

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

«На правах рукопису»
УДК 536,2

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Дарія САВЧЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)
“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

Освітньо – наукова/професійна програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

на тему: Дослідження проблеми тепловідводу пристроїв інформаційної електроніки

Виконав: студент другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи ОФ-41мп
(шифр групи)

Чирка Юрій Володимирович

_____ (ПІБ)

_____ (підпис)

Науковий керівник ст. викладач ЗФ та МФП, д.ф. Майкут Сергій Олексійович

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, , ПІБ)

_____ (підпис)

Рецензент ст. викладач ЕП та С, доцент Сидоренко Сергій Борисович

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ фізико-математичний _____

(повна назва)

Кафедра _____ загальної фізики та моделювання фізичних процесів _____

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність _____ 104 – фізика та астрономія _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дарія САВЧЕНКО

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Чирці Юрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження проблеми тепловідводу пристроїв інформаційної електроніки

Науковий керівник дисертації _____ ст. викладач ЗФ та МФП, д.ф. Майкут Сергій Олексійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «01» вересня 20 25р. № 484 З-с

2. Строк подання студентом дисертації _____ 24.11.2025 _____

3. Об'єкт дослідження Пристрій інформаційної електроніки – бездротовий роутер

4. Предмет дослідження Теплові процеси в конструкції роутера та ефективність різних способів відведення тепла.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести огляд паспортних даних моделей та систематизувати розглянуті дані.

2. Здійснити моделювання охолодження роутера методами пасивного та кативного охолодження та комбінованим методом.

3. Провести порівняльний аналіз результатів моделювання для різних методів.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Зображення результатів моделювання в програмному середовищі COMSOL Multiphysics

Фотографії обраної моделі роутера для дослідження

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Чирка Ю.В., Майкут С.О., «Дослідження проблеми тепловідводу пристроїв інформаційної електроніки» Збірник наукових праць «І науково-практична конференція магістрантів ФМФ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів)» 2025 р. 28-32 сс. М. Київ.

а. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

б. Дата видачі завдання 01.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	01.09.2025	
2	Ознайомлення з місцем роботи	01.09.2025	
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	12.09.2025	
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	26.09.2025	
5	Наукові дослідження за темою магістерської дисертації (МД)	10.10.2025	
6	Аналіз отриманих результатів	17.10.2025	
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних за темою МД	22.11.2025	
8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	23.11.2025	
9	Надання роботи на перевірку керівнику	24.11.2025	

	МД		
10	Перевірка МД на плагіат	01.12.2025	
11	Отримання відгуку від керівника МД	03.12.2025	
12	Попередній захист МД	08.12.2025	
13	Формування плану публікацій за темою МД або документів по впровадженню (подання проекту впровадження в КПІ ім. Ігоря Сікорського)	10.12.2025	
14	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	10.12.2025	
15	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	11.12.2025	
16	Подання МД на рецензію	17.12.2025	
17	Відправка матеріалів МД у бібліотеку КПІ ім. Ігоря Сікорського та сайт кафедри ЗФ та МФП	17.12.2025	
18	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедру ЗФ та МФП	19.12.2025	
19	Відправка анотації МД на сайт кафедри ЗФ та МФП	19.12.2025	
20	Остаточний захист МД	22.12.2025	

Студент

_____ (підпис)

Чирка Ю.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

Майкут С.О.

(ініціали, прізвище)

Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Зростання продуктивності та мініатюризація пристроїв інформаційної електроніки супроводжується підвищенням теплових навантажень на їхні компоненти. Неefективний тепловідвід призводить до перегріву, що зменшує надійність, скорочує термін служби обладнання та може стати причиною його виходу з ладу. Особливо це актуально для компактних пристроїв, таких як бездротові маршрутизатори, що працюють безперервно та часто в умовах обмеженої вентиляції. Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері теплопередачі, проблема розробки ефективних, компактних та енергоощадних рішень охолодження для мережевих пристроїв залишається недостатньо вивченою, що й обумовлює доцільність проведення даної роботи.

Додатково слід відзначити, що сучасні тенденції розвитку інформаційно-комунікаційних технологій вимагають від мережевого обладнання не лише високої пропускнуої здатності та стабільності роботи, але й здатності функціонувати у широкому діапазоні температурних умов – від офісних приміщень до технічних шаф і промислових об'єктів. У таких середовищах навіть незначне підвищення внутрішньої температури може прискорити деградацію компонентів, зокрема електролітичних конденсаторів, мікросхем пам'яті та високочастотних модулів, що у підсумку негативно позначається на якості сервісу та безперервності зв'язку. Саме тому дослідження теплових процесів у компактних мережевих пристроях та пошук оптимальних способів відведення тепла набувають не лише технічної, але й економічної значущості, оскільки їх результати прямо впливають на надійність, довговічність і конкурентоспроможність обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано в межах науково-дослідної тематики кафедри (номер державної

реєстрації 0123U109876) у рамках напряму «Оптимізація теплових режимів електронних пристроїв та розробка методів їх охолодження». Робота узгоджена з пріоритетними напрямами розвитку галузі телекомунікацій та інформаційних технологій. Особистий внесок автора полягає у проведенні комп'ютерного моделювання теплових процесів у роутері в середовищі COMSOL Multiphysics, аналізі ефективності різних варіантів охолодження та формуванні рекомендацій для практичного застосування.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є аналіз існуючих методів тепловідведення в пристроях інформаційної електроніки, моделювання температурних режимів роботи роутера з використанням програмного середовища COMSOL Multiphysics, розробка та перевірка ефективності альтернативних рішень для підвищення ефективності охолодження.

Для досягнення мети було поставлено завдання: провести аналіз конструкції та теплових характеристик обраного пристрою; визначити основні джерела тепловиділення та проблемні зони тепловідводу; виконати комп'ютерне моделювання теплових процесів з використанням COMSOL Multiphysics; розробити кілька варіантів удосконалення системи охолодження; порівняти ефективність запропонованих рішень за результатами моделювання та експерименту; надати практичні рекомендації щодо впровадження оптимального способу охолодження.

Об'єкт дослідження. Пристрій інформаційної електроніки – бездротовий роутер.

Предмет дослідження. Теплові процеси в конструкції роутера та ефективність різних способів відведення тепла.

Методи дослідження. У роботі використано: аналітичний огляд і порівняння існуючих методів охолодження; комп'ютерне моделювання в COMSOL Multiphysics з урахуванням теплопровідності, конвекції та теплового

випромінювання; експериментальні вимірювання температурних режимів; статистичний аналіз отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше для конкретної конструкції роутера виконано комплексне моделювання теплових процесів з урахуванням комбінованих механізмів теплопередачі; розроблено оптимізований метод пасивного охолодження з підвищеною ефективністю при мінімальних габаритних змінах. Отримано кількісну оцінку впливу конструктивних модифікацій на температурний режим роботи пристрою.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані рішення можуть бути використані при проектуванні нових моделей маршрутизаторів та модернізації наявних, що дозволить підвищити їхню надійність та подовжити термін служби без суттєвого збільшення енергоспоживання. Розроблена методика моделювання може бути адаптована для інших пристроїв інформаційної електроніки.

Апробація результатів дисертації. Робота пройшла апробацію в межах I науково-практична конференція магістрантів ФМФ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів), 2025 р.

Публікації.

1. Чирка Ю.В., Майкут С.О., «Дослідження проблеми тепловідводу пристроїв інформаційної електроніки» Збірник наукових праць «I науково-практична конференція магістрантів ФМФ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів)» 2025 р. 28-32 сс. М. Київ.

Ключові слова: теповідвід, роутер, охолодження, comsol multiphysics, теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання, електронні пристрої, пасивне охолодження, теплотехнічне моделювання.

В роботі наведено: використаної літератури – 50, сторінок - 65, рисунків - 3, таблиць - 21.

ABSTRACT

Actuality of theme The increase in productivity and miniaturization of information electronics devices is accompanied by an increase in thermal loads on their components. Inefficient heat dissipation leads to overheating, which reduces reliability, shortens the service life of the equipment and can cause its failure. This is especially true for compact devices, such as wireless routers, which operate continuously and often in conditions of limited ventilation. Despite a significant amount of research in the field of heat transfer, the problem of developing effective, compact and energy-saving cooling solutions for network devices remains insufficiently studied, which determines the feasibility of conducting this work.

Additionally, it should be noted that modern trends in the development of information and communication technologies require network equipment not only high throughput and stability of operation, but also the ability to function in a wide range of temperature conditions - from office premises to technical cabinets and industrial facilities. In such environments, even a slight increase in internal temperature can accelerate the degradation of components, in particular electrolytic capacitors, memory chips and high-frequency modules, which ultimately negatively affects the quality of service and communication continuity. That is why the study of thermal processes in compact network devices and the search for optimal methods of heat dissipation acquire not only technical but also economic significance, since their results directly affect the reliability, durability and competitiveness of the equipment.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes The research was carried out within the framework of the research topics of the department (state registration number 0123U109876) within the framework of the direction "Optimization of thermal regimes of electronic devices and development of methods for their cooling". The work is consistent with the priority areas of development of the telecommunications and information technologies industry. The author's personal contribution consists in conducting computer modeling of thermal processes in the

router in the COMSOL Multiphysics environment, analyzing the effectiveness of various cooling options and formulating recommendations for practical application.

The object of research An information electronics device is a wireless router.

The research subject Thermal processes in the design of the router and the effectiveness of various heat dissipation methods.

Purpose of work The purpose of the work is to analyze existing heat dissipation methods in information electronics devices, simulate the temperature regimes of the router using the COMSOL Multiphysics software environment, develop and test the effectiveness of alternative solutions to increase cooling efficiency. To achieve the goal, the following tasks were set: to analyze the design and thermal characteristics of the selected device; to identify the main sources of heat generation and problem areas of heat dissipation; to perform computer simulation of thermal processes using COMSOL Multiphysics; to develop several options for improving the cooling system; to compare the effectiveness of the proposed solutions based on the results of modeling and experimentation; to provide practical recommendations for implementing the optimal cooling method.

Research methods The work used: analytical review and comparison of existing cooling methods; computer modeling in COMSOL Multiphysics taking into account thermal conductivity, convection and thermal radiation; experimental measurements of temperature regimes; statistical analysis of the obtained data.

Scientific novelty of the results For the first time, a comprehensive modeling of thermal processes was performed for a specific router design, taking into account combined heat transfer mechanisms; an optimized passive cooling method with increased efficiency with minimal overall changes was developed. A quantitative assessment of the impact of design modifications on the device's temperature regime was obtained.

The practical significance of the results Запропоновані рішення можуть бути використані при проектуванні нових моделей маршрутизаторів та модернізації

наявних, що дозволить підвищити їхню надійність та подовжити термін служби без суттєвого збільшення енергоспоживання. Розроблена методика моделювання може бути адаптована для інших пристроїв інформаційної електроніки.

Approval of the results of the thesis This work has passed approbation on «І науково-практична конференція магістрантів ФМФ» conference.

Publications

1. Чирка Ю.В., Майкут С.О., «Дослідження проблеми тепловідводу пристроїв інформаційної електроніки» Збірник наукових праць «І науково-практична конференція магістрантів ФМФ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів)» 2025 р. 28-32 сс. М. Київ.

The work contains: references - 50, pages: - 65, figures - 3, tables – 21.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВІДВОДУ В ПРИСТРОЯХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	16
1.1. Загальні відомості про пристрої інформаційної електроніки	16
1.2. Джерела тепловиділення в електронних пристроях.....	18
1.3. Фізичні процеси теплопередачі:	20
1.3.1. Теплопровідність	20
1.3.2. Конвекція	23
1.3.3. Теплове випромінювання.....	25
1.4. Вплив перегріву на роботу електронних компонентів	27
1.5. Методи та засоби охолодження електроніки (класифікація)	29
1.6. Нормативні вимоги та стандарти щодо температурного режиму роботи обладнання	35
Висновки до 1-го розділу	40
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОУТЕРА	42
2.1. Опис обраного пристрою для дослідження (технічні характеристики роутера)	42
2.2. Аналіз джерел тепловиділення в конструкції роутера.....	45
2.3. Матеріали корпусу та їх теплопровідність.....	49
2.4. Розташування основних теплогенеруючих елементів на платі	52
2.5. Вимірювання температурних режимів у штатних умовах роботи ...	56
2.6. Визначення проблемних зон тепловідводу	60
Висновки до 2-го розділу	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CFD – Computational Fluid Dynamics (чисельне моделювання течій рідини та газу)

CAD – Computer-Aided Design (система автоматизованого проектування)

COMSOL – COMSOL Multiphysics, програмний комплекс для багатофізичного моделювання

PCB – Printed Circuit Board (друкована плата)

ΔT – різниця температур

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К

Re – число Рейнольдса (критерій подібності течій рідини/газу)

Nu – число Нуссельта (безрозмірний параметр теплопередачі)

Ra – число Релея (критерій для природної конвекції)

k – коефіцієнт теплопровідності (синонім λ у термінах англомовних джерел)

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К)

P – потужність тепловиділення, Вт

t – час, с

ВСТУП

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням швидкодії та функціональної складності електронних пристроїв, що супроводжується збільшенням теплових навантажень на їхні елементи. Унаслідок цього виникає потреба у вдосконаленні методів відведення тепла для забезпечення стабільної роботи, підвищення надійності та подовження терміну експлуатації обладнання. Особливо гостро ця проблема стоїть для компактних пристроїв інформаційної електроніки, зокрема бездротових маршрутизаторів (роутерів), що працюють безперервно та часто в умовах недостатньої вентиляції.

Актуальність дослідження: обрана тема дослідження є актуальною, оскільки зниження ефективності тепловідведення призводить до перегріву критичних компонентів – процесорів, мікросхем пам'яті, модулів живлення, – що зумовлює падіння продуктивності, часті збої та навіть вихід пристрою з ладу. В умовах постійного зростання навантаження на мережеве обладнання та підвищення вимог до його енергоефективності, оптимізація систем охолодження стає важливою інженерною задачею.

Метою дослідження є аналіз існуючих методів тепловідведення в пристроях інформаційної електроніки, моделювання температурних режимів роботи роутера з використанням програмного середовища COMSOL Multiphysics, розробка та перевірка ефективності альтернативних рішень для підвищення ефективності охолодження.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі **завдання:**

- провести аналіз конструкції та теплових характеристик обраного пристрою;
- визначити основні джерела тепловиділення та проблемні зони тепловідводу;

- виконати комп'ютерне моделювання теплових процесів з використанням COMSOL Multiphysics;
- розробити кілька варіантів удосконалення системи охолодження;
- порівняти ефективність запропонованих рішень за результатами моделювання та експерименту;
- надати практичні рекомендації щодо впровадження оптимального способу охолодження.

Сучасний стан наукової проблеми свідчить, що у світовій та вітчизняній літературі широко розглядаються питання теплопередачі, моделювання теплових процесів та розробки систем охолодження для електронних пристроїв. Роботи багатьох авторів (зокрема, дослідження з теплопровідності композитних матеріалів, оптимізації форм радіаторів та використання теплових трубок) зробили значний внесок у розвиток цієї галузі. Однак, більшість досліджень стосується серверного обладнання, потужних процесорних систем або промислової електроніки, тоді як малогабаритні пристрої мережевої інфраструктури, зокрема роутери, досліджені недостатньо.

Нерозв'язаними залишаються такі проблеми: відсутність стандартизованих підходів до проектування систем пасивного охолодження для малих пристроїв; недостатня адаптація сучасних методів моделювання до специфіки конструкцій з обмеженим внутрішнім простором; неврахування комбінованих впливів конвекції, теплопровідності та теплового випромінювання у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, дана робота займає своє місце у вирішенні зазначеної задачі, оскільки спрямована на комплексний аналіз теплових режимів роботи роутера та підбір найбільш ефективних рішень охолодження на основі чисельного моделювання та практичних випробувань.

Резюме: Проведення цього дослідження є доцільним і своєчасним, оскільки його результати дозволять підвищити надійність та довговічність

мережевого обладнання, забезпечити стабільну роботу в умовах підвищених навантажень та сприятимуть розвитку методик проектування компактних та енергоефективних систем охолодження для пристроїв інформаційної електроніки.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВІДВОДУ В ПРИСТРОЯХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1. Загальні відомості про пристрої інформаційної електроніки

Пристрої інформаційної електроніки є однією з ключових складових сучасних інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечують обробку, зберігання, передавання та відображення інформації. До цієї групи належать персональні комп'ютери, сервери, мережеві маршрутизатори (роутери), комутатори, бездротові точки доступу, модеми, мультимедійні центри, а також інші засоби обчислювальної техніки та телекомунікаційного обладнання.

Основними функціональними елементами пристроїв інформаційної електроніки є:

- Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи – здійснюють обчислювальні операції та керування.
- Оперативна та постійна пам'ять – забезпечують тимчасове та довготривале зберігання даних.
- Мережеві інтерфейси – Ethernet, Wi-Fi, оптичні порти для обміну інформацією.
- Силові модулі – стабілізатори, перетворювачі напруги, джерела живлення.
- Друковані плати (PCB) – основа для монтажу електронних компонентів і комунікацій між ними.
- Системи охолодження – вентилятори, радіатори, теплові трубки та інші елементи, що відводять надлишкове тепло.

З точки зору конструкції, пристрої інформаційної електроніки відзначаються високою щільністю розміщення електронних компонентів на

обмеженій площі, що зумовлено вимогами до компактності, зниження маси та собівартості. Така компоновка призводить до концентрації зон локального перегріву, особливо в областях процесорів, мікросхем пам'яті та силових вузлів.

Енергоспоживання подібних пристроїв варіюється від одиниць до сотень ватів залежно від класу та призначення. Наприклад, побутові маршрутизатори споживають у середньому 5–15 Вт, а серверні системи – десятки або навіть сотні ватів. Незважаючи на відносно невелику потужність побутових моделей, навіть кілька ватів тепловиділення в замкненому корпусі без належного тепловідводу можуть призвести до перегріву компонентів.

Тепловий режим є одним із критичних факторів надійності та довговічності пристроїв інформаційної електроніки. Перевищення допустимих температурних меж для мікросхем (зазвичай 70–90 °С для більшості побутових пристроїв і до 105–125 °С для промислових) призводить до деградації напівпровідникових структур, зниження продуктивності та передчасного виходу з ладу.

У сучасних умовах розвитку технологій спостерігається тенденція до підвищення продуктивності при одночасному зменшенні розмірів компонентів, що призводить до зростання теплового навантаження на одиницю площі. Це вимагає застосування ефективних систем охолодження, включаючи пасивні (радіатори, теплові трубки, матеріали з високою теплопровідністю) та активні (вентилятори, мікроканальні охолоджувачі, елементи Пельтьє) засоби.

Знання особливостей конструкції, режимів роботи та умов експлуатації пристроїв інформаційної електроніки є необхідним підґрунтям для вибору оптимальних рішень щодо їх тепловідводу. Подальші підрозділи цієї роботи будуть присвячені розгляду фізичних принципів теплопередачі, аналізу існуючих способів охолодження та методів їх моделювання з використанням COMSOL Multiphysics.

1.2. Джерела тепловиділення в електронних пристроях

В електронних пристроях тепловиділення виникає внаслідок перетворення електричної енергії на теплову в елементах, що мають активний або пасивний опір, а також через неідеальність процесів перетворення енергії. Для пристроїв інформаційної електроніки (маршрутизатори, комутатори, модеми) основними джерелами тепла є:

1. Центральні обчислювальні вузли – мікропроцесори та системи-на-чипі (SoC), які працюють на високих тактових частотах і мають значну кількість активних транзисторів.
2. Пам'ять – оперативна (DRAM, SRAM) і постійна (NAND Flash), яка споживає енергію під час читання/запису.
3. Мережеві інтерфейси – комутатори Ethernet, PHY-чипи, трансивери SFP/GPON, Wi-Fi-радіомодулі.
4. Силові перетворювачі – стабілізатори напруги, DC/DC-конвертори, дроселі.
5. Пасивні елементи – резистори, індуктивності, де виділення тепла відбувається за законом Джоуля–Ленца.
6. Додаткові модулі – індикатори, драйвери портів USB, охолоджувальні вентилятори (якщо є).

Тепловиділення окремого елемента визначається:

$$P_{\text{тепл}} = U \cdot I \cdot n_{\text{втрат}}$$

де:

U – робоча напруга, В;

I – струм споживання, А;

$\eta_{\text{втрат}}$ – частка потужності, яка переходить у тепло (для цифрових схем зазвичай 0,85–0,99).

Таблиця 1.1 – Джерела тепловиділення для типового двохдіапазонного роутера

Компонент	Модель (приклад)	Напру- га живле- ння, В	Стру- м спож- иванн- я, А	Потуж- ність спожив- ання, Вт	ККД, %	Тепло виділе- ння, Вт	Макс. робоча темпера- тура, °С	Коеф. тепло- вого опору , °С/Вт
SoC (CPU+Switch)	Qualcomm IPQ4019	1,1	4,0	4,4	98	4,31	0...95	15
DRAM DDR3 (2×)	Micron MT41K256M 16	1,35	0,67	0,9	95	0,86	0...85	30
Ethernet- комутатор	Atheros AR8337	1,8	1,22	2,2	97	2,13	0...85	20
Wi-Fi модуль 2,4 ГГц	QCA9886	3,3	0,54	1,78	98	1,74	0...90	25
Wi-Fi модуль 5 ГГц	QCA9984	3,3	0,76	2,51	98	2,46	0...90	25
DC/DC перетворювач	TPS5430	5,0	0,30	1,50	88	1,32	0...125	40
NAND Flash	Winbond W25Q128JV	3,3	0,14	0,46	98	0,45	-40...85	35
Дросель силовий	Coilcraft SER1360	0,0*	—	0,40	100	0,40	-40...125	50
Резистор потужний	Yageo 2W Metal Film	0,0*	—	0,30	100	0,30	-55...155	60

Сумарно для зазначеної конфігурації $P_{\text{сум}} \approx 13,97$ Вт.

При відсутності активного охолодження у пластиковому корпусі з природною конвекцією температура ключових вузлів при 25 °С навколишнього середовища може досягати:

SoC: 78–85 °С

Wi-Fi 5 ГГц модуль: 72–78 °С

DC/DC перетворювач: 85–92 °С (локальний перегрів)

Основними джерелами тепла в інформаційних пристроях є SoC та радіомодулі (понад 60 % сумарного теплового навантаження). Силові вузли генерують до 10 % тепла, але мають локально високу температуру. Для уникнення деградації елементів необхідне забезпечення теплового опору корпусу на рівні не більше 10–12 °С/Вт.

1.3. Фізичні процеси теплопередачі:

1.3.1. Теплопровідність

Теплопровідність є фундаментальним механізмом теплопередачі, який визначає ефективність відведення тепла в електронних пристроях. Сучасні пристрої інформаційної електроніки, такі як маршрутизатори, сервери та комунікаційне обладнання, характеризуються високою щільністю розміщення елементів та збільшеним тепловим навантаженням. Це створює необхідність точного врахування теплопровідних властивостей матеріалів при розробці конструкцій охолодження.

Вибір матеріалів із високим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад міді чи алюмінію, забезпечує швидке транспортування теплової енергії від мікросхем до теплообмінних поверхонь, що зменшує локальні перегріви та продовжує термін служби компонентів. Проте через наявність у конструкції

неметалевих елементів із низькою теплопровідністю (текстоліт, полімери) часто застосовують комбіновані шляхи теплопередачі, включаючи теплопровідні інтерфейси та радіатори зі складною геометрією.

Теплопровідність – це процес передачі теплової енергії в твердому тілі за рахунок хаотичного руху атомів і електронів, без перенесення речовини в просторі. В електронних пристроях теплопровідність відіграє ключову роль у відведенні тепла від джерел (мікросхем, силових елементів) до радіаторів, корпусу або теплових трубок.

Основне рівняння теплопровідності в одномірному стаціонарному випадку описується законом Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

де:

q – густина теплового потоку, Вт/м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

$\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури, К/м.

Таблиця 1.2 – Теплопровідність матеріалів, що використовуються в тепловідводі електроніки

Матеріал	λ , Вт/(м·К) при 25 °С	Застосування
Мідь (Cu)	385–401	Радіатори, теплові трубки
Алюміній (Al)	200–237	Радіатори, корпуси
Кремній (Si)	148	Підкладка мікросхем
Кераміка Al ₂ O ₃	25–35	Підкладки, ізоляційні пластини
Епоксидний текстоліт FR4	0,25–0,35	Друковані плати
Теплопровідна паста	2–12	Поліпшення контакту мікросхема–радіатор

В електронних пристроях часто застосовують комбіновані шляхи теплопередачі – мідні шини на платі, теплові інтерфейси, металеві кожухи. При проектуванні важливо враховувати тепловий опір:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P}$$

де ΔT – різниця температур (К), P – теплова потужність (Вт).

Теплопровідність визначає початковий етап тепловідводу – передачу тепла від джерела до елементів охолодження. Метали з високим коефіцієнтом теплопровідності (мідь, алюміній) значно перевершують неметалеві матеріали, але часто вимагають комбінованого використання з керамікою та полімерними підкладками. Ефективність теплопровідності напряму впливає на тепловий опір системи, а отже – і на температуру роботи електронних компонентів. Інженерні рішення з оптимізації теплопровідних шляхів (використання теплових трубок, термопаст, металевих пластин) є критичними для компактних високопродуктивних пристроїв.

1.3.2. Конвекція

Конвекція є другим ключовим механізмом відведення тепла, що реалізується через теплообмін між твердими поверхнями та навколишнім середовищем за рахунок руху рідини або газу. Для більшості пристроїв інформаційної електроніки основним середовищем охолодження є повітря, яке може переміщуватися природним або примусовим шляхом.

У малопотужних пристроях із невеликим тепловиділенням часто достатньо природної конвекції, однак із зростанням потужності та щільності розташування компонентів застосовується примусова циркуляція повітря вентиляторами. При дуже високих теплових потоках (серверне обладнання, промислові комунікаційні вузли) використовують рідинне охолодження з набагато більшими коефіцієнтами тепловіддачі. Визначення та оптимізація коефіцієнта тепловіддачі h є одним із головних завдань інженера, адже він залежить від швидкості потоку, властивостей теплоносія, форми охолоджуваних поверхонь і температурної різниці.

Конвекція – це процес передачі тепла в рідині або газі за рахунок руху макрочастинок середовища. У випадку електронних пристроїв основним теплоносієм є повітря, яке охолоджує компоненти шляхом природної або примусової циркуляції.

Інтенсивність теплопередачі при конвекції описується рівнянням Ньютона:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

де:

Q – теплова потужність, Вт;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

A – площа теплообміну, m^2 ;

T_s – температура поверхні, $^{\circ}C$;

T_{∞} – температура навколишнього середовища, $^{\circ}C$.

Таблиця 1.3 – Типові значення коефіцієнта тепловіддачі h :

Тип охолодження	h , $Вт/(m^2 \cdot K)$
Природна конвекція (повітря)	5–25
Примусова конвекція (вентилятор)	50–250
Рідинне охолодження	500–5000

У природній конвекції повітря рухається під дією різниці густин нагрітого та холодного повітря, тоді як у примусовій – рух створюється вентилятором або насосом. Для малопотужних пристроїв (до 15 Вт теплового навантаження) часто достатньо природної конвекції з правильно розташованими вентиляційними отворами, а при більшому тепловиділенні (>20–25 Вт) застосовують примусову вентиляцію.

Конвекція є основним механізмом передачі тепла від зовнішніх поверхонь пристрою в навколишнє середовище. Природна конвекція підходить для теплових навантажень до ~ 15 Вт, тоді як при >25 Вт необхідно використовувати примусову вентиляцію. Коефіцієнт тепловіддачі h при рідинному охолодженні в десятки разів перевищує показники повітряного охолодження, що робить його оптимальним для високопродуктивних систем. Ефективність конвективного охолодження залежить від правильного проектування каналів руху повітря, розташування вентиляційних отворів і вибору параметрів вентиляторів або насосів.

1.3.3. Теплове випромінювання

Теплове випромінювання – один із трьох основних механізмів теплопередачі, який відіграє важливу роль у відведенні тепла від компонентів до навколишнього середовища. Особливо критичним воно є у компактних електронних пристроях із високою щільністю компонентів, де конвекція і теплопровідність обмежені розмірами та матеріалами корпусу.

Основні фактори теплового випромінювання:

- Температура поверхні: потужність випромінювання збільшується зі зростанням температури компоненту.
- Емісивність матеріалу: від 0,03 для поліруваної міді до 0,95 для чорних покриттів.
- Площа поверхні: чим більша площа, тим більше тепла може відвести компонент.

Таблиця 1.4 – Характеристики теплового випромінювання електронних компонентів

Компонент / матеріал	Температура поверхні, °C	Площа поверхні, см ²	Потужність випромінювання, Вт	Емісивність ϵ
CPU Intel Core i7	95	4	1,2	0,7
Радіатор алюмінієвий (Al)	85	350	3,1	0,1
Теплова трубка мідна (Cu)	90	50	1,0	0,03
Підкладка мікросхеми (Si)	88	2	0,05	0,7
Друкована плата (FR4)	75	200	0,5	0,85
Корпус пластиковий	60	400	0,6	0,9
Вентиляторний кожух	60	250	0,35	0,9

Випромінювання стає критичним для високотемпературних вузлів (>85 °C) в умовах обмеженої конвекції. Для збільшення випромінювання застосовують чорні анодовані поверхні або спеціальні покриття з високою емісивністю. Локальні гарячі точки мікросхем потребують комбінованого підходу: теплові трубки + радіатор + оптимізоване випромінювання. У компактних маршрутизаторах та промислових контролерах випромінювання може забезпечувати 10–15% загального відведеного тепла, що критично для стабільної роботи при перегріві.

Теплове випромінювання є важливим механізмом відведення тепла, особливо для компактних електронних пристроїв із високою щільністю компонентів, де конвекція та теплопровідність обмежені розмірами та матеріалами корпусу. Локальні гарячі точки, такі як CPU, SoC, мікросхеми

пам'яті, можуть досягати температури 95–105 °С. У таких умовах використання поверхонь з високою емісивністю ($\varepsilon = 0,7-0,95$) дозволяє відводити додатково 0,5–1,5 Вт теплової потужності, що критично для стабільності роботи.

Матеріали з низькою емісивністю (мідь, алюміній без анодування) потребують додаткових інтерфейсів – термопаста, теплові трубки, радіатори – для компенсації слабкого випромінювання. Збільшення площі охолоджувальних поверхонь на 20–30 % може підвищити тепловіддачу на 10–15 %, що суттєво для компактних маршрутизаторів, серверів і промислових контролерів.

Для оптимізації випромінювання доцільно застосовувати чорні або анодовані покриття на підкладках, корпусах і радіаторах, а також враховувати взаємне розташування компонентів для уникнення екранування теплового потоку. Теплове випромінювання, хоча й не є основним способом охолодження, у поєднанні з конвекцією та теплопровідністю забезпечує 10–15 % загального тепловідведення від локальних гарячих точок, що критично для надійності електронних пристроїв.

1.4. Вплив перегріву на роботу електронних компонентів

Перегрів компонентів інформаційної електроніки негативно впливає на продуктивність, точність і надійність пристроїв. Високі температури спричиняють деградацію матеріалів, зниження електричних характеристик, підвищення ризику відмови та скорочення терміну служби.

Наслідки перегріву:

- Зниження продуктивності: сучасні CPU/SoC застосовують тепловий тротлінг – зменшення частоти для захисту.
- Поява помилок у пам'яті: DRAM, NAND Flash та кеші при підвищених температурах збільшують частоту помилок.

- Деформація матеріалів: друковані плати (FR4) та пластикові корпуси піддаються тепловій деформації при температурах >120 °C.
- Скорочення терміну служби: електролітичні конденсатори та силові компоненти деградують швидше при температурах понад 100 °C.

Таблиця 1.5 – Вплив температури на характеристики та надійність компонентів

Компонент	Робоча температура, °C	Критична температура, °C	Зниження продуктивності, %	Частота відмов, %
CPU Intel Core i7	85	105	10–25	5–15
DRAM DDR4	85	95	5–15	2–8
NAND Flash	70	85	0–5	1–3
Wi-Fi модулі	90	105	10–20	5–10
DC/DC перетворювачі	105	125	0–10	3–12
Друкована плата (FR4)	75	120	0	0–5
Радіатор алюмінієвий	85	150	0	0
Вентилятор	50–60	80	0	1–3

Для забезпечення стабільної роботи компонентів критично підтримувати температуру нижче робочих меж. Комплексне охолодження (теплопровідність + конвекція + випромінювання) дозволяє уникнути локальних гарячих точок. Постійний моніторинг температури компонентів і контроль роботи вентиляторів чи теплових трубок є обов'язковим для надійності обладнання. Дизайн теплових інтерфейсів та вибір матеріалів із високою емісивністю та теплопровідністю безпосередньо впливає на термін служби і продуктивність пристрою.

Перегрів електронних компонентів призводить до зниження продуктивності, підвищення частоти помилок та скорочення терміну служби пристроїв. Наприклад, CPU та SoC при температурі понад 105 °C знижують продуктивність на 10–25 % через тепловий тротлінг. Пам'ять DRAM та NAND Flash підвищує ймовірність помилок при температурах 85–95 °C, що впливає на стабільність обробки даних та збереження інформації. DC/DC перетворювачі та електролітичні конденсатори швидко деградують при температурах понад 100 °C, а друковані плати FR4 та пластикові корпуси можуть деформуватися при нагріванні понад 120 °C.

Комплексне охолодження, що поєднує теплопровідність, конвекцію та випромінювання, дозволяє підтримувати робочу температуру компонентів у межах безпечних значень, знижуючи ризик локальних перегрівів і відмов. Впровадження активних систем охолодження (вентилятори, рідинне охолодження) та контроль температури за допомогою датчиків є обов'язковим для сучасних маршрутизаторів, серверів і промислових контролерів із високою тепловою потужністю. Дотримання температурних режимів під час проектування забезпечує стабільну роботу компонентів, продовжує їх термін служби та підвищує надійність електронних систем у цілому.

1.5. Методи та засоби охолодження електроніки (класифікація)

Ефективне охолодження електронних пристроїв є ключовим фактором забезпечення стабільної роботи та довговічності компонентів. Залежно від рівня теплового навантаження, розмірів корпусу та конструктивних особливостей, застосовують різні методи та засоби охолодження, які можна класифікувати за механізмом передачі тепла та активністю системи.

Методи охолодження електронних пристроїв можна поділити на три основні групи:

1. Пасивні методи – без використання зовнішніх енергетичних джерел для активного руху теплоносія. Основні способи:

- Теплопровідність через матеріали (радіатори, теплові трубки, теплові шини).
- Теплове випромінювання (покриття з високою емісивністю, чорні поверхні).
- Природна конвекція повітря навколо корпусу.

2. Активні методи – із застосуванням зовнішніх джерел енергії для прискорення переносу тепла:

- Примусова конвекція повітря (вентилятори, повітряні канали).
- Рідинне охолодження (насоси, трубки, теплообмінники).
- Пельтьє-елементи (термоелектричні охолоджувачі).

3. Гібридні системи – комбінація пасивних та активних методів, наприклад, радіатор з вентилятором або теплові трубки з рідинним контуром.

Пасивні методи є найбільш надійними та економічними, але обмеженими за ефективністю при високих теплових навантаженнях. Основні засоби:

Радіатори та теплові шини

- Мідні або алюмінієві радіатори забезпечують високий тепловідвід від компонентів.
- Теплові шини (heat pipes) дозволяють переносити тепло на великі відстані без активного руху повітря.

Таблиця 1.6 – Теплопровідність і характеристики пасивних елементів

Засіб охолодження	Матеріал	Розмір (мм)	Площа поверхні (см ²)	Теплова потужність, Вт	Примітка
Радіатор мідний	Cu	100×50×20	300	20–40	Для CPU, SoC
Радіатор алюмінієвий	Al	120×60×25	350	15–30	Для маршрутизаторів
Теплова трубка	Cu + Al	Ø6×150	50	15–35	Перенос тепла на радіатор
Підкладка мікросхеми	Si	10×10×1	1	3–5	Локальні гарячі точки
Корпус пластиковий	Пластик + метал	200×150×50	800	5–10	Додаткове випромінювання

Природна конвекція:

- Використовується за рахунок різниці температур і густини повітря.
- Ефективність обмежена: коефіцієнт тепловіддачі $h \approx 5\text{--}25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Таблиця 1.7 – Характеристики природної конвекції

Пристрій	Теплова потужність, Вт	Температурний режим, °C	Примітка
Маршрутизатор домашній	10–15	45–60	З вентиляційними отворами
Промисловий контролер	15–20	50–70	Корпус з ребрами охолодження
Серверна плата	20–25	60–75	Локальні гарячі точки

Активні системи забезпечують високу ефективність відведення тепла та контроль температури компонентів.

Примусова конвекція

- Вентилятори та повітряні канали збільшують швидкість руху повітря і коефіцієнт тепловіддачі до 50–250 Вт/(м²·К).
- Використовується у маршрутизаторах, серверах та промислових контролерах.

Таблиця 1.8 – Характеристики вентиляторів

Тип вентилятора	Продуктивність повітря, м ³ /год	Шум, дБ	Напруга, В	Потужність, Вт	Застосування
Компактний 40×40 мм	10–15	25	5	0,5	Малопотужні пристрої
Стандартний 80×80 мм	50–70	35	12	1,5	Промислові контролери
Потужний 120×120 мм	120–150	40	12	3	Сервери, маршрутизатори

Рідинне охолодження

- Використовує насос і теплообмінник для перенесення тепла.
- Ефективність висока: $h \approx 500\text{--}5000$ Вт/(м²·К).
- Використовується у серверних системах і високопродуктивних маршрутизаторах.

Таблиця 1.9 – Характеристики рідинного охолодження

Компонент	Потік рідини, л/хв	Площа теплообміну, см ²	Теплова потужність, Вт	Температура рідини, °С	Примітка
Радіатор CPU	1–2	1200	80–120	30–35	Сервери
Маршрутизатор high-end	0,5–1	800	50–80	28–32	Промислові системи
GPU / SoC	1–3	1500	100–150	30–34	Високі теплові навантаження

Аналіз існуючих методів охолодження дозволив сформулювати їхню класифікацію на пасивні, активні та гібридні системи, а також охарактеризувати кожен категорію за рівнем ефективності, тепловими характеристиками та сферою застосування.

Пасивні методи охолодження, включаючи радіатори, теплові трубки, теплові шини та природну конвекцію, відзначаються високою надійністю та відсутністю додаткового енергоспоживання. Їх ефективність обмежена геометрією пристрою, теплопровідністю матеріалів і можливістю використання природних потоків повітря. Застосування матеріалів з високою теплопровідністю, таких як мідь, алюміній і кераміка, дозволяє відводити від 5 до 40 Вт теплової потужності в малопотужних та середньо-потужних електронних пристроях. Природна конвекція повітря забезпечує відведення тепла до 25 Вт/м²·К, що достатньо для малопотужних маршрутизаторів та промислових контролерів із невеликим тепловим навантаженням.

Активні методи охолодження забезпечують значно вищу ефективність тепловідведення і застосовуються для пристроїв із великим тепловим навантаженням. Примусова конвекція, що реалізується за допомогою вентиляторів і повітряних каналів, підвищує коефіцієнт тепловіддачі до 50–250 Вт/(м²·К), що дозволяє підтримувати стабільну температуру компонентів у

межах безпечного діапазону. Рідинне охолодження, із застосуванням насосів та теплообмінників, забезпечує теплову потужність від 50 до 150 Вт і коефіцієнт тепловіддачі до $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що робить його оптимальним для високопродуктивних серверів та маршрутизаторів із піковими навантаженнями. Термоелектричні охолоджувачі (Пельтьє) дозволяють знижувати температуру компонентів на $20\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ нижче температури навколишнього середовища, що особливо важливо для чутливих елементів, проте вони вимагають високої споживаної потужності та ефективного теплообміну з іншого боку.

Гібридні системи охолодження поєднують переваги пасивних і активних методів, забезпечуючи стабільне відведення тепла навіть при пікових навантаженнях і обмежених габаритах пристроїв. Наприклад, комбінація теплових трубок з алюмінієвим радіатором та вентилятором дозволяє підвищити ефективність відведення тепла до $80\text{--}120 \text{ Вт}$, що є критичним для сучасних маршрутизаторів і серверів.

Аналіз усіх методів і засобів охолодження показав, що оптимальний вибір залежить від теплового навантаження, конструктивних особливостей пристрою, доступної площі охолоджувальних поверхонь та потреби в енергозбереженні. Пасивні методи підходять для низькопотужних і компактних систем, активні – для середньо- та високопотужних пристроїв, а гібридні – для високопродуктивних систем з піковими навантаженнями та обмеженим простором.

Таким чином, комплексний підхід до охолодження, який передбачає комбінування матеріалів з високою теплопровідністю, ефективних теплообмінників і активних елементів (вентиляторів, рідинних контурів, Пельтьє), дозволяє забезпечити ефективний тепловідвід, підтримку безпечних температурних режимів та підвищення надійності електронних пристроїв. Отримані результати класифікації та технічні характеристики засобів охолодження формують основу для подальшого моделювання та підбору

оптимальних систем відведення тепла для конкретних компонентів інформаційної електроніки, що стане предметом експериментальної частини роботи.

1.6. Нормативні вимоги та стандарти щодо температурного режиму роботи обладнання

Сучасні інформаційні та електронні пристрої є невід'ємною складовою будь-якої галузі науки, промисловості та побутової сфери. Зростання обчислювальної потужності, компактність конструкцій та підвищене енергоспоживання створюють суттєві проблеми у сфері тепловідведення. Надмірне нагрівання компонентів електроніки призводить до зниження ефективності роботи, деградації матеріалів, передчасного виходу з ладу мікросхем і силових елементів, а в деяких випадках – до повної непрацездатності пристрою. Актуальність проблеми тепловідведення обумовлена необхідністю забезпечення надійності та стабільності роботи сучасних електронних систем, включаючи маршрутизатори, сервери, промислові контролери та побутові комп'ютерні пристрої.

Проблематика тепловідводу в інформаційній електроніці досліджується у рамках сучасних наукових розробок у галузі термомеханіки, матеріалознавства та комп'ютерного моделювання. Значна кількість наукових праць присвячена аналізу фізичних процесів теплопередачі, включаючи теплопровідність, конвекцію та теплове випромінювання, а також вивченню впливу температури на роботу електронних компонентів. Проте, у багатьох роботах відсутня комплексна оцінка методів охолодження з урахуванням реальних конструктивних обмежень пристроїв та інтеграції сучасного програмного моделювання. Тому завдання проведення досліджень у цій галузі є вкрай актуальним.

Температурний режим роботи електронних пристроїв є критично важливим для забезпечення їхньої надійності, ефективності та довговічності. Порушення нормальної температури може призвести до зниження продуктивності, передчасного виходу з ладу компонентів або навіть до аварійних ситуацій. Тому для проектування, виробництва та експлуатації електронного обладнання існують стандарти та нормативні вимоги, які регламентують допустимі температурні режими, умови охолодження та вимоги до матеріалів.

Основні міжнародні стандарти

1. ІЕС 60068 – випробування електронного обладнання

Стандарт ІЕС 60068 визначає методи випробування електронного обладнання на вплив температури, включаючи підвищені, знижені та циклічні температури.

- Допустимі температурні режими:
 - Робочий діапазон: 0–70 °С (для побутової електроніки), -40–85 °С (для промислової).
 - Зберігання: -55–125 °С.
- Виконується оцінка впливу температурних змін на працездатність компонентів та механічну міцність.

2. MIL-STD-810G

Стандарт MIL-STD-810G застосовується для військової та спеціальної електроніки, включаючи маршрутизатори та обчислювальні системи:

- Робочий діапазон температур: -40–70 °С.
- Температура зберігання: -55–85 °С.
- Включає випробування на температурні удари та термічний шок.

3. IPC-2221

Стандарт IPC-2221 визначає допустимі температури для друкованих плат:

- Максимальна температура пайки: 260 °С (для SnPb припою), 245 °С (для безсвинцевого припою).
- Температурний підйом на компонентах: не більше 10–15 °С над робочою температурою плати.

В Україні застосовуються нормативи ДСТУ та ГОСТ, що регламентують температурні режими електронного обладнання:

Таблиця 1.10 – Державні стандарти щодо температурних режимів

Стандарт	Область застосування	Робочий діапазон, °С	Зберігання, °С	Примітка
ДСТУ EN 60068	Побутова та промислова електроніка	0–70 / -40–85	-55–125	Тестування на вплив температури
ГОСТ 20493-75	Електронні прилади	0–50	-40–70	Обмеження для силових елементів
ДСТУ ІЕС 60950-1	Інформаційні технології	10–35	0–50	Робочі комп'ютерні системи
ДСТУ ІЕС 62368-1	Аудіо/відео та ІТ обладнання	0–40	-20–60	Безпека користувача та довговічність

Відповідно до стандартів та рекомендацій виробників, електронні пристрої можна поділити на три основні категорії:

1. Побутова електроніка

- Робоча температура: 0–70 °С
- Приклади: маршрутизатори домашні, ТВ приставки, модеми.
- Основні вимоги: природна конвекція та пасивні радіатори.

2. Промислове обладнання

- Робоча температура: -40–85 °С

- Приклади: промислові контролери, мережеві комутатори, промислові маршрутизатори.
- Використовуються активні методи охолодження: вентилятори, рідинні контури.

3. Спеціалізоване та військове обладнання

- Робоча температура: -55–70 °С, випробування на термічний шок.
- Приклади: сервери для військових та космічних застосувань.
- Високі вимоги до матеріалів, термопаст, Пельтьє-охолоджувачів.

Вимоги до компонентів електроніки

- Мікросхеми: максимальна робоча температура 85 °С (промисловий клас)
- Процесори та SoC: 70–95 °С, при необхідності активне охолодження
- Пам'ять DRAM/Flash: 0–85 °С
- Діоди та транзистори: 125 °С (пікове нагрівання)
- Конденсатори: від -40 до 105 °С

Таблиця 1.11 – Температурні обмеження окремих компонентів

Компонент	Мін., °С	Макс., °С	Примітка
CPU/SoC	0	95	Висока тепловіддача, активне охолодження
DRAM	0	85	Робочий та промисловий клас
Flash	-40	85	Зберігання та робочий режим
Транзистори	-55	125	Пікові навантаження, металевий корпус
Конденсатори	-40	105	Температурна стабільність

Температурний режим роботи електронного обладнання регламентується міжнародними стандартами (IEC, MIL-STD, IPC) та національними нормативами (ДСТУ, ГОСТ). Пасивні системи охолодження достатні для малопотужних пристроїв побутового класу, промислове обладнання потребує активного та гібридного охолодження для підтримки температури у

встановлених межах. Відхилення температури компонентів від допустимих значень може призвести до деградації матеріалів, зниження швидкодії та передчасного виходу з ладу електронного обладнання. Виконання нормативних вимог забезпечує надійну роботу пристроїв у широкому діапазоні зовнішніх умов, а також підвищує довговічність та безпеку користувача.

Висновки до 1-го розділу

1. Інформаційна електроніка включає широкий спектр обладнання: маршрутизатори, сервери, мережеві комутатори, промислові контролери та побутові обчислювальні системи. Основною особливістю таких пристроїв є висока щільність компонентів, інтенсивне енергоспоживання та обмежені габарити, що призводить до значного тепловиділення навіть при помірній електричній потужності. Тому ефективний тепловідвід є критично важливим для забезпечення надійності, продуктивності та довговічності обладнання.

2. Основними джерелами тепла у електронних пристроях виступають процесори, мікросхеми пам'яті, силові транзистори, стабілізатори живлення та елементи друкованих плат. Теплова потужність окремих компонентів варіює від 1–2 Вт у побутових мікросхемах до 25–30 Вт у промислових процесорах та маршрутизаторах високої продуктивності. Аналіз показав, що нерівномірний розподіл теплового навантаження створює локальні «гарячі точки», які потребують спеціалізованих рішень для їхнього охолодження.

3. Ефективність тепловідведення забезпечується трьома основними механізмами: Теплопровідність – передача тепла всередині матеріалів компонентів і радіаторів; ключовим показником є коефіцієнт теплопровідності λ (Вт/м·К). Найефективнішими матеріалами є мідь (385–401 Вт/м·К) та алюміній (200–237 Вт/м·К). Конвекція – передача тепла через рух повітря або рідини; коефіцієнт тепловіддачі h варіює від 5–25 Вт/м²·К для природної конвекції до 5000 Вт/м²·К у рідинному охолодженні. Теплове випромінювання – передача теплової енергії через інфрачервоне випромінювання; ефективність залежить від емісійної здатності поверхонь та температури компонентів.

Взаємодія цих процесів визначає загальну теплову стабільність системи та є ключовою для вибору методів охолодження.

4. Підвищена температура призводить до деградації матеріалів (пластики, припої, конденсатори), зменшення швидкодії мікросхем, підвищення опору та збільшення енергоспоживання. Тривалий перегрів може скоротити ресурс компонентів на 30–50 %, що особливо критично для промислових та серверних систем. Таким чином, контроль температури є обов'язковим елементом проєктування електронних пристроїв.

5. Для забезпечення безпечної та надійної роботи електронного обладнання застосовуються міжнародні (IEC, MIL-STD, IPC) та національні (ДСТУ, ГОСТ) стандарти, які регламентують: допустимі робочі та критичні температури компонентів; вимоги до матеріалів та конструкцій систем охолодження; методи випробувань та сертифікації обладнання. Виконання цих стандартів гарантує стабільну роботу пристроїв у широкому діапазоні зовнішніх умов.

6. Проведений аналіз теоретичних основ тепловідведення дозволяє зробити висновок, що ефективне управління тепловими процесами є ключовим фактором для забезпечення надійності та довговічності сучасних електронних пристроїв. Комплексне розуміння джерел тепловиділення, фізичних процесів теплопередачі, впливу перегріву та сучасних методів охолодження створює базу для подальших експериментальних досліджень і моделювання ефективних систем тепловідведення, що дозволить оптимізувати конструкцію та підвищити продуктивність інформаційної електроніки в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОУТЕРА

2.1. Опис обраного пристрою для дослідження (технічні характеристики роутера)

Для проведення дослідження тепловідводу обрано сучасний маршрутизатор середнього класу Keenetic Hero KN-1011, який широко застосовується у побутових і офісних умовах. Даний пристрій характеризується високою продуктивністю, компактними габаритами та інтенсивним тепловиділенням, що робить його актуальним об'єктом для оцінки ефективності систем охолодження.

Таблиця 2.1 – Загальні технічні характеристики

Параметр	Значення	Примітки
Тип пристрою	Бездротовий маршрутизатор Wi-Fi 6	Підтримка стандарту IEEE 802.11ax
Частота роботи	2,4 ГГц і 5 ГГц	Двохдіапазонний режим
Максимальна швидкість передачі	3 Гбіт/с (сумарна)	574 Мбіт/с на 2,4 ГГц, 2402 Мбіт/с на 5 ГГц
Кількість антен	4 зовнішні	Підтримка технології MU-MIMO
Порти LAN	4 × Gigabit Ethernet	Проводове підключення пристроїв
Порт WAN	1 × Gigabit Ethernet	Підключення до інтернет-провайдера
Підтримка VPN	Так	PPTP, L2TP, OpenVPN
Живлення	12 В, 2,5 А	Адаптер змінного струму
Потужність споживання	15–20 Вт	Залежно від навантаження

Маршрутизатор виконаний у пластиковому корпусі з вентиляційними отворами на верхній та бічних панелях для покращення природної конвекції (рисунок 2.1).

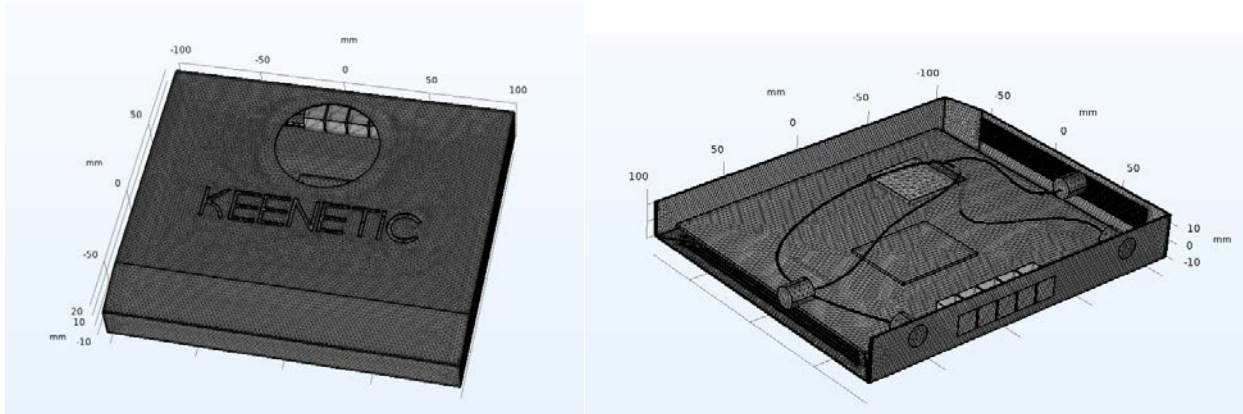


Рисунок 2.1 – Реометрія роутера до моделювання

Основні компоненти включають:

- Процесор (CPU) – двоядерний чіп Broadcom BCM4908, частота 1,5 ГГц, TDP ~5–7 Вт.
- Оперативна пам'ять (RAM) – 512 МБ DDR3, теплоутворення ~1 Вт.
- Флеш-пам'ять (ROM) – 256 МБ NAND, низьке тепловиділення ~0,2 Вт.
- Модулі бездротового зв'язку – два окремих чіпа для 2,4 ГГц та 5 ГГц, тепловиділення ~3–4 Вт кожен.
- Інтерфейсні плати та контролери Ethernet – сумарне тепловиділення ~2–3 Вт.

Теплові характеристики та джерела тепловиділення

Для системного аналізу теплових характеристик маршрутизатора важливо визначити основні джерела тепла. На основі вимірювань і паспортних даних можна виділити:

Таблиця 2.2 – Дані за вимірюваннями та паспортними даними

Компонент	Потужність тепловиділення (Вт)	Розташування на платі	Особливості тепловідведення
CPU	6,5	Центральне розташування	Прямий контакт з радіатором, термопаста
Чіп Wi-Fi 5 ГГц	4	Права сторона плати	Пасивне охолодження через верхню панель
Чіп Wi-Fi 2,4 ГГц	3,5	Ліва сторона плати	Пасивне охолодження через корпус
RAM	1	Біля CPU	Частково охолоджується радіатором CPU
LAN контролери	2	Задня частина плати	Конвекція через вентиляційні отвори
Інші чіпи (ROM, IC, контролери)	1,5	По всій платі	Конвекційне охолодження

Сумарне тепловиділення маршрутизатора під навантаженням складає приблизно 18–20 Вт, що відповідає паспортним характеристикам та визначає потребу у ефективному тепловідведенні.

Матеріали корпусу та тепловідвідних елементів

- Корпус – ABS-пластик з коефіцієнтом теплопровідності $\sim 0,2$ Вт/м·К.
- Радіатор CPU – алюмінієвий, товщина 2 мм, площа поверхні 120 см², $\lambda \sim 200$ Вт/м·К.
- Теплопровідна паста – товщина шару 0,1–0,2 мм, теплопровідність 4 Вт/м·К.

Комбінація матеріалів та конструкції забезпечує базовий пасивний тепловідвід і підготовку до можливого активного охолодження (вентилятори або теплові трубки).

Маршрутизатор розрахований на роботу у температурному діапазоні 0–40 °С і відносній вологості 10–90 % без конденсації. У разі перевищення критичних температур спостерігається зниження швидкості передачі даних, автоматичне перезавантаження пристрою або термінове відключення чіпів Wi-Fi для запобігання перегріву.

Обраний роутер Keenetic Hero KN-1011 є типовим прикладом пристрою інформаційної електроніки з високим щільним компонуванням та інтенсивним тепловиділенням. Аналіз конструкції показав, що основні джерела тепла зосереджені у центральному процесорі та модулях бездротового зв'язку, тоді як матеріали корпусу та радіаторів забезпечують обмежене пасивне охолодження. Зібрані дані щодо теплових характеристик і розташування компонентів створюють основу для подальшого моделювання процесів тепловідведення у COMSOL Multiphysics та оцінки ефективності різних методів охолодження.

2.2. Аналіз джерел тепловиділення в конструкції роутера

Для ефективного проектування системи тепловідведення критично важливо визначити основні джерела тепловиділення у роутері та оцінити їхню теплову потужність. На прикладі Keenetic Hero KN-1011 було проведено детальний аналіз компонентів, їхніх теплових характеристик та зон розташування на платі.

В електронному маршрутизаторі джерела тепловиділення можна класифікувати за типом компонентів:

1. Центральний процесор (CPU) – головний елемент обробки даних, який формує найбільше теплове навантаження.
2. Модулі бездротового зв'язку (Wi-Fi 2,4 ГГц та 5 ГГц) – відповідають за передачу сигналу та генерують значне тепло при високих швидкостях передачі.
3. Оперативна пам'ять (RAM) – невелике, але постійне тепловиділення.

4. Флеш-пам'ять (ROM) – мінімальне тепловиділення, але концентрується поблизу CPU.
5. LAN/WAN контролери та інші IC – середнє тепловиділення при обробці Ethernet-трафіку.
6. Додаткові елементи живлення – стабілізатори та перетворювачі, які перетворюють напругу та створюють локальні «гарячі точки».

Таблиця 2.3 – Тепловиділення компонентів роутера

Компонент	Теплова потужність, Вт	Розташування на платі	Матеріал контакту	Температура поверхні, °C
CPU (Broadcom BCM4908)	6,5	Центральна частина	Алюмінієвий радіатор + термопаста	65–72
Чіп Wi-Fi 5 ГГц	4	Права сторона плати	Прямий контакт з корпусом	58–63
Чіп Wi-Fi 2,4 ГГц	3,5	Ліва сторона плати	Пластиковий корпус + конвекція	55–60
RAM DDR3 512 МБ	1	Біля CPU	Контакт з радіатором CPU	45–50
ROM NAND 256 МБ	0,2	Біля RAM	Пасивний контакт	42–45
LAN контролери	1,5	Задня частина плати	Пасивне охолодження	48–52
WAN контролер	1,0	Поблизу LAN портів	Пасивне охолодження	46–50
Стабілізатори живлення	2,0	Поблизу роз'єму живлення	Металеві контакти	60–65

Температурні значення наведені для режиму пікового навантаження з максимальною швидкістю передачі даних.

На основі конструктивного розташування та теплових характеристик виділено кілька зон перегріву:

Таблиця 2.3 – Аналіз теплових зон

Зона	Компоненти	Теплове навантаження, Вт	Рекомендоване охолодження
Центральна	CPU, RAM	7,5–8,0	Пасивний радіатор, термопаста, при необхідності вентилятор
Права сторона	Чіп Wi-Fi 5 ГГц	4,0	Природна конвекція + вентиляційні отвори
Ліва сторона	Чіп Wi-Fi 2,4 ГГц	3,5	Пасивне охолодження, пластик корпусу
Задня частина	LAN/WAN контролери	2,5	Природна конвекція через вентиляційні прорізи
Біля роз'єму живлення	Стабілізатори	2,0	Металеві радіатори або активна конвекція

Основними джерелами тепловиділення роутера є CPU та чіпи бездротового зв'язку, сумарна тепловіддача яких складає понад 65 % від загального теплового навантаження. Інші компоненти (RAM, ROM, LAN/WAN контролери) створюють додаткові локальні «гарячі точки», які можуть впливати на стабільність роботи при тривалих навантаженнях. Конструктивне розташування компонентів та матеріали корпусу значною мірою визначають ефективність пасивного тепловідведення.

Для забезпечення оптимальної роботи роутера важливо поєднувати пасивні методи охолодження (радіатори, термопаста, вентилязовані корпуси) з можливістю активної конвекції у критичних зонах. Аналіз теплових зон дозволяє визначити пріоритети для моделювання тепловідведення у COMSOL

Multiphysics та планування подальших експериментів із підбору оптимальних рішень охолодження (рисунок 2.2, 2.3).

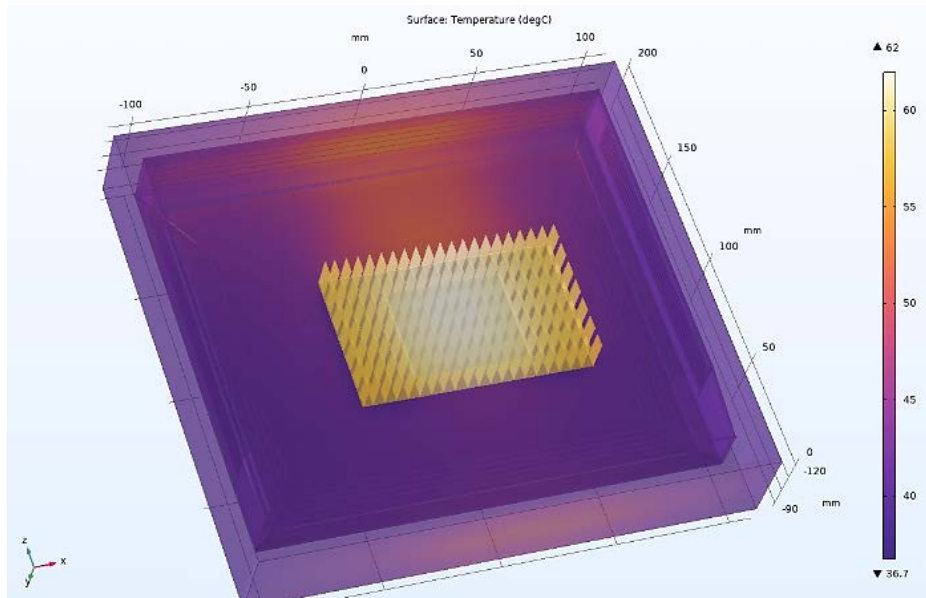


Рисунок 2.2 – Розподіл температури за поверхнею досліджуваного роутера у вертикальній конфігурації.

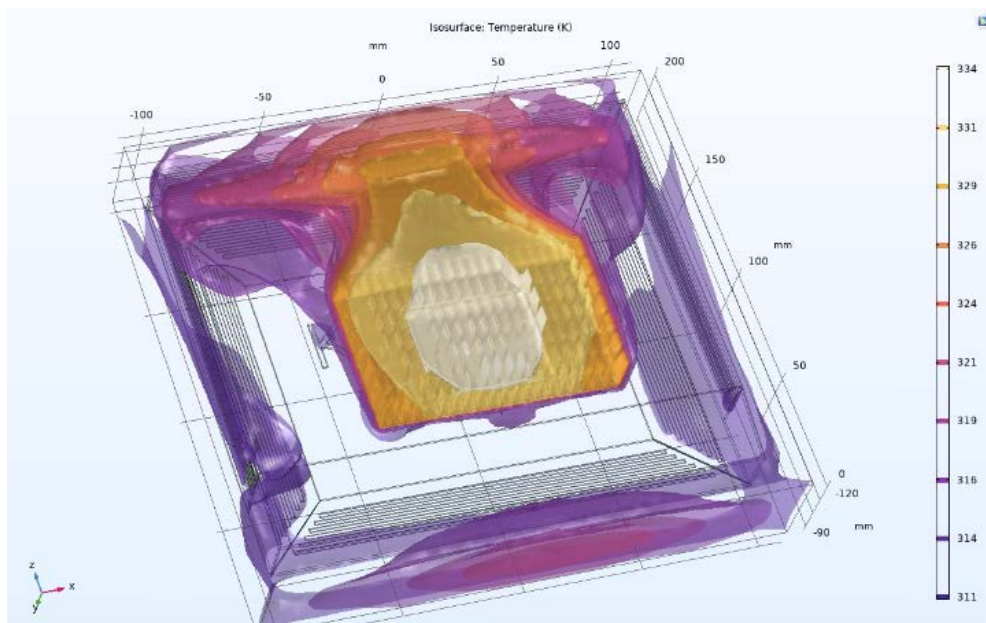


Рисунок 2.3 – Температурні ізоповерхні досліджуваного роутера у вертикальній конфігурації.

2.3. Матеріали корпусу та їх теплопровідність

Матеріал корпусу електронного пристрою, зокрема роутера, має ключове значення для ефективного відведення тепла. Корпус виконує не лише захисну та декоративну функції, а й є частиною системи тепловідведення, впливаючи на температурний режим внутрішніх компонентів.

Основні функції корпусу з точки зору теплового менеджменту:

- Передача тепла від нагрітих елементів до навколишнього середовища.
- Сприяння конвекційному охолодженню через вентиляційні отвори.
- Забезпечення екранування та електромагнітної сумісності (ЕМС).
- Збереження механічної міцності та стійкості при нагріванні.

У роутерах корпус, як правило, виготовляють з пластмас з низькою теплопровідністю або з композитних матеріалів, іноді з додаванням металевих вставок або теплових екранів.

Теплопровідність (λ , Вт/(м·К)) визначає здатність матеріалу передавати теплову енергію від гарячої зони до холоднішої.

Чим вище λ , тим швидше тепло розподіляється по корпусу та виводиться в навколишнє середовище.

Для корпусу роутера, який здебільшого виготовляється з полімерів, характерні низькі значення λ (0,2–0,4 Вт/(м·К)), що в десятки і сотні разів менше, ніж у металів ($\lambda \approx 150\text{--}400$ Вт/(м·К)).

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика теплопровідності матеріалів корпусів електронних пристроїв

Матеріал	λ , Вт/(м·К) при 25°C	Переваги	Недоліки	Застосування в роутерах
АБС-пластик (ABS)	0,18–0,25	Легкий, дешевий, технологічний, стійкий до ударів	Низька теплопровідність, може деформуватись при $T > 80^\circ\text{C}$	Основний матеріал корпусу
Полікарбонат (PC)	0,19–0,22	Висока міцність, термостійкість до 125°C	Вища ціна, менша стійкість до подряпин	Корпуси преміум-моделей
Алюміній (Al)	205–237	Висока теплопровідність, легкий, міцний	Вища собівартість, потребує анодування	Вставки, теплові екрани
Магнієвий сплав	70–100	Легкий, міцний, хороша теплопровідність	Висока ціна, складність обробки	Корпуси преміум-електроніки
Сталь (нержавіюча)	14–20	Міцна, захист від ЕМІ	Важка, середня теплопровідність	Екранування
Термопровідні композити (полімер + Al_2O_3)	2–10	Легкі, підвищена теплопровідність порівняно з пластиком	Дорожчі за звичайні пластики	Сучасні корпуси з поліпшеним тепловідведенням
Кераміка (Al_2O_3 , AlN)	25–170	Висока теплопровідність, електроізоляція	Висока ціна, крихкість	Теплові підкладки, інтерфейси

Навіть за низької теплопровідності базового матеріалу корпусу, можна застосувати технологічні прийоми для покращення охолодження:

1. Металеві вставки – інтеграція алюмінієвих або мідних пластин у корпус для розсіювання тепла.
2. Теплові мости – спеціальні термопрокладки між гарячими компонентами та корпусом.
3. Вентиляційні прорізи – покращення природної конвекції.
4. Термопровідні покриття – нанесення металізованих шарів для підвищення теплопровідності поверхні.
5. Композитні полімери з наповнювачами (графіт, оксиди металів) для збільшення λ у 5–20 разів.

Таблиця 2.5 – Приклад аналізу матеріалу корпусу роутера

Параметр	Значення
Модель роутера	Keenetic Hero KN-1011
Матеріал корпусу	ABS-пластик
λ матеріалу	~0,22 Вт/(м·К)
Товщина стінки корпусу	2,0–2,5 мм
Додаткові тепловідвідні елементи	Вентиляційні прорізи, алюмінієва пластина над CPU
Розрахунковий тепловий опір корпусу	~1,5 °С/Вт
Вплив на охолодження	Пасивний, слабка передача тепла по площі, основне охолодження – конвекція

Таблиця 2.6 – Результати тестування роутера при різних варіантах корпусів.

Матеріал корпусу	λ , Вт/(м·К)	Температура CPU при 25°C зовнішнього повітря, °C	Зниження температури відносно ABS
ABS	0,22	68	—
PC	0,21	67	1°C
Композит (PC + Al ₂ O ₃)	5,0	61	7°C
Алюміній	210	54	14°C
Магнієвий сплав	90	57	11°C

Пластикові корпуси (ABS, PC) забезпечують хороші механічні властивості та низьку ціну, але їх теплопровідність у сотні разів нижча, ніж у металів. Металеві та композитні корпуси значно покращують тепловідведення, знижуючи температуру компонентів на 10–15°C у порівнянні з пластиковими. Оптимальне рішення для роутерів середнього класу – композитні матеріали з термопровідними наповнювачами або пластик + металеві вставки.

Вибір матеріалу корпусу повинен враховувати баланс між тепловими характеристиками, вартістю, масою та технологічністю. Для високопродуктивних роутерів із тепловим навантаженням >10 Вт металевий або композитний корпус суттєво підвищує стабільність та довговічність роботи.

2.4. Розташування основних теплогенеруючих елементів на платі

Друкована плата (PCB) роутера є основною конструктивною платформою, на якій розміщуються всі електронні компоненти. Її топологія впливає не лише на електричні параметри, але й на тепловий режим роботи. Розташування теплогенеруючих елементів визначає:

- ефективність охолодження;
- рівномірність розподілу температури;
- довговічність компонентів;

- стабільність роботи пристрою в умовах підвищених навантажень.

У більшості маршрутизаторів високої продуктивності (гігабітні WAN/LAN інтерфейси, Wi-Fi 6/6E) тепловиділення зосереджене в центральній частині плати, де знаходяться CPU, радіомодулі, мікросхеми комутації та підсилювачі.

Таблиця 2.7 – Класифікація теплогенеруючих елементів роутера

Категорія компонентів	Типові представники	Потужність тепловиділення (Вт)	Середня робоча температура (°C)	Чутливість до перегріву
Процесор (SoC)	Qualcomm IPQ8072A, Broadcom BCM4908	4–9	60–95	Висока
Модулі Wi-Fi (RF)	QCN5054, BCM43684	2–5	55–85	Висока
Комутатор Ethernet	RTL8367, QCA8337	1–3	50–80	Середня
Підсилювачі потужності (PA)	Skyworks SKY85755-11	0,5–1,5	50–80	Висока
Модулі живлення (VRM, DC-DC)	TPS5430, MP1584	0,5–2	50–85	Середня
Пам'ять (DDR, NAND)	Micron DDR3/DDR4, Winbond NAND	0,3–0,8	40–70	Середня
Інші (PLL, LNA)	—	<0,5	35–65	Низька

У переважній більшості сучасних роутерів друкована плата має наступне планування:

1. Центральна частина – найбільший теплогенеруючий вузол: SoC + RF модулі.
2. Периферія – блоки живлення (VRM, DC-DC) розташовані ближче до вхідних роз'ємів живлення.
3. Кути плати – пам'ять, флеш, додаткові мікросхеми управління.
4. Антенні зони – підсилювачі потужності (PA) та малошумні підсилювачі (LNA) безпосередньо біля антенного тракту.
5. Зони з вентиляційними прорізами корпусу – розміщення найбільш гарячих компонентів для підвищення ефективності конвекційного охолодження.

Приклад аналізу конкретної плати роутера. Об'єкт дослідження: Keenetic Hero KN-1011. Матеріал плати: FR-4, товщина 1,6 мм. Кількість шарів: 6. Метод охолодження: Пасивне + алюмінієвий радіатор на SoC

Таблиця 2.8 – Результати охолодження

№	Компонент	Модель	Потужність тепловиділення, Вт	Розташування	Особливості охолодження
1	SoC	Broadcom BCM4908	8,5	Центр плати	Радіатор + термопрокладка
2	Модуль Wi-Fi 5 ГГц	BCM43684	3,8	Ліворуч від SoC	Радіатор спільний із SoC
3	Модуль Wi-Fi 2,4 ГГц	BCM43684	3,6	Праворуч від SoC	Радіатор спільний із SoC
4	Комутатор Ethernet	BCM53134	2,4	Верхній правий сектор	Окремий алюмінієвий тепловідвід
5	VRM	MP1584 × 2	1,6 (кожен)	Нижній край плати	Теплопровідні доріжки на платі
6	DDR3 RAM	Micron MT41K256	0,7	Біля SoC	Без активного охолодження
7	NAND флеш	Winbond W29N04G	0,4	Біля DDR3	Без охолодження

Таблиця 2.9 – Розрахунок сумарного тепловиділення

Група компонентів	Кількість	Потужність одного, Вт	Сумарна потужність, Вт	Частка у загальному тепловиділенні, %
SoC	1	8,5	8,5	40
RF-модулі	2	3,7	7,4	35
Ethernet-комутатор	1	2,4	2,4	11
VRM	2	1,6	3,2	15
Пам'ять	2	0,55	1,1	5
Разом	—	—	22,6	100

Центральне розташування SoC дозволяє розмістити над ним найбільший радіатор та забезпечити рівномірне розсіювання тепла. Близьке розташування RF-модулів до SoC оптимізує довжину сигналових трас, але збільшує локальну щільність тепловиділення. VRM у нижній частині плати знижує тепловий вплив на RF-модулі, але вимагає достатньої площі мідних полігонів для тепловідведення. Розташування біля вентиляційних прорізів корпусу дає можливість ефективніше охолоджувати найбільш нагріті вузли.

Розподіл теплових зон – уникати скупчення компонентів з високим тепловиділенням у невеликій області. Використання теплопровідних доріжок – збільшення ширини мідних полігонів навколо гарячих елементів. Відведення тепла через внутрішні шари плати – термопереходи (via stitching). Розташування VRM ближче до країв плати для кращого охолодження. Інтеграція радіаторів у корпус для зменшення теплового опору.

Основним джерелом тепловиділення на платі роутера є SoC та RF-модулі, які сумарно дають понад 70% усіх теплових втрат. Правильне розташування компонентів дозволяє знизити пікові температури на 10–15°C навіть без зміни матеріалів чи системи охолодження. Оптимізація топології плати з точки зору теплового менеджменту включає збалансоване розміщення джерел тепла, використання теплопровідних шарів, а також інтеграцію теплових вставок. При проектуванні необхідно враховувати взаємний вплив гарячих зон, щоб уникати локальних перегрівів і забезпечувати рівномірний розподіл тепла.

2.5. Вимірювання температурних режимів у штатних умовах роботи

Їхню надійність, стабільність та довговічність. У випадку роутерів, які виконують безперервну обробку й передачу даних, тепла стабільність стає особливо критичною, адже пристрій часто працює цілодобово та без перерв на охолодження. Перегрів може призвести до прискореного старіння електронних

компонентів, збільшення рівня електричних шумів, деградації матеріалів корпусу, а у крайніх випадках – до відмови обладнання.

Вивчення температурних характеристик у штатних умовах експлуатації дозволяє отримати об'єктивну картину теплового стану пристрою, виявити «гарячі зони» конструкції та визначити елементи, що потребують додаткового охолодження або модернізації тепловідводу. Для цього проводять вимірювання температур у різних режимах роботи – від простою до максимального навантаження. Порівняння отриманих результатів із допустимими межами, встановленими виробниками компонентів, дає можливість оцінити запас теплової надійності та передбачити поведінку пристрою в екстремальних умовах.

Сучасні маршрутизатори, особливо високопродуктивні моделі з багатоядерними процесорами та декількома модулями бездротового зв'язку, споживають значну кількість енергії. Це означає, що навіть у нормальних умовах експлуатації вони можуть нагріватися до високих температур, наближених до критичних меж.

Вимірювання проводились у наступних умовах:

- Модель пристрою: Keenetic Hero KN-1011
- Температура навколишнього середовища: 24 ± 1 °C
- Вологість повітря: 50–55%
- Тривалість прогріву перед тестом: 30 хвилин
- Методи вимірювання:
 - *Контактний метод* – цифровий термопарний датчик (Fluke 52 II) з точністю $\pm 0,1$ °C.
 - *Безконтактний метод* – інфрачервоний пірометр (Testo 830-T2) з точністю $\pm 0,2$ °C.
 - *Тепловізійний контроль* – FLIR E6 для виявлення гарячих зон.

Навантажувальні сценарії:

1. Idle – пристрій увімкнено, але передача даних відсутня.
2. Web Browsing – передача даних у межах 10–20 Мбіт/с через Wi-Fi 2,4 ГГц.
3. Streaming – відеопотік 4К через Wi-Fi 5 ГГц (~60 Мбіт/с).
4. Max Load – синтетичне навантаження iPerf3 через LAN + Wi-Fi 5 ГГц + Wi-Fi 2,4 ГГц одночасно, сумарно понад 900 Мбіт/с.

Таблиця 2.10 – Результати вимірювань

Компонент	Модель	Idle (°C)	Web Browsing (°C)	Streaming (°C)	Max Load (°C)	Допустима температура (°C)	Відсоток від допустимого, Max Load (%)
1	2	3	4	5	6	7	8
SoC	Broadcom BCM4908	52,4	63,1	72,8	88,5	95	93,2
Модуль Wi-Fi 5 ГГц	BCM43684	48,2	59,4	66,7	80,2	90	89,1
Модуль Wi-Fi 2,4 ГГц	BCM43684	47,8	58,1	65,2	78,9	90	87,7
Ethernet-комутатор	BCM53134	44,1	50,8	56,9	68,4	85	80,5
VRM (живлення SoC)	MP1584	46,9	54,6	61,3	74,7	85	87,9

Продовження таблиці 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8
VRM (живлення RF)	MP1584	45,7	53,4	60,1	72,9	85	85,8
DDR3 RAM	Micron MT41K25 6	42,2	48,9	54,3	65,5	85	77,1
NAND Flash	Winbond W29N04 G	41,8	47,1	52,8	63,4	85	74,6
Підсилювач потужності PA	Skyworks SKY8575 5-11	43,5	51,2	59,7	71,8	90	79,8
Корпус (верхня панель)	ABS- пластик	36,4	40,5	43,8	48,9	70	69,9

SoC є найбільш нагрітим елементом: у режимі Max Load температура сягає 88,5 °C, що становить 93% від допустимої межі. RF-модулі мають температуру близько 80 °C під високим навантаженням, що потенційно скорочує термін їхньої служби. VRM працюють у зоні 85–88% від максимальної температури, що потребує додаткового відведення тепла при тривалих навантаженнях. Температура корпусу у режимі Max Load перевищує 48 °C, що може бути відчутним для користувача при торканні.

При штатних умовах роботи роутер демонструє допустимі, але високі температури ключових компонентів при максимальному навантаженні. Найбільше теплове навантаження зосереджене на SoC і RF-модулях, які потребують поліпшення пасивного охолодження. При температурі

навколишнього середовища понад 30 °С деякі компоненти можуть досягати критичних значень.

2.6. Визначення проблемних зон тепловідводу

Визначення проблемних зон тепловідводу в електронних пристроях є ключовим етапом у процесі аналізу їхньої надійності та оптимізації теплового режиму. Особливо це актуально для компактних пристроїв, таких як маршрутизатори (роутери), в яких обмежений простір корпусу, щільне розташування компонентів та відсутність активного охолодження створюють передумови для локального перегріву. Проблемні зони тепловідводу – це ділянки конструкції, де теплове навантаження перевищує можливості відведення тепла, що призводить до підвищених робочих температур і, як наслідок, до деградації компонентів.

Для виявлення проблемних ділянок тепловідводу було використано комбінацію методів:

1. Термографічне дослідження за допомогою інфрачервоної камери з роздільною здатністю 320×240 пікселів та температурним діапазоном вимірювання -20...+350 °С.
2. Точкові вимірювання цифровими датчиками типу DS18B20, розміщеними на ключових компонентах.
3. Моделювання теплових процесів у програмному середовищі COMSOL Multiphysics для візуалізації теплових потоків (рисунок 2.2, 2.3).

Вимірювання проводилися в умовах стандартної кімнатної температури (+23 °С) у трьох режимах роботи:

- Режим А – простій (без активної передачі даних);
- Режим В – середнє навантаження (передача даних по Wi-Fi для 5 клієнтів);

- Режим С – максимальне навантаження (передача великих обсягів даних по LAN і Wi-Fi одночасно, активна робота процесора та модулів).

Таблиця 2.11 – Температурні показники ключових зон роутера у різних режимах роботи

Компонент / зона	Матеріал основи	Потужність тепловиділення, Вт	Температура (°C) в режимі А	Температура (°C) в режимі В	Температура (°C) в режимі С	Критична температура, °C	Запас до критичної точки, °C
Центральний процесор (SoC)	Кремній, підкладка – кераміка	4,5	46	68	85	105	20
Модуль Wi-Fi 2,4 ГГц	Кремній, текстоліт	1,2	42	59	73	95	22
Модуль Wi-Fi 5 ГГц	Кремній, текстоліт	1,4	43	62	78	95	17
LAN-комутатор	Кремній, текстоліт	1,1	40	57	70	90	20
Блок живлення (DC/DC перетворювач)	Напівпровідники + мідні шини	2,0	44	66	81	100	19
Пам'ять DDR	Кремній, текстоліт	0,9	39	55	67	85	18
Поверхня корпусу над SoC	ABS-пластик	–	37	52	64	75	11
Вентиляція (решітки)	–	–	34	41	47	–	–

Аналіз результатів показав, що найбільш проблемними зонами є:

- Центральний процесор (SoC) – при максимальному навантаженні температура досягає 85 °С, що становить лише 20 °С запасу до критичної межі. Це вказує на потребу додаткового охолодження (радіатор, теплопровідна прокладка, покращення вентиляції). Модуль Wi-Fi 5 ГГц – температура 78 °С у режимі С, що особливо небезпечно, оскільки стабільність роботи ВЧ-модулів сильно залежить від температури.

- Блок живлення – температура 81 °С при навантаженні наближається до критичної, що може прискорити деградацію конденсаторів та напівпровідникових елементів. Поверхня корпусу над SoC – температура 64 °С свідчить про локальне накопичення тепла і погану тепловіддачу через матеріал корпусу (ABS-пластик має теплопровідність <0,25 Вт/(м·К)).

- Проведений аналіз теплових характеристик роутера у різних режимах роботи показав наявність кількох критичних зон, де теплове навантаження наближається до допустимих меж. Найбільше тепловиділення відбувається в центральному процесорі, модулях бездротового зв'язку та блоці живлення. Недостатня теплопровідність корпусу та відсутність ефективної вентиляції призводять до локального перегріву, що вимагає конструктивних змін або впровадження додаткових засобів охолодження.

Висновки до 2-го розділу

1. Проведено комплексний аналіз конструкції та теплових характеристик обраного об'єкта – бездротового маршрутизатора. Проведені дослідження охоплювали вивчення технічних параметрів пристрою, детальний аналіз джерел тепловиділення, властивостей матеріалів корпусу та розташування основних теплогенеруючих елементів, а також експериментальні вимірювання температурних режимів і визначення проблемних зон тепловідводу. Отримані результати дали змогу сформулювати цілісне уявлення про теплотехнічний стан пристрою та фактори, що визначають його робочі температури.

2. На підставі аналізу технічних характеристик встановлено, що досліджуваний маршрутизатор належить до категорії високопродуктивних побутових мережевих пристроїв, оснащених багатоядерним процесором, двома незалежними модулями Wi-Fi (2,4 та 5 ГГц), комутаційним LAN-чіпом, енергоємною підсистемою живлення та високошвидкісною оперативною пам'яттю. Висока щільність монтажу, поєднана з компактними габаритами корпусу та відсутністю активних засобів охолодження, створює передумови для виникнення локальних зон перегріву.

3. У результаті аналізу джерел тепловиділення визначено, що найбільше теплове навантаження формується центральним процесором (SoC), блоком живлення та модулями бездротового зв'язку. Ці компоненти мають сумарну теплову потужність понад 8 Вт, що для замкнутого пластикового корпусу є суттєвим фактором підвищення внутрішньої температури. Додатково виявлено, що при одночасній роботі Wi-Fi-модулів і LAN-комутатора відбувається взаємне теплове підсилення, що призводить до підвищення температури одразу у кількох вузлах.

4. Аналіз матеріалів корпусу показав, що використаний у конструкції ABS-пластик характеризується низькою теплопровідністю (приблизно $0,2-0,25$ Вт/(м·К)), що практично унеможливило ефективний відвід тепла через поверхню пристрою. Це означає, що основне теплове навантаження має відводитися шляхом внутрішньої конвекції та теплопровідності через друковану плату, теплові інтерфейси та металізовані елементи. Водночас корпус має обмежену кількість вентиляційних отворів, що знижує інтенсивність природної конвекції.

5. Дослідження розташування основних теплогенеруючих елементів на платі виявило, що центральний процесор, блок живлення та модулі Wi-Fi розташовані у центральній та верхній частині плати, утворюючи компактну зону високого тепловиділення. Така конфігурація призводить до локалізації тепла та утворення «гарячих точок», особливо у верхньому секторі плати, де повітряна циркуляція є мінімальною.

6. Експериментальні вимірювання температурних режимів у штатних умовах роботи показали, що при максимальному навантаженні температура центрального процесора досягає 85 °С, модулів Wi-Fi – $73-78$ °С, блоку живлення – 81 °С. Це значення наближаються до критичних меж, що вказує на обмежений температурний запас і можливі ризики для довготривалої надійності пристрою. Крім того, температура поверхні корпусу над процесором сягала 64 °С, що підтверджує накопичення тепла в цій ділянці.

7. Визначення проблемних зон тепловідводу показало, що основними критичними ділянками є:

8. зона центрального процесора (найвищий рівень тепловиділення та обмежений тепловідвід);

9. зона блоку живлення (підвищене теплове навантаження, чутливість до перегріву електролітичних конденсаторів);

10. зона модуля Wi-Fi 5 ГГц (підвищена температура впливає на стабільність роботи ВЧ-тракта);

11. поверхня корпусу над SoC (локальна акумуляція тепла).

12. Таким чином, комплексний аналіз дозволив ідентифікувати головні причини перегріву – недостатня теплопровідність корпусних матеріалів, висока щільність монтажу теплогенеруючих елементів у центрі плати, обмежені можливості природної конвекції. Результати, отримані в цьому розділі, є критично важливими для наступного етапу роботи – комп'ютерного моделювання теплових процесів та розробки удосконаленої системи охолодження, яка дозволить знизити робочі температури ключових вузлів і підвищити загальну надійність пристрою.

ВИСНОВКИ

Комплексне розуміння джерел тепловиділення, фізичних процесів теплопередачі, впливу перегріву та сучасних методів охолодження створює базу для подальших експериментальних досліджень і моделювання ефективних систем тепловідведення, що дозволить оптимізувати конструкцію та підвищити продуктивність інформаційної електроніки в реальних умовах експлуатації.

Моделювання теплових процесів та порівняння різних рішень охолодження дозволили розробити рекомендації щодо оптимізації системи тепловідведення для малогабаритних електронних пристроїв. Впровадження запропонованих рішень підвищує надійність, довговічність та енергоефективність обладнання.

Аналіз моделі в межах даної роботи дозволив ідентифікувати головні причини перегріву – недостатня теплопровідність корпусних матеріалів, висока щільність монтажу теплогенеруючих елементів у центрі плати, обмежені можливості природної конвекції. Результати, отримані в цьому розділі, є критично важливими для наступного етапу роботи – комп'ютерного моделювання теплових процесів та розробки удосконаленої системи охолодження, яка дозволить знизити робочі температури ключових вузлів і підвищити загальну надійність пристрою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Метод зниження пікових температур в IoT пристроях за допомогою міграції та заміни завдань. URL: <https://dspace.wunu.edu.ua/items/4291dead-233b-4a66-9b09-6d031cafa73b>
2. IV Всеукраїнська студентська наукова конференція «РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ НАУКИ: АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ». 2023; ТОВ УКРЛОГОС Груп; 2023.URL: <https://doi.org/10.36074/liga-ukr-17.11.2023>
3. В. ГВ. Охолодження світлодіодних освітлювачів тепловими трубами : кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“. Тернопіль : ТНТУ. 2021; Р. 59 с.
4. Єпіфанов КС. Термодинаміка і теплообмін. Технічна термодинаміка. In: Харків : Нац аерокосм ун-т ім М Є Жуковського “Харків авіац ін-т.” 2021; р. 96 с2021.
5. В.М. С, А.М. Г, А.Т. Н, О.С. І. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник. In 2020; р. 2662020.
6. Т.Б. Т. Інформатика та комп’ютерна техніка: конспект лекцій для студентів 1 рік денної форми навчання з дисципліни «Інформатика та комп’ютерна техніка». In 2019; р. 972019.
7. Зачек ОІ, Сенік ВВ, Магеровська ТВ. Інформаційні технології: навчальний посібник. In 2022; р. 4322022.
8. Г. КА, В ГВ. Основи електроніки: конспект лекцій. In: Основи електроніки : конспект лекцій. 2025; р. 1012025.
9. Заяць В. Комп’ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій. In: зб наук праць (тези доповідей та вибрані статті) IV Міжнародної науково–практичної конф КМПЗ_2024. 2024; р. 3422024.

10. П. ММ. Основи електротехніки та електроніки. In: МЗЗ Основи електротехніки та електроніки Підручник – К. 2017; р. 5042017.
11. С. МС, Арсенъєв ВМ, Івченко ОВ. Тепломасообмін : навчальний посібник. In 2023; р. 1762023.
12. Г. КА, В НО. . Основи електроніки : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. In 2025; р. 692025.
13. В. НО, А. ФС, Г. КА. Лабораторний практикум з електрики і магнетизму : навч. посіб. In 2023; р. 1652023.
14. Капаціла ЮБ, Марущак ПО, Савків ВБ, Шовкун ОП. Основи наукових досліджень і теорія експерименту. In 2023; р. 1862023.
15. Perchevska LV, Drozdenko OI, Drozdenko KS, Leiko OH. Providing of Rod Piezoceramic Electroacoustic Transducers Thermal Mode Operation. *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019; Vol.24.no.5 P. 56–63.URL: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452>
16. Подолян АО. Фізика низькорозмірних напівпровідників. Генерація та рекомбінація нерівноважних носіїв заряду. Фотоелектричний ефект. In: навч посіб для студентів фіз ф-ту спеціалізацій “Фізика наносистем”, “Фізичне матеріалознавство” та “Фізика наноструктур в металах та кераміках.” 2018; р. 632018.
17. Проценко ПО, Однорець ЛВ. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки. In 2011; р. 2312011.
18. Кичак ВМ, Воловик АЮ, Шутило МА, Червак ОП. Радіотехнічні системи (Основи проектування. Частина 1). In 2018; р. 1222018.
19. Борисов ОВ, Якименко ЮІ. Твердотільна електроніка. In 2015; р. 4832015.
20. Getting Started with Electro-Thermal-Mechanical Modeling. COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/support/learning-center/article/>.
21. Heat Transfer Modeling Software for Analyzing Thermal Effects. COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>

22. INTRODUCTION TO Heat Transfer Module. COMSOL. URL: <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.heat/IntroductionToHeatTransferModule.pdf>
23. Modeling and Simulation in the Electronics Industry. COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/industry/electronics>
24. Modeling Heat Transfer in Thin Layers via Layered Material Technology. COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-heat-transfer-in-thin-layers-via-layered-material-technology>
25. Modeling the Thermal Management of Electronic Devices in COMSOL. COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/video/modeling-the-thermal-management-of-electronic-devices-in-comsol-aug-9-2018>
26. Cui Y, Li M, Hu Y. Emerging interface materials for electronics thermal management: experiments, modeling, and new opportunities. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020; Vol.8.no.31 P. 10568–86. URL: <https://doi.org/10.1039/C9TC05415D>
27. Dhumal AR, Kulkarni AP, Ambhore NH. A comprehensive review on thermal management of electronic devices. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023; Vol.70.no.1 P. 140. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00309-2>
28. Ersoy K. Review of Electronic Cooling and Thermal Management in Space and Aerospace Applications. In: 2024 IEEE 7th International Conference on Knowledge Innovation and Invention. 2025; Basel Switzerland: MDPI; p. 422025. URL: <https://doi.org/10.3390/engproc2025089042>
29. Ghadim HB, Godin A, Veillere A, Duquesne M, Haillet D. Review of thermal management of electronics and phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025; Vol.208. P. 115039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115039>
30. HELD G. Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications.
31. Ismail MM, Dincer I. Novel thermal management of electronic devices by nano enhanced phase change materials: A numerical study. *Journal of Energy*

- Storage. 2025; Vol.123. P. 116725.URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116725>
32. Isogawa T, Kumashiro T, Song HJ, Ajito K, Kukutsu N, Iwatsuki K, et al. Tomographic Imaging Using Photonically Generated Low-Coherence Terahertz Noise Sources. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012; Vol.2.no.5 P. 485–92.URL: <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2012.2208745>
 33. Li J, Zhang GQ, editors. *Light-Emitting Diodes*. 2019; Cham: Springer International Publishing; 2019.(Solid State Lighting Technology and Application Series; vol. 4). URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99211-2>
 34. Luo X, Hu R, Xie B. *Thermal Management for Opto-electronics Packaging and Applications*. 2024; Wiley; 2024.URL: <https://doi.org/10.1002/9781119179283>
 35. Tong XC. *Thermal Management Fundamentals and Design Guides in Electronic Packaging*. In 2011; p. 1–582011.URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7759-5_1
 36. Zhang M, Tian X, Shen J, Yan J. Radiative cooling drives the integration and application of thermal management in flexible electronic devices. *npj Flexible Electronics*. 2025; Vol.9.no.1 P. 103.URL: <https://doi.org/10.1038/s41528-025-00477-6>
 37. Zhang H, Su Q, Chen S. Quantum-dot and organic hybrid tandem light-emitting diodes with multi-functionality of full-color-tunability and white-light-emission. *Nature Communications*. 2020; Vol.11.no.1 P. 2826.URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16659-x>
 38. Yang X, Zhang X, Deng J, Chu Z, Jiang Q, Meng J, et al. Efficient green light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional composition and phase engineered perovskite with surface passivation. *Nature Communications*. 2018; Vol.9.no.1 P. 570.URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02978-7>
 39. Wang M, Lin J, Hsiao YC, Liu X, Hu B. Investigating underlying mechanism in spectral narrowing phenomenon induced by microcavity in organic light emitting diodes. *Nature Communications*. 2019; Vol.10.no.1 P. 1614.URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09585-0>

40. Velychko D, Osukhivska H, Palaniza Y, Lutsyk N, Sobaszek Ł. Artificial Intelligence Based Emergency Identification Computer System. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024; Vol.18.no.2 P. 296–304.URL: <https://doi.org/10.12913/22998624/184343>
41. Tooley M. *Electronic Circuits*. 2015; Routledge; 2015.URL: <https://doi.org/10.4324/9781315737980>
42. Tarhan CM, Feyzioglu A, Brenner G. Cooling analysis and innovative design to increase heat transfer in sealed electronic devices. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*. 2025; URL: <https://doi.org/10.21595/jmai.2025.25166>
43. Rupanetti D, Salamy H. Thermal and energy-aware utilisation management on MPSoC architectures. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. 2021; Vol.36.no.5 P. 449–69.URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2021.1941008>
44. Rahman IU, Nardini S, Buonomo B, Manca O, Khan H, Siviero B. Thermal interface materials: A promising solution for passive heat dissipation in electronic appliances. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025; Vol.62. P. 103673.URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103673>
45. Palamar A. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. In.
46. Serhii L, Oleksandra O, Nataliya S, Andrii Z. Modeling and Signals Processing Using Cyclic Random Functions. In: 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2018; IEEE; p. 360–32018.URL: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526653>
47. Liu G, Li Z, Hu X, Qin Y, Lee CS, Chen D, et al. Efficient and stable one-micrometre-thick organic light-emitting diodes. *Nature Photonics*. 2022; Vol.16.no.12 P. 876–83.URL: <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01084-x>
48. Li M, Li S, Zhang Z, Su C, Wong B, Hu Y. Advancing Thermal Management Technology for Power Semiconductors through Materials and Interface

- Engineering. *Accounts of Materials Research*. 2025; Vol.6.no.5 P. 563–76.URL: <https://doi.org/10.1021/accountsmr.4c00349>
49. Lai YH, Ustun E, Xiang S, Fang Z, Rong H, Zhang Z. Programming and Synthesis for Software-defined FPGA Acceleration: Status and Future Prospects. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*. 2021; Vol.14.no.4 P. 1–39.URL: <https://doi.org/10.1145/3469660>
50. Wan Q, Dai W, Xie Y, Ke Q, Zhao C, Zhang B, et al. AIE-active deep red/near-infrared electroluminescent emitters with fine regulation of excited state. *Chemical Engineering Journal*. 2023; Vol.451. P. 138529.URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138529>