідини та іншими поверхневими системами охолодження. Розв'язання цього рівняння для довільного закону зміни температури представляє серйозні математичні труднощі і зводиться до розв'язання некоректних багатовимірних задач теплопровідності. Воно можливе тільки для деяких

окремих випадків, наприклад, при відсутності поверхневих стоків енергії і рівномірному розподілі джерел і залежних від температури об'ємних стоків енергії: $Q_s = 0$, $k_x = k_y = k_z = 0$, $W(x, y, z) \equiv W_0$, $Q_0(x, y, z) = 0$. Практична реалізація відповідає випадку, коли нагріті зони інтенсивно охолоджуються шляхом рівномірного продування повітря або прогону рідини так, що конвективним відведенням тепла через кожух апарату можна знехтувати.

Для вирішення загальної задачі синтезу апаратури із заданим тепловим режимом необхідно задати допустимі межі зміни параметрів синтезу, тобто обмеження на кожен параметр. Це призводить до необхідності вирішення прямих задач теплопровідності. При заданих обмеженнях на параметри алгоритм теплофізичного синтезу РЕА за допустимою температурою може бути отриманий на основі вирішення зворотної задачі теплопровідності. Сучасний математичний апарат не дозволяє отримати аналітичне рішення інтегрального рівняння зворотної задачі теплопровідності при довільному законі зміни допустимої температури по об'єму РЕА [4].

Для стаціонарного режиму запропоновано методику проектування за середньою температурою [5]. Вона включає: визначення поверхневої температури нагрітої зони, завдання необхідної просторово-часової зміни температурного поля, граничних обмежень на кожен параметр, розрахунок кількісних значень параметрів синтезу, які забезпечать необхідну просторово-часову зміну температурного поля.

Відхилення від рівномірного розподілу теплових джерел всередині аналізованого обсягу призводить до необхідності збільшення енергії охолодження, оскільки для досягнення температури перевантажених елементів потрібно більше енергії. Чим більше максимальна температура теплонавантаженого елемента відрізняється від середньооб'ємної, тим значніша різниця між оптимізованим (рівномірний розподіл) варіантом і реальним. Перевищення температури теплонавантажених елементів вище середньооб'ємної призводить до погіршення показників надійності щодо номінальних показників елементів і, як наслідок, всієї інформаційної системи в цілому [5].

Одним з можливих варіантів вирішення завдання зниження нерівномірності тепловиділення в контрольованому обсязі є забезпечення теплонавантажених елементів радіаторами відповідної площі, які розсіюють тепло, наближаючи їх поверхневу температуру до середньооб'ємної [6]. Однак, введення радіаторів впливає на збільшення масових і габаритних характеристик радіоелектронних систем, що особливо критично для бортової апаратури. Вимоги до показників надійності бортової апаратури постійно зростають одночасно з підвищенням питомої щільності виділення тепла елементами системи і зменшенням масогабаритних параметрів, що знаходиться у взаємній суперечності і становить наукову та прикладну проблему.

Перешкодою зменшення габаритів і підвищення надійності системи є значною мірою забезпечення необхідного теплового режиму [7], що залежить від теплових характеристик елементів, конструктивного розподілу елементної бази, системи забезпечення теплового режиму. З огляду на низьку теплопровідність повітря, при виборі системи забезпечення теплових режимів більш достовірну первинну інформацію дають температури корпусів елементів, а не середня температура середовища контрольованого обсягу.

Вирівнювання теплопровідності нагрітої зони можливе за рахунок застосування високо теплопровідних наповнювачів, при якому зона стає ізотропною за теплопровідністю: $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_{max}$, тобто буде задовольняти мінімізації параметра анізотропності $F_{a\lambda} = 1$. Близький до цього ефект отримується при використанні металевих теплостоків в планарних структурах, при яких також має місце анізотропія за теплопровідністю: $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_{max} \neq \lambda_z$, а $F_{a\lambda} \approx 1$.

При введенні об'ємних температурозалежних стоків, потужність яких істотно перевищує потужність поверхневих стоків, алгоритм синтезу за максимальною стаціонарною температурою виражається рівнянням зв'язку, яке має вигляд [6]:

$$F_Q \leq 1 \quad F_Q = \frac{P_0}{Vq_v},$$

де P_0 – сумарна потужність джерел тепла; V – об'єм нагрітої зони; q_v – об'ємний температурний коефіцієнт потужності або для рідинних і газових систем охолодження об'ємний коефіцієнт теплообміну. Для отримання оптимальних конструкцій теплонавантаженої радіоелектронної апаратури, які дозволяють використовувати в схемах елементи з максимальною споживаною потужністю при заданому максимальному перегріванні, необхідно мінімізувати параметри синтезу F_J в межах обмежень, накладених на кожен параметр технічним завданням на розробку апаратури.

Найважливішою умовою застосування систем забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури є експлуатаційні характеристики: маса, габарити, вібраційні, ударні, температурні, вологісні, динамічні та надійність. Цим умовам найбільше відповідають термоелектричні системи забезпечення теплових режимів, які перевершують інші за всіма показниками, крім холодопродуктивності.

Висновки

1. Середньооб'ємна температура може служити опорним базисом для систем забезпечення теплових режимів з досить рівномірним розташуванням джерел і низькою просторовою анізотропією теплопровідності

2. Для систем з теплонавантаженими елементами, що різко відрізняються від фонового температурного поля, та обмеженнями за масогабаритними характеристиками проаналізовані підходи є неприйнятними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lv Y.-G., Wang Y.-T., Meng T., Wang Q.-W., Chu W.-X. “Review on thermal management technologies for electronics in spacecraft environment”. *Energy Storage and Saving*. 2024; 3 (3): 153–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.03.001>.
2. Tang H., Ni R.-L. Peng N. Wang N., Zuo L. “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>.
3. Rezk K., Abdelrahman M. A., Attia A. A. A., Emam M. “Thermal control of temperature-sensitive electronic components using a vapor chamber integrated with a straight fins heat sink: An experimental investigation”. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 217 (25): 119147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119147>.
4. Cai Y., Hong B.-H., Wu W.-X., Wang W.-W., Zhao F.-Y. “Active cooling performance of a PCM-based thermoelectric device: Dynamic characteristics and parametric investigations”. *Energy*. 2022; 254: 124356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124356>.
5. 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>.
6. Zaikov V. P., Mescheryakov V. I., Zhuravlev Yu. “Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices”. Book 3. Methods of Reliability Improvement. Odesa: Ukraine. *Polytechperiodica*. 2018.
7. Zaikov V. P., Mescheryakov V. I., Zhuravlev Yu. “Analysis of reliability improvement possibilities of thermoelectric cooling devices”. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015; 4 (8(76)): 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46553>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.18>

UDC 004.49

Thermal regime support systems as a component of information systems

Vladimir I. Meshcheryakov¹⁾

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

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

Yurii I. Zhuravlov²⁾

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

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

Andrii S. Ustenko¹⁾

Graduate Student of the Department of Information Technologies

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

¹⁾ Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

²⁾ National University “Odesa Maritime Academy”. Odesa, Ukraine

ABSTRACT

The prerequisites for creating a system for providing thermal modes of electronic equipment as a necessary component of modern information systems, especially on-board ones, are considered. The release of joule heat is a natural accompaniment to the process of information processing by semiconductor elements. If the core temperature exceeds the permissible limit, the system becomes incapacitated and forced heat removal is an obligatory function of the information system. Building a mathematical model of an information processing system is not a trivial task, including structural and parametric identification aimed at improving reliability and dynamics, it is an urgent task. It is shown that the primary conditions for constructing a mathematical model are information about the nature of the distribution of heat flux in the core, the most important parameter of which is the average temperature of the thermal core of the system. It determines the minimum thermal energy that needs to be selected in order for the system to achieve the nominal thermal conditions of the equipment. Models of the heated zone in the simplest case are considered as isothermal with an average temperature, which is acceptable only for products with a uniform structure. In non-stationary processes, anisotropic heated zones are formed, which are described by corresponding heterogeneous equations in partial derivatives, the solution of which presents significant difficulties. With restrictions given on the parameters, the algorithm for the synthesis of electronic equipment according to the permissible temperature can be obtained based on the solution of the inverse problem of thermal conductivity. The modern mathematical apparatus does not allow us to obtain an analytical solution of the integral equation of the inverse problem of thermal conductivity with an arbitrary law of change in the permissible temperature over the volume of the electronic block. It is shown that one of the possible solutions to the problem of reducing the non-uniformity of heat release in the controlled volume is to provide the heat-loaded elements with drains of the corresponding area, which dissipate heat, bringing their surface temperature closer to the volume average. However, the introduction of wastewater affects the increase in the mass and overall characteristics of electronic systems, which is especially critical for on-board equipment. Requirements to reliability indices of on-board equipment are constantly increasing simultaneously with increase of specific density of heat release by system elements and decrease of weight and dimensions parameters, which is in mutual contradiction and represents scientific and applied problems. Based on the above analysis, it is shown: the average volumetric temperature can serve as a reference basis for systems for ensuring thermal regimes with a fairly uniform arrangement of sources and low spatial anisotropy of thermal conductivity; for systems with heat-loaded elements that differ sharply from the background temperature field, and limitations on weight and size characteristics, the analyzed approaches are unacceptable.

Keywords: mathematical model; electronic equipment; information system; heat exchange; temperature; heat-loaded elements