

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК
«__» _____ 20__ р.

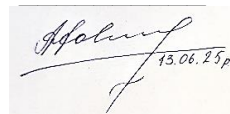
**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему «Забезпечення нормального теплового режиму модуля
РЕБ»**

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи РЕ-11

Солонар Ярослав Володимирович



Керівник: Ст. викладач Новосад Андрій Анатолійович



Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент: Сушко Олександр Юрійович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,

освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Солонар Ярослав Володимирович
(Прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема роботи **«Забезпечення нормального теплового режиму модуля РЕБ»**

керівник роботи **Новосад Андрій Анатолійович** Ст. викладач

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

затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. №1840-с

2. Строк подання студентом роботи 09.06.2025року _____

3. Вихідні дані до роботи Тривимірна модель модулю РЕБ, параметри генератора шуму: 120 Вт, ККД 40%

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)_

Розділ 1. Загальні положення та постановка задачі теплового дослідження.

Розділ 2. Теоретичні основи теплового моделювання та особливості РЕБ.

Розділ 3. Підготовка до теплового моделювання та особливості роботи з Flow Simulation.

Розділ 4. Аналіз результатів теплового моделювання.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): Презентація

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2025 року

Календарний план

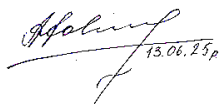
№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	14.04.2025	
2	Вивчення теоретичного матеріалу	20.04.2025	
3	Дослідження пристрою	01.05.2025	
4	Підготовка та налаштування симуляцій	15.05.2025	
5	Проведення симуляцій	25.05.2025	
6	Аналіз результатів	03.06.2025	
7	Оформлення ПЗ	09.06.2025	

Студент



Солоняр Ярослав Володимирович

Керівник



Новосад Андрій Анатолійович

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота на тему «Забезпечення нормального теплового режиму модуля РЕБ» присвячена дослідженню теплових процесів у модулі радіоелектронної боротьби та оптимізації конструктивних рішень для ефективного охолодження. Обсяг роботи становить 77 сторінок. Робота містить 34 ілюстрацій, 1 додаток, перелік із 4 джерел.

Метою дослідження є аналіз теплового режиму модуля РЕБ за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks Flow Simulation, з метою виявлення «вузьких» місць системи охолодження та оптимізації її конструктивних параметрів. У роботі описано об'єкт дослідження — модуль РЕБ з внутрішнім і зовнішнім охолодженням, джерелами тепловиділення ($\approx 70\text{--}80\text{ Вт}$), алюмінієвим корпусом і вентилятором. Проведено чисельне моделювання температурного розподілу, потоків повітря та теплових полів.

Отримані результати дозволили визначити вплив окремих елементів конструкції на тепловий режим, перевірити ефективність природного та примусового охолодження, а також запропонувати удосконалення корпусу для зменшення перегріву. Практична значущість роботи полягає у можливості використання результатів при розробці та модернізації військових систем РЕБ. Результати моделювання підтверджені експериментально. Аспекти роботи можуть бути використані у майбутніх публікаціях або проєктних розробках.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба, тепловий режим, охолодження, моделювання, SolidWorks, температурне поле, тепловиділення, конвекція, теплопровідність, симуляція, теплове навантаження, РЕБ, теплові втрати, військова техніка, CFD-аналіз.

ABSTRACT

The diploma work on “Ensuring the normal thermal regime of the electronic warfare module” is devoted to the study of thermal processes in the electronic warfare module and the selection of design solutions for effective cooling. The volume of the work is 77 pages. The work contains 34 illustrations, 1 appendix, a list of 4 sources.

The aim of the study is to analyze the thermal regime of the electronic warfare module using computer modeling in the SolidWorks Flow Simulation environment in order to identify the bottlenecks of the cooling system and optimize its design parameters. The paper describes the object of study - an ESS module with internal and external cooling, heat sources (≈ 70 -80 W), an aluminum case, and a fan. Numerical modeling of temperature distribution, air flows, and thermal fields was performed.

The results obtained allowed us to determine the influence of individual structural elements on the thermal regime, to test the effectiveness of natural and forced cooling, and to propose improvements to the case to reduce overheating. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results in the development and modernization of military electronic warfare systems. The modeling results have been confirmed experimentally. Aspects of the work can be used in future publications or project developments.

Keywords: electronic warfare, thermal regime, cooling, modeling, SolidWorks, temperature field, heat generation, convection, thermal conductivity, simulation, thermal load, electronic warfare, heat losses, military equipment, CFD analysis.

ЗМІСТ

<u>ВСТУП</u>	6
<u>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТЕПЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ</u>	8
<u>1.1 Актуальність теми</u>	8
<u>1.2 Мета і завдання дослідження</u>	9
<u>1.3 Предмет та об'єкт дослідження</u>	10
<u>1.4 Методи досліджень</u>	11
<u>1.5 Аналіз актуальних рішень у галузі теплового моделювання</u>	13
<u>1.6 Практична підготовка до дослідження</u>	16
<u>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РЕБ</u>	17
<u>2.1 Загальні положення щодо охолодження електроніки</u>	17
<u>2.2 Основні механізми теплопередачі</u>	18
<u>2.3 Типи систем охолодження</u>	20
<u>2.4 Особливості охолодження пристроїв РЕБ</u>	23
<u>2.5 Призначення та будова модуля РЕБ</u>	25
<u>2.6 Аналіз тепловиділення в модулі РЕБ</u>	26
<u>2.7 Вимоги до температурного режиму роботи пристрою</u>	28
<u>РОЗДІЛ 3. ПІДГОТОВКА ДО ТЕПЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ З FLOW SIMULATION</u>	31
<u>3.1 Огляд та аналіз геометрії</u>	31
<u>3.2 Підготовка геометрії до симуляції</u>	33

3.3	<u>Загальні налаштування</u>	34
3.4	<u>Налаштування вхідних даних</u>	41
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕПЛОВОГО		
<u>МОДЕЛЮВАННЯ</u>		48
4.1	<u>Аналіз початкової конфігурації модуля РЕБ</u>	48
4.2	<u>Вплив окремих елементів конструкції на тепловий режим</u> ..	50
4.3	<u>Оптимізація розмірів корпусу з використанням</u> <u>поліноміальної регресії</u>	52
4.4	<u>Графічна інтерпретація результатів</u>	56
4.5	<u>Експериментальна оцінка удосконаленої конструкції</u>	58
<u>ВИСНОВКИ</u>		65
<u>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</u>		67
<u>ДОДАТОК А</u>		68
<u>ДОДАТОК Б</u>		69

ВСТУП

Електронні засоби зв'язку та протидія ним активно розвиваються, що, в свою чергу, ускладнюють їх конструкцію, підтримку, та забезпечення довгої працездатності. Зі збільшенням можливостей електронних засобів зростає також і необхідна потужність та тепловіддача, що негативно впливає на надійність пристроїв. Особливо це питання постає в контексті систем спеціалізованого призначення, таких як модулі радіоелектронної боротьби (РЕБ), умови використання яких вимагають щільного компонування, та забезпечення правильного теплового режиму.

Модулі РЕБ характеризуються високою тепловіддачею, що змушує інженерів враховувати всі можливі фактори, та детально аналізувати умови забезпечення їхнього охолодження. Для досягнення високої надійності та стабільності пристроїв, типові методи охолодження можуть бути неактуальні.

Рішення може бути у використанні оптимальних конструктивних рішень, які враховуватимуть специфіку компонентів, їхнє розміщення та особливості експлуатаційних умов. Сучасним інструментом для дослідження теплової поведінки пристрою без фізичного прототипу може бути комп'ютерне моделювання.

Дана дипломна робота зосереджена на дослідженні системи охолодження РЕБ з метою виявлення конструктивних рішень які не є ефективними, або негативно впливають на всю систему охолодження. Дослідження виконувалось з використанням CAD програми SolidWorks з доповненням FlowSimulation, та візуалізацією температурних полів, потоків повітря, та розсіювань тепла по елементам конструкції. За

результатами досліджень буде запропоновано ефективне рішення проблем конструкції.

Отримані в процесі практичної підготовки навички 3D-моделювання в середовищі SolidWorks під час проходження практики на підприємстві, яке спеціалізується на підготовці авто до професійного автоспорту в сфері дрифту, стали основою для реалізації комп'ютерного моделювання у цій дипломній роботі.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТЕПЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Актуальність теми

Хоч війна між Україною та росією триває з 2014 року, з початком повномасштабного вторгнення у 2022 році багато сфер життя кардинально змінилися, зокрема й підходи до ведення бойових дій. На передовій тепер використовуються не лише звичні для нас артилерія, стрілецька зброя, та піхота, а й сучасні технології: дрони, супутниковий зв'язок, GPS-навігація, засоби радіоуправління тощо. Водночас зростає й роль систем, що протидіють цим технологіям, а саме систем радіоелектронної боротьби.

Модулі РЕБ створені для того, щоб глушити сигнали ворога, збивати навігацію, перешкоджати зв'язку або керуванню дронами. Вони стали невід'ємною частиною сучасного поля бою. Так як такі пристрої під час роботи сильно нагріваються, особливо в умовах активного використання, має враховуватись правильний тепловий режим. Якщо не забезпечити нормальне охолодження — модуль може вийти з ладу просто під час виконання завдання, і це може призвести до втрати техніки чи навіть людей.

Важливо розуміти, що ці модулі часто працюють у закритих корпусах, під прямим сонцем, за високої температури, пилу, вібрацій та обмеженої вентиляції. Тому для їх нормальної роботи потрібно заздалегідь продумати, як ефективно відводити тепло. Це стосується не лише промислових рішень, а й відносно невеликих українських виробників, які зараз розробляють і постачають засоби РЕБ військам. Дуже важливо щоб конструкція була простою, надійною, і не дорогою, ці характеристики можуть дати перевагу в бою.

Тема цієї дипломної роботи є актуальною так як вона стосується створення системи охолодження для модуля РЕБ, яка має забезпечити стабільну роботу пристрою навіть у складних умовах, що є критично важливим в збереженні особистого складу та техніки. Результати такого дослідження можуть бути корисні як для навчання, так і для реального використання в умовах війни та в подальших модифікаціях пристроїв.



Рис. 1.1 — Демонстрація пристрою РЕБ

1.2 Мета і завдання дослідження

Метою даної дипломної роботи є дослідження теплового режиму електронного модуля радіоелектронної боротьби за допомогою комп'ютерного моделювання на основі готової конструктивної моделі. Аналіз спрямований на оцінку ефективності існуючої системи охолодження, яка поєднує внутрішні та зовнішні радіатори, вентилятор і алюмінієвий корпус як теплопровідний елемент.

У процесі дослідження розглядаються умови роботи пристрою за реального теплового навантаження, яке відповідає режимам роботи модулів РЕБ, що використовуються в сучасних зразках військової техніки. Робота включає перевірку теплової поведінки корпусу та внутрішніх компонентів, визначення зон підвищених температур, напрямків теплового потоку та рівня тепловіддачі з поверхонь корпусу.

Результати моделювання дозволять оцінити працездатність конструкції в контексті теплового навантаження, а також сформулювати висновки щодо доцільності подальшої оптимізації системи охолодження або внесення змін до її елементів. Особлива увага приділяється забезпеченню теплової стабільності та відповідності граничним температурним нормам, що є критично важливим для підтримання надійності електронних систем в умовах реальної експлуатації.

1.3 Предмет та об'єкт дослідження

Предметом досліджень є готова конструкція засобу радіоелектронної боротьби, який потребує стабільного теплового режиму для забезпечення тривалої працездатності. Конструкція складається з корпусу, на якому прикріпленні зовнішні та внутрішні радіатори, DC-DC конвертер з радіатором, який також виконує роль у відведенні тепла від модуля генератора шуму(ГШ), вентилятор який ганяє повітря всередині корпусу по колу, та сам модуль ГШ, який однією стороною прикріплений до корпусу, і до іншої сторони прикріплений додатковий внутрішній радіатор.

Об'єктом дослідження виступає процес тепловідведення в конструкції даного модуля, який реалізується за допомогою поєднання

внутрішніх та зовнішніх радіаторів, на теплопровідному алюмінієвому корпусі та вентилятора всередині. Дослідження охоплює розподіл температурних полів, поведінку повітряного потоку всередині корпусу, ефективність тепловіддачі та взаємодію між компонентами, а саме модуля генератора шуму та системи охолодження.

1.4 Методи досліджень

Дослідження теплових режимів електронного модуля може виконуватись за допомогою різних методів: аналітичний, експериментальний та чисельне моделювання. У кожного з них є свої переваги й недоліки, які враховують й аналізуються при виборі певного підходу.

Аналітичний метод це класичний розрахунок за допомогою рівнянь та законів теплопередачі (рівняння теплопровідності Фур'є, закони Ньютона та Стефана-Больцмана). Вони дають швидке загальне уявлення про теплові процеси, проте мають низку обмежень: складність застосовувати для складних геометрій та умов, в яких присутні комбіновані режими теплопередачі на кшталт провідності, конвекції та випромінювання.

Експериментальний метод передбачає створення фізичного прототипу пристрою, встановлення датчиків температури та проведення вимірювань в реальних або наближених до реальних умовах. Перевагою такого підходу є дуже точні результати вимірювань, але так як створюється фізичний прототип, ціна і швидкість внесення змін за потреби робить його складнішим в порівнянні з іншими методами, також варто враховувати і потребу в різноманітному лабораторному обладнанні. Такий тип дослідження

підходить на фінальних стадіях розробки пристроїв.

Метод комп'ютерного моделювання. Цей підхід забезпечує оптимальний баланс між точністю, гнучкістю та економічністю. Він дозволяє врахувати геометричні особливості конструкції, характеристики матеріалів, параметри вентиляції, теплового навантаження та багато інших аспектів без необхідності виготовлення реального пристрою.

Серед переваг чисельного моделювання можна виділити :

- можливість швидкої перевірки кількох варіантів конструкції;
- візуалізація температурних полів, потоків повітря, зон перегріву;
- автоматизований розрахунок теплових і гідродинамічних характеристик;
- економія часу та коштів порівняно з фізичним тестуванням.

Проте обмеження методу пов'язані з точністю вихідних даних (теплові характеристики компонентів, реальні втрати потужності), правильністю постановки граничних умов, а також потребою у валідації результатів при можливості наявності експериментальних даних дасть змогу нам порівняти 2 методи досліджень.

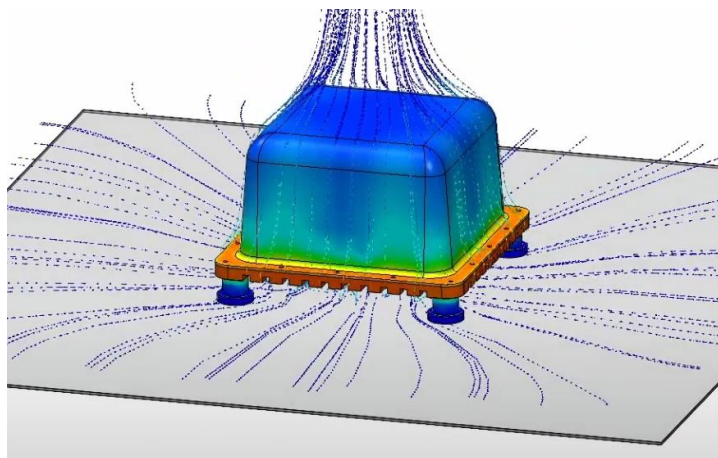


Рис. 1.2 — Демонстрація симуляції

Метод дослідження	Переваги	Недоліки
Аналітичний	Швидкі розрахунки, базові оцінки без ПЗ	Не враховує складну геометрію та умови
Експериментальний	Реальні результати, висока точність вимірювань	Потребує лабораторії, часу й ресурсів
Чисельне моделювання	Гнучкість і точність, можливість дослідження складних систем	Потребує ПЗ, ресурсів і правильного налаштування

Рис. 1.3 — Огляд методів

У ході дослідження була використана вже підготовлена 3Д модель РЕБ-а, в якій задані всі основні елементи системи охолодження. Знаючи теплову потужність модуля, властивості матеріалів, параметри вентилятора та умови навколишнього середовища було проведено симуляцію. Результати симуляції дали змогу оцінити ефективність охолодження і зробити висновки щодо працездатності конструкції без потреби у фізичному прототипі.

1.5 Аналіз актуальних рішень у галузі теплового моделювання

В сучасному світі спостерігається активне зростання потреби в точному тепловому аналізі при проєктуванні електронних пристроїв, особливо у сфері спеціалізованого обладнання, де мова йде про високу щільність елементів, значні теплові навантаження та обмежений простір. Це підштовхнуло науковців на вдосконалення різноманітних програмних рішень, які дозволятимуть здійснювати моделювання температурних режимів без необхідності створення фізичних прототипів.

Найбільш відомими по функціоналу програмами є **ANSYS Fluent**, **Autodesk CFD**, **COMSOL Multiphysics**, **Simcenter STAR-CCM+**, а також немало вузькоспеціалізованих пакетів, призначених для електроніки, наприклад **Flotherm** чи **Icepak**. Ці системи орієнтовані на глибоке моделювання складних процесів: турбулентного потоку,

випромінювання, фазових переходів, багатофазних середовищ тощо. Вони дають змогу отримати високу точність розрахунків, але потребують значного досвіду користувача, тривалого часу на підготовку моделі, а також доступу до потужного апаратного забезпечення.

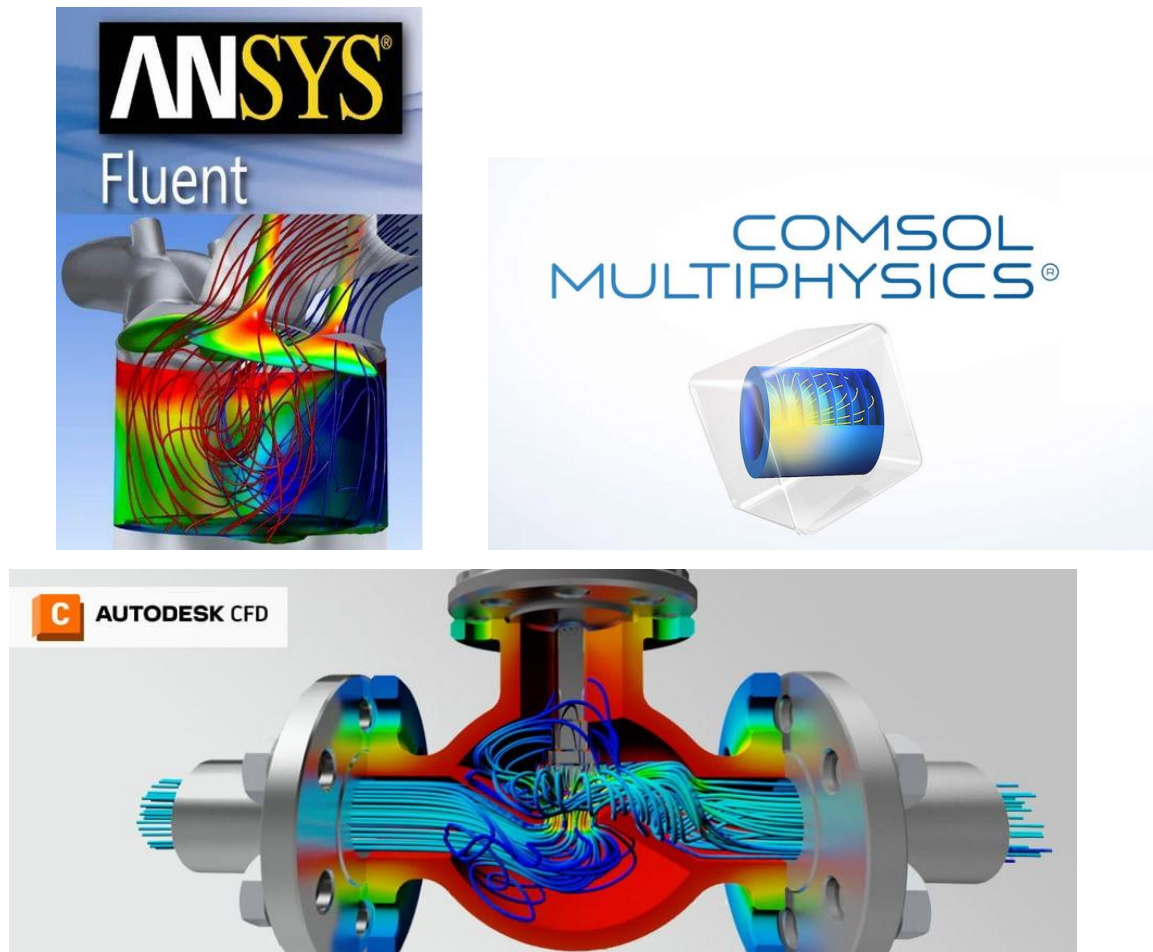


Рис 1.4 — Приклади середовищ моделювання

Також існують **інтегровані рішення**, вбудовані в CAD-системи. **SolidWorks Flow Simulation** — це додаток, який працює безпосередньо на основі 3D-моделі, створеної в середовищі SolidWorks, і орієнтований на швидке моделювання процесів теплопереносу та руху рідин або газів. Його застосування є доречним, коли необхідно

дослідити розподіл температур у межах механічної конструкції, виявити теплові втрати, перегріті ділянки, а також перевірити загальну ефективність системи охолодження.



Рис 1.5 — Обране середовище моделювання

Основними перевагами SolidWorks Flow Simulation є:

- безпосередня інтеграція з геометрією без необхідності експорту та ручної адаптації моделі;
- доступність інтерфейсу та проста логіка налаштування симуляції, зручна для інженера-практика;
- швидке отримання візуальних результатів, таких як: температурні карти, вектори потоків, діаграми теплового навантаження, середні значення.

З недоліків можна виділити зокрема обмеженість фізичних моделей порівняно з іншими більш складними пакетами, це може вплинути на точність результатів у випадках із нестандартними або багатофазними умовами. Проте для завдань, пов'язаних із тепловим аналізом у межах корпусів електронних пристроїв, що охолоджуються вентилятором і радіаторами, можливостей SolidWorks Flow Simulation є цілком достатньо.

У межах дипломної роботи було вибрано саме Solidworks FlowSimulation по наступній причині: він дозволяє отримати якісний і візуально зрозумілий результат у стислі терміни, не потребує надскладного налаштування, в порівнянні з вище переліченими засобами, а також забезпечує прямий зв'язок з наявною CAD-моделлю пристрою. Це дає змогу зосередитись саме на аналізі теплового стану конструкції, не витрачаючи додатковий час на адаптацію під інші програмні середовища.

1.6 Практична підготовка до дослідження

У процесі проходження виробничої практики на підприємстві, яке спеціалізується на технічному проєктуванні та підготовці гоночної техніки до професійного автоспорту в сфері дрифту, було отримано практичні навички роботи з програмним забезпеченням **SolidWorks**. У рамках практичної діяльності здійснювалося створення просторових моделей, створення тривимірних моделей окремих деталей пристрою, формування складальних одиниць, креслень і виконання базового аналізу механічної поведінки компонентів. Досвід та навички отримані на підприємстві стали корисними при підготовці до моделювання в рамках дипломної роботи, оскільки дозволили швидко орієнтуватися в середовищі SolidWorks, грамотно працювати з 3D-моделлю та підготувати геометрію до теплового аналізу в модулі Flow Simulation.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РЕБ

2.1 Загальні положення щодо охолодження електроніки

Побудова ефективної системи охолодження електронних пристроїв вимагає ґрунтового розуміння фізичних процесів, пов'язаних із тепловиділенням та теплопереносом. Для забезпечення надійної роботи радіоелектронної апаратури, зокрема модулів радіоелектронної боротьби, необхідно враховувати цілу низку факторів — починаючи від характеристик матеріалів і типу розміщення компонентів, і завершуючи вибором способу охолодження, адаптованого до умов експлуатації.

Цей розділ містить теоретичне обґрунтування процесів, що мають ключове значення для моделювання температурного режиму в електроніці. Розглянуто загальні положення щодо охолодження, основні механізми теплопередачі, класифікацію систем охолодження та специфіку забезпечення теплового режиму у модулях РЕБ. Окрему увагу приділено тепловим характеристикам конструкції, що досліджується, та вимогам до температурного режиму її роботи. Усі ці аспекти створюють методичну основу для подальшого комп'ютерного моделювання й аналізу ефективності тепловідведення.

У процесі функціонування електронних пристроїв частина електричної енергії неминуче перетворюється на тепло. Це тепло генерується в активних елементах — транзисторах, мікросхемах, процесорах, силових модулях тощо. У разі його накопичення або недостатнього відведення температура компонентів може перевищити допустимі межі, що призводить до зниження швидкодії, втрати

стабільності, деградації матеріалів, а в критичних випадках — до повної відмови системи.

Забезпечення ефективного тепловідведення стало одним із ключових завдань у сучасному проектуванні електроніки, особливо в умовах зростання потужності елементів і зменшення їхніх габаритів. Надійна система охолодження дозволяє підтримувати робочу температуру елементної бази в межах технічних норм, продовжуючи термін служби пристрою та забезпечуючи його стабільну роботу.

Охолодження електроніки реалізується через поєднання процесів теплопровідності, конвекції та іноді теплового випромінювання. Вибір конкретного рішення залежить від кількох факторів: потужності тепловиділення, компоновки пристрою, матеріалів корпусу, умов навколишнього середовища та обмежень за вагою, розмірами і шумом.

У практиці проектування радіoeлектронних засобів, особливо військового призначення, охолодження повинно бути не лише ефективним, але й надійним, малочутливим до зовнішніх впливів і простим в обслуговуванні. Тому на етапі розробки конструкції охолодження важливо враховувати не лише теплові характеристики, а й механічну міцність, герметичність та технологічність виготовлення.

Таким чином, охолодження є невід’ємною частиною забезпечення працездатності електронних пристроїв, а його правильне проектування потребує як теоретичних знань з теплопереносу, так і практичного досвіду розробки технічних рішень.

2.2 Основні механізми теплопередачі

Процеси теплопереносу лежать в основі будь-якої системи охолодження електроніки. Тепло, що виникає внаслідок роботи

активних елементів, має бути ефективно відведеним з місця його утворення до навколишнього середовища. Для цього використовуються три основні фізичні механізми передачі теплоти: теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання.

Теплопровідність (кондукція) — це процес переносу теплової енергії від ділянок з вищою температурою до ділянок із нижчою температурою в межах твердого тіла або між тілами, що мають контакт. У електроніці теплопровідність відповідає за відведення тепла від мікросхем, транзисторів, силових модулів до корпусу або тепловідвідних елементів, таких як радіатори або теплорозподільчі пластини. Ефективність цього процесу визначається коефіцієнтом теплопровідності матеріалу. Наприклад, мідь і алюміній є найпоширенішими матеріалами у конструкціях охолодження завдяки високим значенням теплопровідності (більше 200 Вт/м·К).

Конвекція — це передача тепла між тілом та рідиною або газом, що його омиває. В електроніці, як правило, йдеться про повітря, яке циркулює навколо елементів. Конвекція може бути:

- **Природною** — виникає внаслідок різниці густини нагрітого і холодного повітря, що створює слабкий потік.
- **Примусовою** — створюється за допомогою вентиляторів або турбін, які забезпечують направлений інтенсивний потік повітря для більш ефективного відведення тепла.

У випадку примусової конвекції коефіцієнт тепловіддачі зростає в кілька разів у порівнянні з природною. Саме тому більшість сучасних модулів із високим тепловиділенням комплектуються вентиляторами або інтегрованими системами охолодження.

Теплове випромінювання — це перенесення теплової енергії за рахунок електромагнітного випромінювання, без потреби у фізичному середовищі. Хоча цей механізм є менш ефективним при низьких температурах, при підвищенні температури елементів його внесок у загальний тепловий баланс зростає. Для підвищення ефективності випромінювання іноді використовуються покриття з високою емісійною здатністю, особливо в пристроях, що працюють у закритих або вакуумних середовищах.

На практиці в охолодженні електроніки ці механізми поєднуються.

Наприклад:

1. Тепло від мікросхеми передається через теплопровідний шар (теплопровідність),
2. потім проходить до радіатора,
3. звідки відводиться вентилятором (конвекція),
4. і частково випромінюється в інфрачервоному діапазоні (випромінювання).

2.3 Типи систем охолодження

У сучасному проектуванні електроніки існує широкий спектр систем охолодження, які класифікуються за принципом дії, конструктивними особливостями та сферою застосування. Основні типи систем охолодження включають:

Пасивне охолодження

Пасивні системи охолодження не мають рухомих частин і працюють за рахунок природної конвекції та теплопровідності.

Основними елементами таких систем є радіатори, теплові трубки та теплові розсіювачі. Вони характеризуються простотою конструкції, відсутністю шуму та високою надійністю. Проте ефективність пасивного охолодження обмежена, що робить його придатним переважно для малопотужних пристроїв або в умовах, де активне охолодження неможливе.

Активне охолодження

Активні системи охолодження використовують додаткові елементи, такі як вентилятори або насоси, для примусового відведення тепла. Це дозволяє ефективно охолоджувати високопродуктивні компоненти, такі як процесори, графічні карти та силові модулі. Активне охолодження забезпечує вищу ефективність порівняно з пасивним, але супроводжується підвищеним рівнем шуму, споживанням енергії та потребою в регулярному обслуговуванні.

Комбіноване охолодження

Комбіновані системи охолодження поєднують елементи пасивного та активного охолодження. Наприклад, радіатор (пасивний елемент) може бути оснащений вентилятором (активний елемент) для покращення тепловідведення. Такий підхід дозволяє оптимізувати баланс між ефективністю, шумом та енергоспоживанням.

Рідинне охолодження

Рідинні системи охолодження використовують теплоносій (зазвичай воду або спеціальні рідини) для відведення тепла від джерела до радіатора або теплообмінника. Ці системи забезпечують високу ефективність охолодження і застосовуються в потужних комп'ютерах,

серверних установках та промисловому обладнанні. Недоліками є складність конструкції, вища вартість та потреба в обслуговуванні .

Випарне охолодження

Випарні системи охолодження базуються на принципі випаровування рідини (зазвичай води), яка поглинає тепло з навколишнього середовища, знижуючи температуру. Такі системи використовуються в градирнях, системах кондиціонування у спекотному кліматі та промислових установках. Перевагами є висока енергоефективність та простота конструкції, але ефективність знижується при високій вологості, а також спостерігається постійна витрата води .

Термоелектричне охолодження (ефект Пельтьє)

Термоелектричні системи охолодження використовують напівпровідникові елементи, які при подачі електричного струму створюють різницю температур. Один бік елемента охолоджується, інший нагрівається. Такі системи застосовуються в міні-холодильниках, медичних приладах та для прецизійного охолодження електроніки. Перевагами є компактність, відсутність рухомих частин та безшумність, але вони мають низький коефіцієнт корисної дії та обмежену потужність охолодження .

Іммерсійне охолодження

Іммерсійне охолодження передбачає занурення електронних компонентів у спеціальну діелектричну рідину, яка ефективно відводить тепло. Цей метод забезпечує високий рівень охолодження та використовується в дата-центрах, високопродуктивних

обчислювальних системах та обладнанні для майнінгу криптовалют. Перевагами є висока ефективність та зниження рівня шуму, але система є складною в реалізації та обслуговуванні.

Ці типи систем охолодження можуть бути використані окремо або в комбінації, залежно від вимог до тепловідведення, конструктивних обмежень та умов експлуатації електронного обладнання.

2.4 Особливості охолодження пристроїв РЕБ

Системи радіоелектронної боротьби (РЕБ) відіграють ключову роль у сучасних бойових операціях, де домінування в електромагнітному спектрі стало вирішальним чинником тактичної переваги. Висока енергетична насиченість таких систем, інтенсивність режимів роботи, специфіка розміщення та жорсткі умови експлуатації формують унікальні вимоги до охолодження їхніх електронних компонентів.

Однією з ключових особливостей охолодження РЕБ є неможливість використання стандартних рішень. Наприклад, класичне активне повітряне охолодження з вертикальним розміщенням вентилятора або зовнішнім повітрозабором може бути неможливим через ризик потрапляння пилу, вологи або ворожого спостереження за тепловим слідом. Тому охолоджувальні системи в таких модулях проєктуються з урахуванням максимальної герметичності, внутрішньої циркуляції повітря або повної пасивності.

Унікальним є і поєднання обмеженого простору з великим тепловим навантаженням. Якщо в промислових умовах для охолодження пристрою, що виділяє 70–100 Вт тепла, можна застосувати великий алюмінієвий радіатор з обдувом, то в РЕБ-

модулях це тепло має розсіятися в умовах мінімального об'єму — іноді в компактних корпусах об'ємом менше 2 літрів.

Складність додає і те, що РЕБ можуть функціонувати циклічно, але з піковими навантаженнями. За короткий період при генерації імпульсних завад тепловиділення може миттєво зрости у 2–3 рази. Це означає, що система охолодження має реагувати швидко та зберігати інерцію температури в межах, без перегріву найближчих компонентів.

Із практичного досвіду застосування РЕБ на фронті можна навести приклади, коли саморобні системи охолодження на основі побутових вентиляторів або відкритих радіаторів швидко виходили з ладу через забруднення пилом або механічні пошкодження. Натомість ефективні рішення включали внутрішню циркуляцію повітря в закритому алюмінієвому корпусі з масивними зовнішніми ребрами, які виконували роль тепловідведення.

У деяких сучасних західних зразках РЕБ використовуються фазозмінні матеріали, які тимчасово акумулюють тепло при пікових навантаженнях і віддають його поступово в режимах холостого ходу. Це дозволяє уникати локального перегріву навіть без активного охолодження, хоча реалізація таких технологій є дорогою та складною у виробництві.

Ще однією характерною рисою є підвищена вимогливість до надійності охолоджувальної системи. Якщо, скажімо, у ноутбуків перегрів викличе зниження частоти процесора, то у РЕБ-модулі — це може призвести до втрати заводової активності в критичний момент або навіть до пошкодження генератора сигналу. Через це на етапі проєктування в системі тепловідведення закладаються резерви (до 20–

30% потужності понад розрахункову) та перевіряються граничні режими навіть при відключених вентиляторах.

2.5 Призначення та будова модуля РЕБ

Модуль радіоелектронної боротьби (РЕБ) є ключовим елементом систем, що забезпечують активний вплив на електромагнітне середовище супротивника. Основним його призначенням є створення радіоперешкод, зниження ефективності зв'язку, навігації, розвідки або управління на стороні противника, а також захист власних засобів управління від ворожого втручання.

Залежно від типу комплексу, модулі РЕБ можуть працювати у широкому частотному діапазоні, забезпечуючи:

- генерацію безперервних або імпульсних перешкод;
- адаптивне зміщення частот завад;
- інтелектуальне реагування на зміну сигналів противника;
- взаємодію з керуючими блоками у складі єдиної бойової системи.

З конструктивної точки зору, модуль є компактним електронним пристроєм, що виконує обчислювальні та радіочастотні функції.

Основними елементами будови є:

- блок живлення або стабілізатор постійної напруги (зазвичай 28 В);
- генератор або цифровий синтезатор частоти;
- підсилювачі низької та високої частоти;
- процесор керування або мікроконтролер;

- блок комутації та інтерфейси зв'язку;
- друковані плати з розміщеними компонентами;
- корпус, який забезпечує механічний захист і герметизацію;
- вхідні та вихідні роз'єми (антена, живлення, керування).

Конфігурація та склад модуля можуть змінюватися залежно від конкретного завдання — від протидії мобільному зв'язку до придушення GPS-сигналів чи команд управління БПЛА. При цьому принцип роботи лишається незмінним: прийом інформації від зовнішнього блоку керування, генерація завадового сигналу за визначеним алгоритмом, посилення його та передача на антену.

Для забезпечення належної роботи, усі функціональні елементи модуля мають бути компактно розміщені та добре екрановані, з дотриманням вимог до електромагнітної сумісності. Розведення плат виконується з урахуванням мінімізації паразитних зв'язків, а конструкція корпусу передбачає стійкість до механічних навантажень, вологи, пилу та температурних коливань.

2.6 Аналіз тепловиділення в модулі РЕБ

Під час роботи модулів радіоелектронної боротьби (РЕБ) відбувається активна генерація електромагнітних сигналів із використанням високочастотних підсилювачів, цифрових мікросхем, джерел живлення, контролерів та інших енергоємних компонентів. Усі ці елементи, працюючи у високих навантаженнях і часто в імпульсному режимі, супроводжуються інтенсивним виділенням тепла, що потребує детального аналізу для забезпечення надійності системи.

Згідно з технічними характеристиками модуля, прийнятого для дослідження у дипломному проєкті, вхідна напруга становить 28 В, а вихідна корисна потужність — 50 Вт. На основі лабораторних вимірювань аналогічних зразків, ККД модуля становить орієнтовно 40–50 %, тобто половина спожитої електроенергії перетворюється у тепло.

При споживаній потужності близько 120 Вт, тепловиділення складає приблизно 70–72 Вт, що є критичним показником для невеликих за розмірами модулів, зокрема в закритих корпусах без вільного теплообміну з навколишнім середовищем.

Основними джерелами тепла в конструкції є:

- підсилювач ВЧ (виділяє основну частину тепла — до 50–60 % загального);
- цифровий контролер та обв'язка;
- стабілізатор або DC-DC перетворювач;
- елементи фільтрації живлення (дроселі, резистори великої потужності).

Особливу увагу слід звернути на нерівномірність тепловиділення. Якщо деякі мікросхеми мають теплове навантаження в межах 1–2 Вт, то підсилювач може локально виділяти до 20–30 Вт на дуже малій площі, створюючи гарячі зони (так звані "hot spots"). Саме вони є критичними у проектуванні систем тепловідведення.

Крім того, слід враховувати циклічний характер навантаження, типовий для РЕБ. При переході в активний режим передавання завад теплонавантаження різко зростає, а під час пауз — зменшується. Це створює ризик температурного навантаження на компоненти, особливо

коли корпус не встигає відвести накопичене тепло до наступного циклу.

Важливим аспектом аналізу є і просторове розміщення джерел тепла — найбільш потужні елементи, розташовані в центральній частині друкованої плати, передають тепло безпосередньо на монтажну поверхню, що унеможливорює ефективне охолодження без спеціальних технічних рішень.

2.7 Вимоги до температурного режиму роботи пристрою

Допустимий температурний діапазон роботи більшості сучасних РЕБ-модулів, призначених для військового застосування, зазвичай становить:

- від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ — для забезпечення роботи в польових умовах, з урахуванням кліматичних зон і сезонності;
- номінальний робочий діапазон — $+20\dots+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, при якому модуль зберігає найвищу ефективність та стабільність параметрів;
- максимальна температура компонентів — до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (у межах допустимих значень для типових мікросхем класу MIL або INDUSTRIAL).

При перевищенні допустимого температурного порогу спостерігається:

- зниження ККД підсилювачів і джерел живлення;
- зростання струму витоку у напівпровідникових елементах;
- деградація ізоляційних матеріалів та термопрокладок;

- зміна частотних характеристик генераторів;
- ризик виникнення теплового пробою, особливо в мікросхемах із щільною компоновкою.

З іншого боку, перевищення нижнього температурного порогу може призвести до порушення нормальної роботи генераторів, появи паразитних частот, затримки запуску та нестабільності у цифрових схемах.

Особливістю пристроїв РЕБ є локалізоване теплове навантаження, що ускладнює охолодження навіть при нормальній температурі середовища. Саме тому при моделюванні необхідно не лише контролювати середню температуру модуля, але й оцінювати максимальну температуру в "гарячих точках", щоб уникнути перегріву окремих елементів.

Крім температур під час роботи, слід враховувати й умови зберігання та транспортування. Температурний діапазон зберігання зазвичай розширюється до $-55^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$, але без увімкнення пристрою.

Враховуючи вищезазначене, температура всередині корпусу модуля має не перевищувати $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ в зоні основного тепловиділення, а на рівні менш навантажених елементів залишатися в межах $40\text{--}60^{\circ}\text{C}$. Такі умови дозволяють забезпечити тривалий термін служби компонентів, стабільність частотних характеристик і безпечну роботу пристрою у складі більш складних технічних систем.

У контексті цієї дипломної роботи особливо важливо врахувати, що захист від перегріву в модулі РЕБ активується при досягненні температури $+75^{\circ}\text{C}$. Це є критичною межею, перевищення якої

призводить до автоматичного відключення або переходу пристрою в безпечний режим, що може негативно вплинути на виконання бойового завдання.

Таким чином, система охолодження повинна забезпечувати температурний запас не менше 5–10 °C відносно цього порогу навіть в умовах пікового навантаження, аби запобігти передчасному спрацюванню захисту та зберегти функціональність модуля.

РОЗДІЛ 3. ПІДГОТОВКА ДО ТЕПЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ З FLOW SIMULATION

3.1 Огляд та аналіз геометрії

Досліджуваний пристрій являє собою алюмінієвий корпус із ребрами охолодження, що виконує функції тепловідведення та механічного захисту. Зовнішня конструкція нагадує герметичну коробку з встановленою антеною, яка розташована зверху (рис. 3.1). Радіатори розміщено на двох малих і одній великій бічній стінці корпусу, що забезпечує максимальну площу поверхні для тепловіддачі.

Вхідна 3D-модель складалась з таких основних компонентів:

- алюмінієвий корпус із зовнішніми радіаторами;
- два бокових менших і один великий зовнішній радіатор;
- внутрішній радіатор на задній стінці;
- модуль генератора шуму (ГШ), що є головним джерелом тепловиділення (≈ 70 Вт);
- DC-DC перетворювач VT-DD122810 (12–28 В) з додатковим радіатором;
- вентилятор Sunon DC PMD2409PMB1A (24 В, 92×92×38 мм), що забезпечує примусову циркуляцію повітря;
- перегородка, що формує напрямок повітряного потоку;
- антенний модуль;
- з'єднувальні планки між корпусом і радіаторами.

На рис. 3.1 та 3.2 представлено візуалізацію повної моделі у збірці та вигляд внутрішнього компонування відповідно. Вентилятор встановлено у центральній частині конструкції, а перегородка спрямовує потік повітря уздовж внутрішніх стінок корпусу. Такий підхід, за задумом, дозволяє рівномірно розподіляти тепло по всій площі корпусу та забезпечує ефективне тепловідведення.

Особливість геометрії полягає у щільному компонуванні елементів, що імітує реальні умови експлуатації модуля РЕБ. Це створює сприятливі умови для моделювання температурних градієнтів, з урахуванням як примусового, так і природного охолодження, залежно від обраного сценарію симуляції.

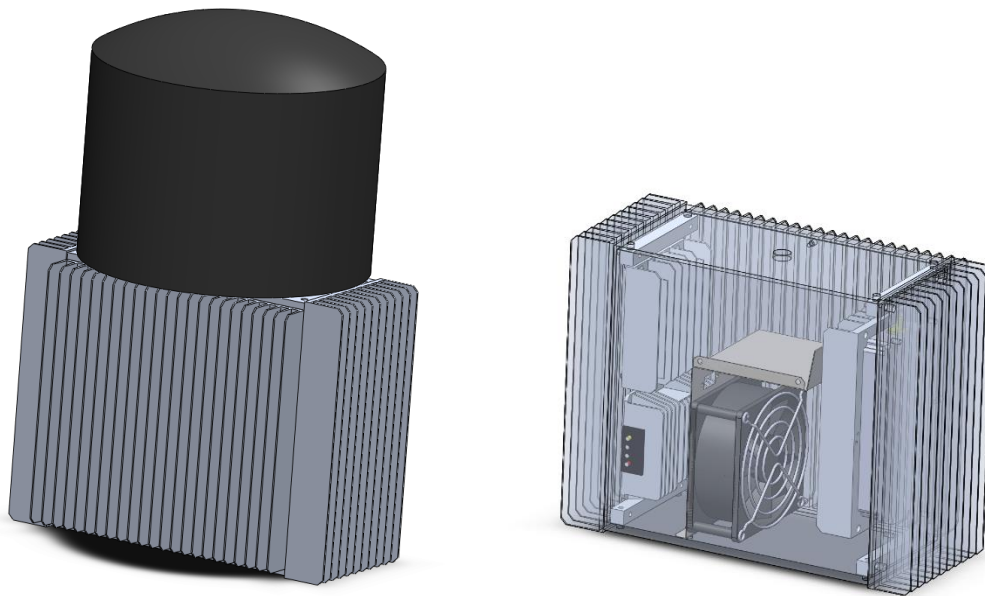


Рис 3.1 — Вихідна модель РЕБ

3.2 Підготовка геометрії до симуляції

Перед запуском теплового аналізу в середовищі Flow Simulation необхідно провести ретельну підготовку геометричної моделі, адаптуючи її до вимог симуляційного середовища. У процесі цієї підготовки особливу увагу було приділено спрощенню моделі, герметизації внутрішнього об'єму та забезпеченню коректного відображення умов теплообміну.

Одним з ключових етапів стало спрощення геометрії. Деталі, що не впливають суттєво на теплові процеси, були вилучені з моделі. Це стосувалося дрібних отворів, кріплень, фасок, гвинтів, декоративних елементів та інших дрібних особливостей конструкції, які лише ускладнювали побудову обчислювальної сітки та збільшували обчислювальні ресурси, але не мали суттєвого впливу на тепловий режим.

Також було усунуто наскрізні отвори, які могли призвести до витоку внутрішнього об'єму та порушення умов симуляції. Для Flow Simulation критично важливо, щоб повітряний простір усередині корпусу був цілісним та повністю герметичним — інакше програмне забезпечення не зможе коректно ідентифікувати внутрішнє середовище для моделювання теплопереносу та конвекції.

Усі місця з'єднання корпусу, кришок та модулів були перевірені на наявність щілин або зазорів. У випадку виявлення таких — геометрія була відповідно відкоригована. Також модифіковано деякі контури деталей, щоб забезпечити щільний контакт між теплопровідними поверхнями, що дозволяє коректно передавати тепло між тілами.

Після спрощення модель пройшла перевірку герметичності внутрішнього простору за допомогою функції "Check Geometry" та інструменту створення внутрішнього об'єму "Internal Volume". У результаті було отримано коректну замкнену область для подальшого аналізу повітряного потоку та теплових процесів всередині корпусу.

В результаті спрощення збірки, модель корпусу набула виду зображеному на рис. 3.2

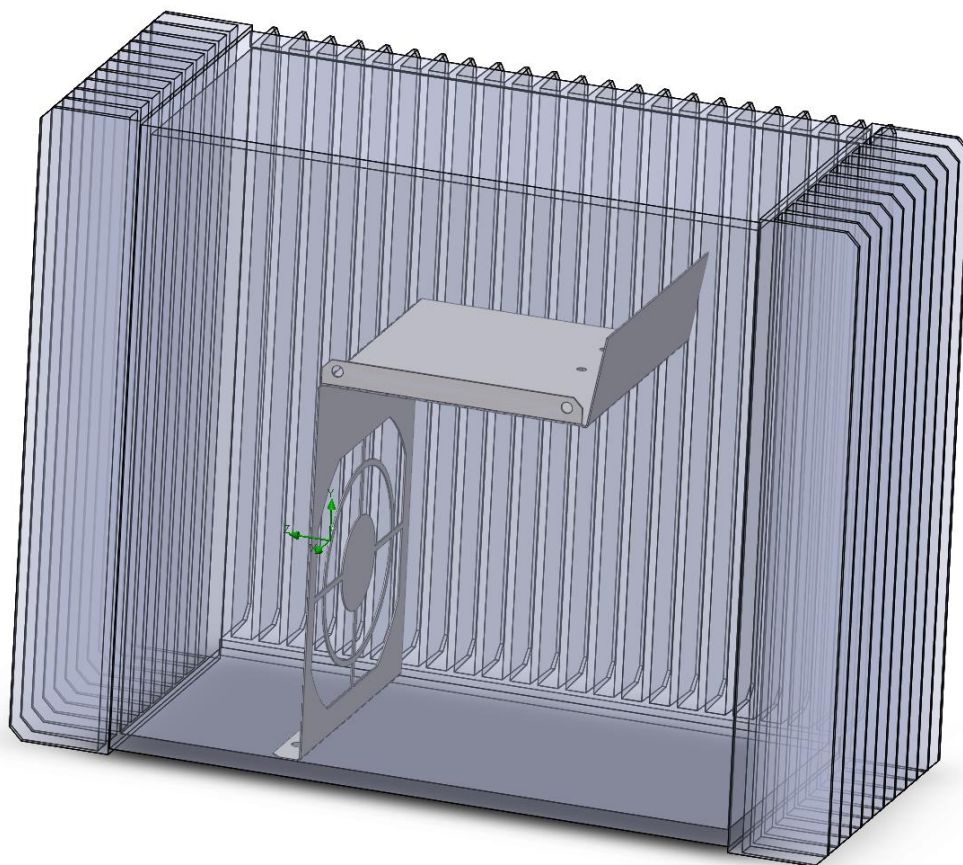


Рис 3.2 — Спрощений корпус пристрою

3.3 Загальні налаштування

Перед запуском симуляції в середовищі SolidWorks Flow Simulation було виконано налаштування загальних фізичних

параметрів, що визначають тип аналізу, середовище моделювання, граничні умови та параметри розрахунку на рисунках 3.3 , 3.4 , 3.5 .

Фізичні явища

У вкладці *General Settings* було обрано такі фізичні процеси:

- Fluid Flow – моделювання потоків повітря всередині корпусу;
- Conduction – теплопровідність у твердих тілах;
- Time-dependent – активовано нестационарний режим симуляції для аналізу температурної динаміки;
- Gravity – гравітація увімкнена для врахування природної конвекції (напрямок вниз по осі Y).

Опції Radiation, Rotation і Free surface залишались вимкненими, оскільки теплове випромінювання та інші фізичні ефекти не були критичними для даної моделі.

Тип аналізу

У секції *Geometry Handling* встановлено:

- Analysis type: External;
- Geometry recognition: CAD Boolean;
- Exclude cavities without conditions: активовано – для уникнення розрахунків у закритих порожнинах без граничних умов;
- Exclude internal space: неактивно – для коректного врахування внутрішнього повітряного об'єму.

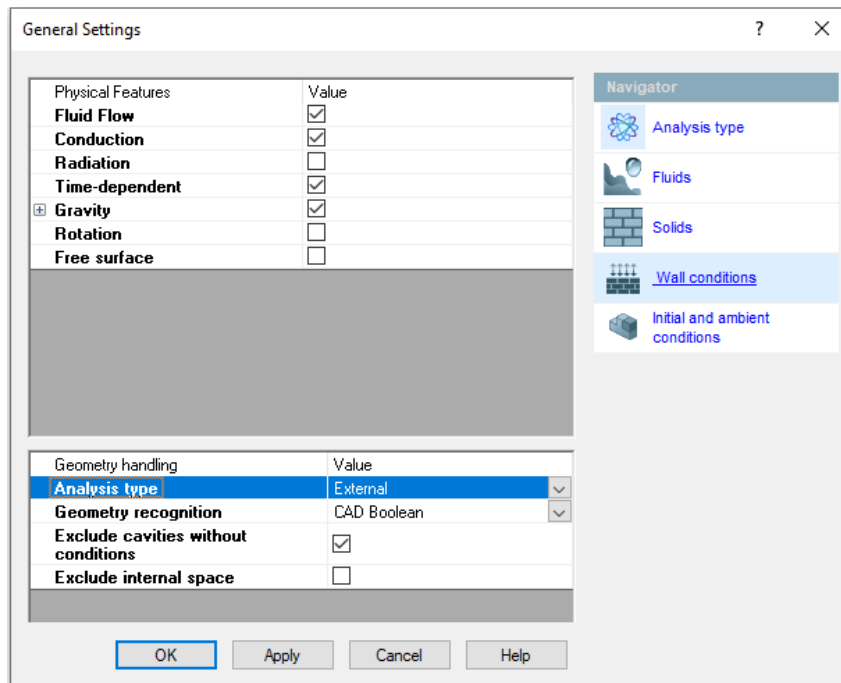
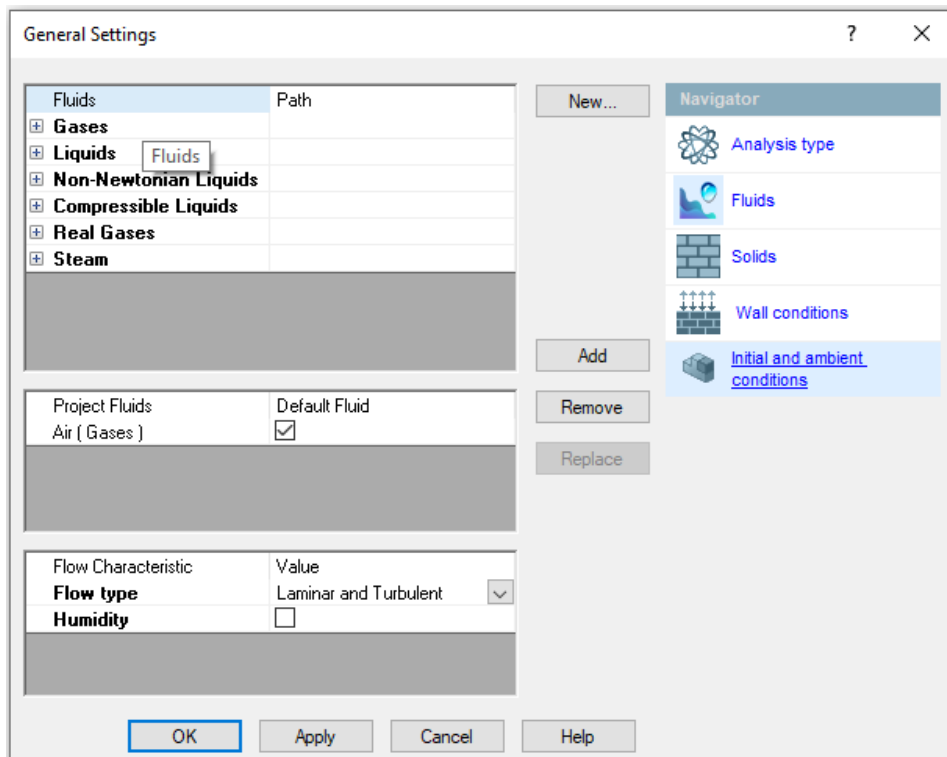


Рис 3.3 — Загальні налаштування *Analysis type*

Робоче середовище

У вкладці Fluids як середовище моделювання обрано повітря (Air, Gases), встановлене як Default Fluid. Тип потоку визначено як Laminar and Turbulent, що дозволяє враховувати як ламінарну, так і турбулентну поведінку залежно від умов у конкретних зонах. Параметр Humidity залишено неактивним.

Рис 3.4 — Загальні налаштування *Fluids*

Початкові умови

У вкладці *Initial and Ambient Conditions* було вручну задано наступні параметри:

- Тиск: 101325 Па (атмосферний);
- Температура навколишнього середовища: 20.05 °C;
- Початкові швидкості у всіх напрямках: 0 м/с;
- Гравітація: увімкнена, з напрямком донизу;
- Інтенсивність турбулентності: 2 %;
- Довжина турбулентності: 0.0021 м;
- Початкова температура твердих тіл: 20.05 °C.

Ці параметри визначають вихідні умови моделі до початку теплового навантаження.

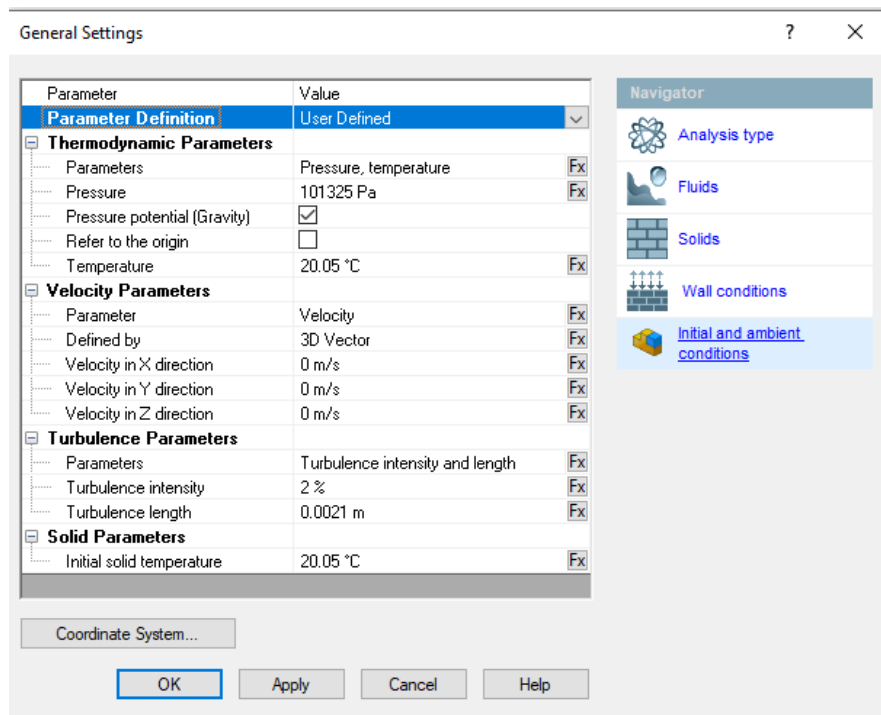


Рис 3.5 — Загальні налаштування *Initial and ambient conditions*

Контроль обчислень

У вкладці *Calculation Control Options* встановлено такі умови завершення симуляції:

- Criterion to stop: All satisfied;
- Goals convergence: All Goals;
- Максимальна кількість ітерацій: 500;
- Travels: автоматичне значення ($\times 4$);
- Обмеження по часу розрахунку не встановлювались.

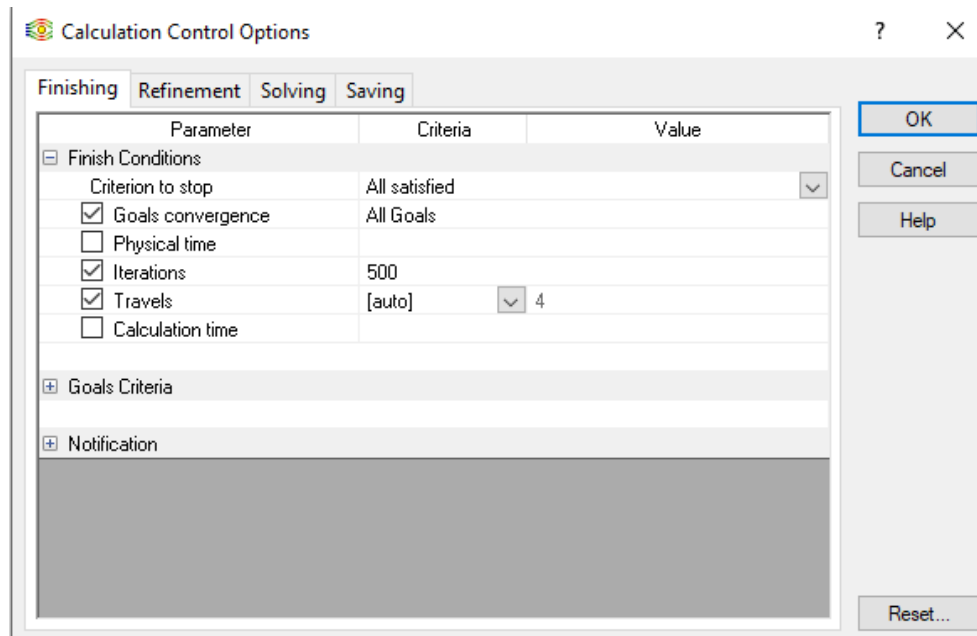


Рис 3.6 — Налаштування умов завершення симуляції

Керування часовими кроками

У вкладці *Solving* встановлено:

- Time step: ручне значення – 60 с;
- Stationary in solids і Nested iterations: вимкнені;
- Flow freezing: Disabled (без заморожування течії).

Такий крок часу дозволяє простежити динаміку зміни температурного поля з достатньою точністю та стабільністю розрахунку.

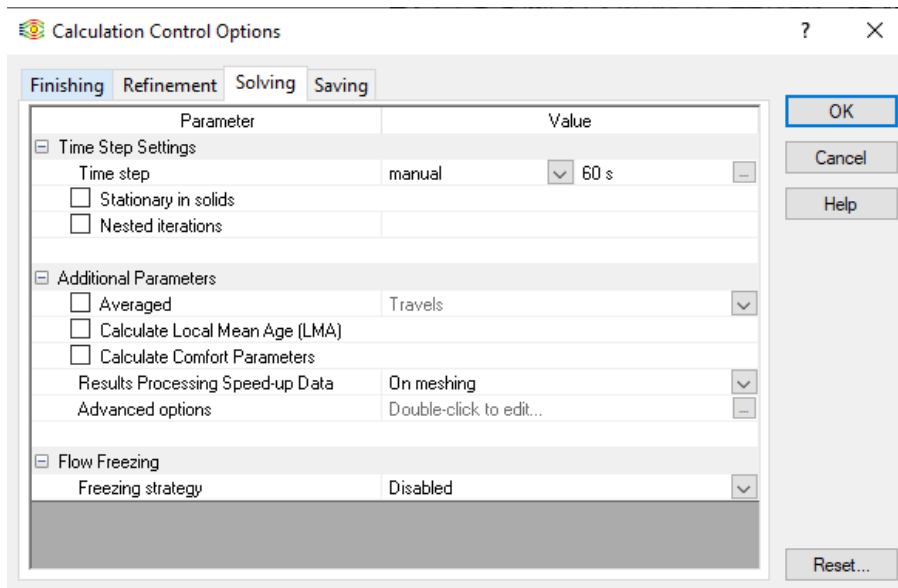


Рис 3.7 — Часовий крок

Параметри збереження результатів

У вкладці *Saving* задано:

- Збереження резервних копій перед уточненням сітки та кожні 100 ітерацій;
- Періодичне збереження повних результатів кожні 60 секунд фізичного часу;
- Періодичне збереження вибраних параметрів кожні 2 ітерації (Pressure, Temperature, Temperature (Fluid)).

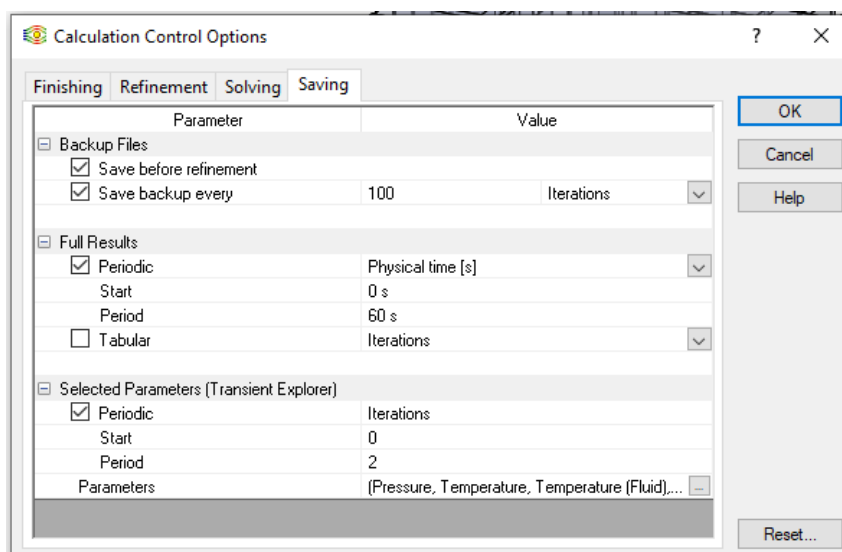


Рис 3.8 — Налаштування збереження

3.4 Налаштування вхідних даних

Після завершення загальних налаштувань симуляції наступним етапом стало задання вхідних даних, що описують теплові джерела, умови навколишнього середовища, параметри вентилявання та характеристики матеріалів. Ці дані є критичними для точного відтворення реальних умов роботи модуля РЕБ.

Джерела тепла

Головне теплове навантаження у моделі створює модуль генератора шуму (ГШ). Згідно з енергетичними характеристиками, при ККД $\approx 40\%$ і споживаній потужності близько 120 Вт, загальне тепловиділення становить орієнтовно 70–80 Вт. У моделі було задано:

- Джерело тепла типу *Surface Heat Power* – на верхній поверхні модуля ГШ;
- Потужність тепловиділення – 80 Вт (з урахуванням запасу для моделювання гіршого сценарію);

- Тип джерела – сталий у часі, рівномірний розподіл по площині контакту.

Це джерело імітує передавання тепла від реального електронного модуля на радіаторну пластину та корпус.

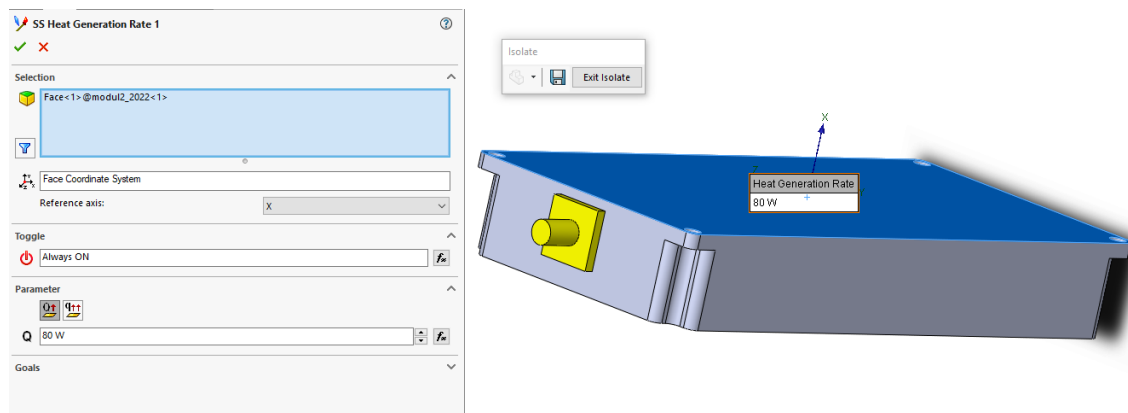


Рис 3.9 — Джерело тепла

Вентилятор

У моделі використано осьовий вентилятор Sunon PMD2409PMB1A (24 В, 204.2 м³/год). У симуляції він реалізований як Internal Fan, що генерує потік повітря в заданому напрямку. Для нього було задано:

- Тип вентилятора – *Internal Fan* (прямокутна поверхня);
- Витрата повітря – 204.2 м³/год (приблизно 0.0567 м³/с);
- Напрямок потоку – з внутрішнього простору вгору по корпусу;
- Область дії – обмежена площею поверхні вентилятора (визначено у моделі);
- Вентилятор працює постійно впродовж усього часу моделювання.

У деяких конфігураціях вентилятор вимикався, зміщувався в інше положення або видалявся для оцінки впливу природної конвекції.

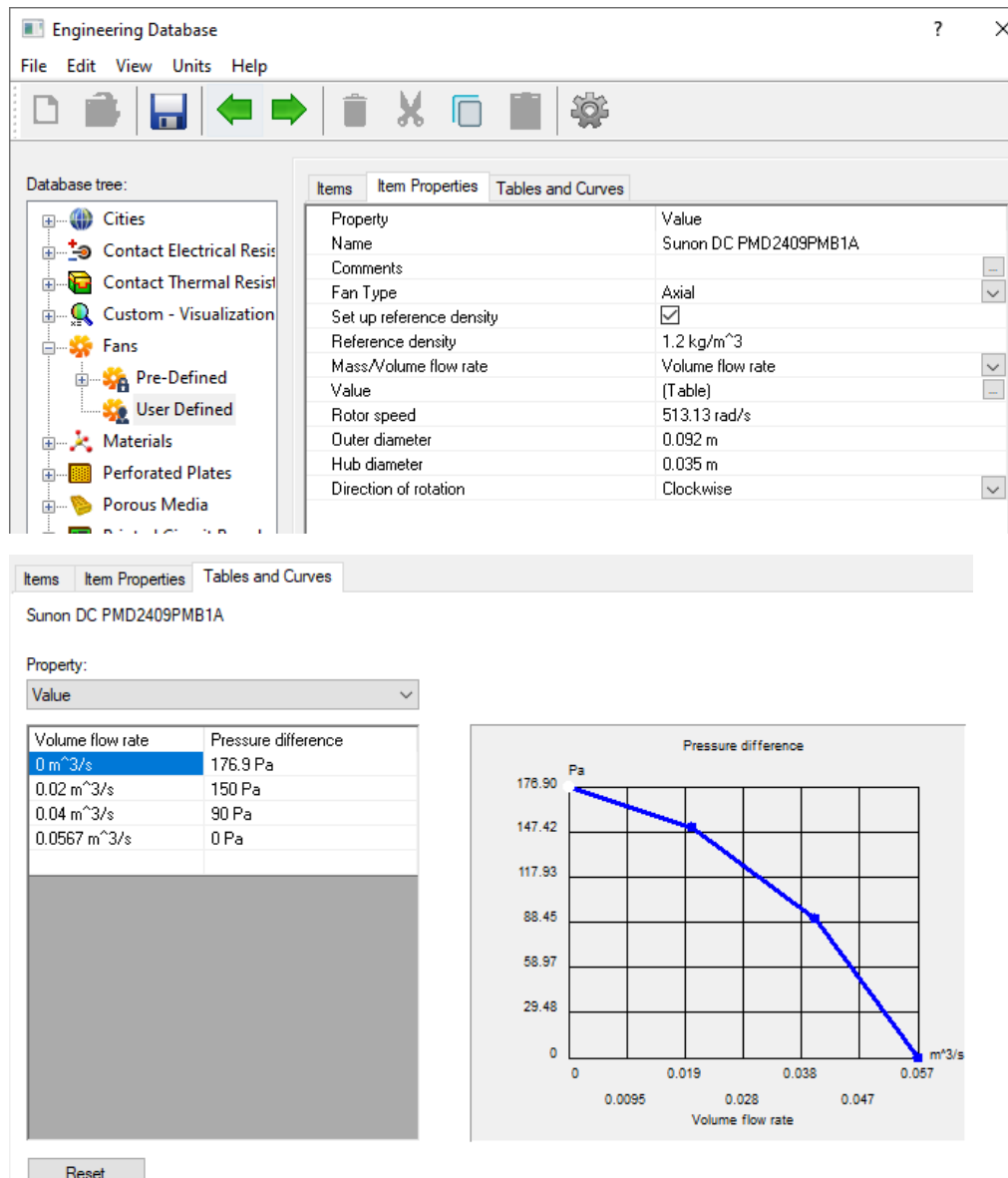


Рис 3.10 — Характеристики вентилятора

Матеріали тіл

Для всіх твердих елементів у моделі були присвоєні відповідні матеріали з тепловими властивостями:

- Корпус, радіатори, пластини, DC-DC, модуль ГШ – алюміній (Aluminum) з високою теплопровідністю ($\approx 200\text{--}230 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$);

Items	Item Properties	Tables and Curves
Property	Value	
Name	Aluminum	
Comments		
Density	2688.9 kg/m ³	
Specific heat	(Table)	
Conductivity type	Isotropic	
Thermal conductivity	(Table)	
Electrical conductivity	Conductor	
Resistivity	(Table)	
Radiation properties	☐	
Melting temperature	☒	
Temperature	933.4 K	

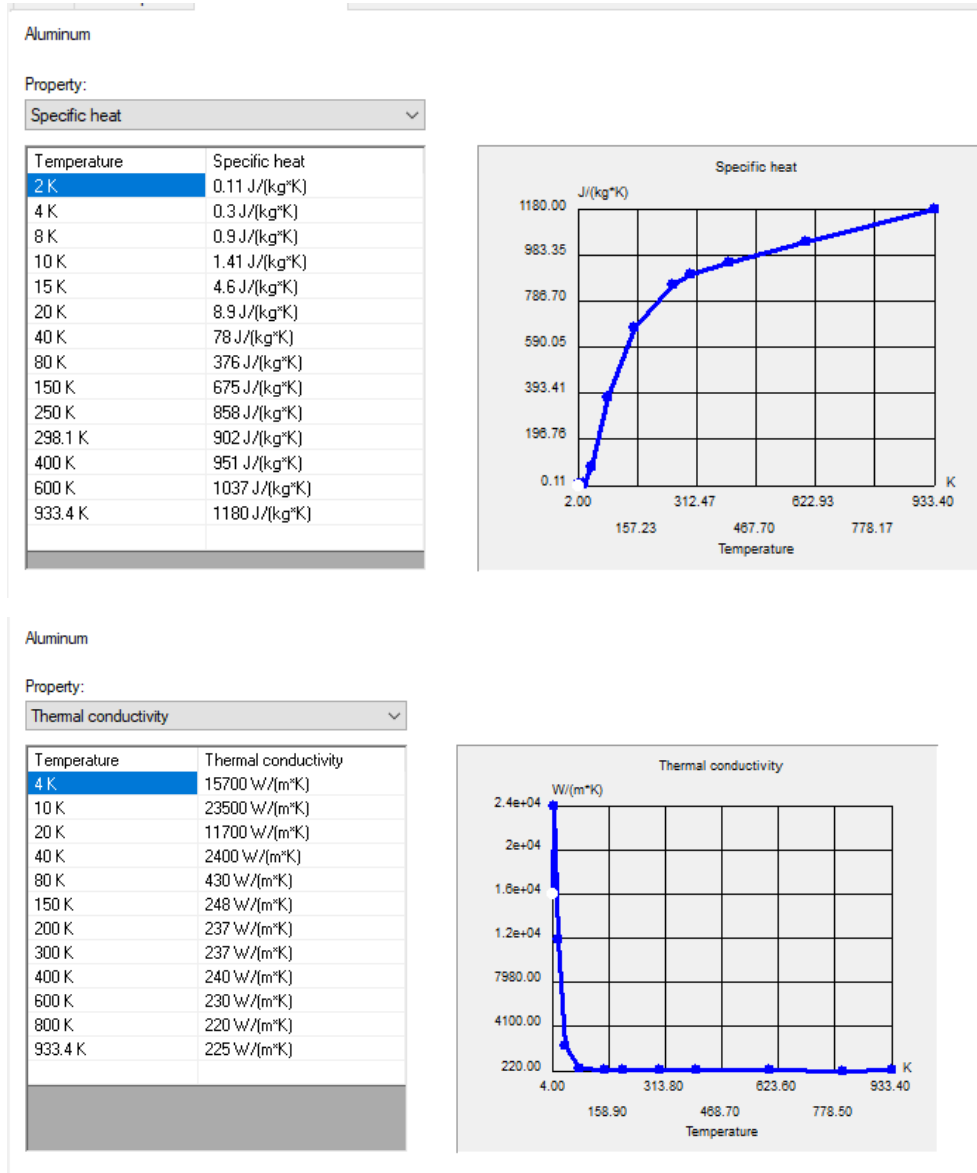


Рис 3.11 — Характеристики алюмінію

- Вентилятор і пластикові перегородки – ABS пластик;
- Повітряний об'єм всередині корпусу – повітря (Air), як об'ємна рідина.

Усі контакти між тілами встановлені як *Thermal Contact* із ідеальним тепловим з'єднанням (*Bonded*), без зазорів і опору.

Область розрахунку (Computation Domain)

Комірка обчислення (Computation Domain) була автоматично сформована програмою та включає усю збірку моделі, охоплюючи як тверді тіла, так і внутрішній повітряний простір. Це забезпечує повноцінний тепловий розрахунок для всієї системи в межах заданої геометрії. Для правильності розрахунків у моделі не повинно бути зайвих відкритих порожнин або геометричних помилок у межах домену.

Підобласть середовища (Fluid Subdomain)

Окремо було визначено Fluid Subdomain — це внутрішній простір корпусу, який заповнений повітрям і в якому відбувається конвекційне перенесення тепла. Цей простір був згенерований автоматично через інструмент Internal Volume, після підтвердження герметичності конструкції. У властивостях підобласті було вказано:

- Тип середовища – повітря (Air);
- Температурні та тискові умови – відповідно до загальних початкових умов (20.05 °C, 101325 Па);
- Обмеження по стінках – тепловіддача через контакт із внутрішніми поверхнями корпусу.

Fluid Subdomain 1 ?

✓ ✗

Selection ^

Face<1> @DC-DC Converter XW-12-28-280W<1>

Face Coordinate System

Reference axis: X

Fluids ^

Fluid type:

Gases / Real Gases / Steam

Air (Gases) ☒

Add Fluid...

Flow Parameters ^

☒ V ☒ M

V_x 0 m/s f_{sc}

V_y 0 m/s f_{sc}

V_z 0 m/s f_{sc}

Thermodynamic Parameters ^

☒ P-T ☐ P-p ☐ T-p ☐ A

P 101325 Pa f_{sc}

T 20.05 °C f_{sc}

☒ Pressure potential (Gravity)

☐ Refer to the origin

Turbulence Parameters ^

☒ I-L ☒ k-ε

I_t 2 % f_{sc}

L_t 0.0021 m f_{sc}

Flow Characteristics ^

Laminar and Turbulent

☐ Humidity

Рис 3.12 — Характеристики середовища в корпусі

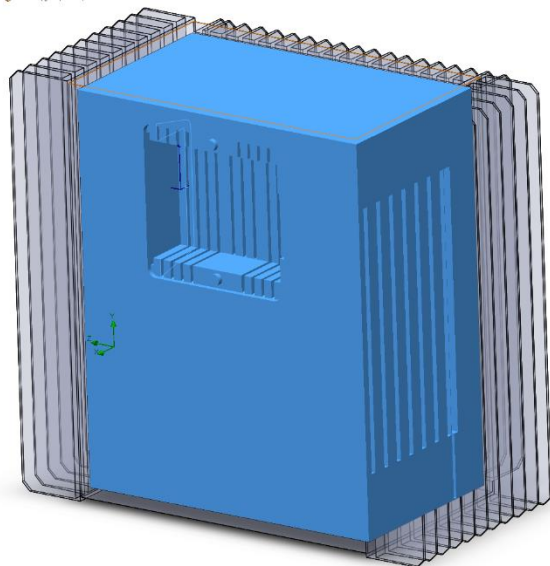


Рис 3.13 — Внутрішнє середовище

Граничні умови

Граничні умови в класичному вигляді не задавались окремо. Модель є повністю замкненою (без отворів для входу/виходу повітря), тому теплообмін із зовнішнім середовищем здійснюється не через Boundary Conditions, а через теплопередачу від тіл до зовнішніх стінок корпусу в межах обчислювальної області.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕПЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Аналіз початкової конфігурації модуля РЕБ

На першому етапі дослідження було здійснено теплове моделювання початкової конфігурації модуля радіоелектронної боротьби (РЕБ), що відображала фактичну апаратну реалізацію. Основною метою даного етапу було перевірити точність отриманої моделі та визначити наскільки адекватно вона відображає теплові процеси в реальних умовах експлуатації.

Досліджуваний модуль РЕБ споживає близько 120 Вт електричної потужності, при цьому його ККД становить приблизно $\sim 40\%$, що відповідає тепловиділенню 70 Вт. Теплове навантаження 80 Вт було задано з запасом в моделі як поверхнєве джерело тепла на тілі модуля з боку зовнішнього радіатора.

Охолодження забезпечується завдяки встановленому вентилятору Sunon PMD2409PMB1A (24 В, 204.2 м³/год), який створює примусовий потік повітря через внутрішній простір корпусу. Конструкція включає внутрішній радіатор, розміщений на модулі, та зовнішні радіатори, прикріплені до бокових стінок корпусу, що виготовлені з алюмінію. Вентиляційні отвори в нижній та верхній частинах корпусу забезпечують наскрізну циркуляцію повітря.

Метою симуляції було визначення максимальної температури в модулі, що контролювалась через глобальну ціль (Global Goal) типу Maximum Temperature (Fluid and Solid).

Перевірка адекватності моделі

Для перевірки правильності моделювання доцільно порівняти результати симуляцій з експериментальними даними вимірювання

температури в модулі. Результати експериментального вимірювання температури наведені в додатку А.

Результати симуляції показали максимальну температуру модуля на рівні 58.9 °С, тоді як за результатами лабораторного експерименту модуль РЕБ (ГШ) нагрівся до 53.4 °С при аналогічному тепловому навантаженні (70-80 Вт) та наявності вентилятора.

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{T_m - T_p}{T_p} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\delta = \frac{58,9 - 53,4}{53,4} \times 100\% \approx 10,3\%$$

де:

- T_m – температура моделі,
- T_p – реальна температура, отримана в результаті експериментів

Відносна похибка становить приблизно 10.3%, що свідчить про певну невідповідність симуляційного результату реальності. Водночас така похибка залишається допустимою на етапі концептуального теплового аналізу, оскільки дозволяє виявити критичні зони перегріву та оцінити ефективність охолодження.

Можливі причини відхилення:

- **Модель симулює постійне тепловиділення**, тоді як у лабораторних умовах можливі незначні температурні коливання, вплив вологості/тиску.

- **Грубі сітки дискретизації** у симуляції могли недооцінити тепловідвід на окремих ділянках, особливо тонких ребрах радіаторів.
- **Необлік конвекції на дрібних поверхнях** або спрощене моделювання повітряного потоку (особливо в зоні модуля).
- **Контактні опори між деталями**, які в реальності мають певну теплову опірність, у моделі могли бути умовно ідеальними або, навпаки, занадто спрощеними.

Однак найвагомішою причиною такої похибки може бути тепловиділення в лабораторії 70Вт, так як вибране значення 80Вт було обрано з запасом

4.2 Вплив окремих елементів конструкції на тепловий режим

Для оцінки ефективності окремих конструктивних елементів системи охолодження модуля РЕБ було проведено серію симуляцій з поступовим вилученням компонентів. Таким чином визначено їхній вплив на кінцеву температуру найбільш теплонавантаженого елемента конструкції.

Конфігурація 1 — Базова температура у еталонній конфігурації (з усіма елементами конструкції) становила **59.7 °C**. Ця симуляція проводилася з більшим часовим кроком (100 с), що дозволяло отримати усталене значення температури.

Послідовність змін конструкції та відповідні температури наведено нижче:

Конфігурація 2 — вилучено боковий зовнішній радіатор: Температура модуля зросла до **63.0 °C**, що свідчить про помірний вплив цього елемента на загальну тепловіддачу.

Конфігурація 3 — додатково вилучено внутрішній верхній радіатор над DC/DC: Температура незначно зросла до **63.3 °C**, отже даний радіатор має менший вплив у порівнянні з боковим зовнішнім.

Конфігурація 4 — вилучено також внутрішній модульний радіатор: Температура досягла **64.4 °C**, що підтверджує його вагомий внесок у відведення тепла від джерела.

Для порівняння також були змодельовані конфігурації з варіаціями роботи вентилятора:

- **Зміщення вентилятора ввєрх** не дало ефекту — температура залишилась **59.7 °C**, тобто положення вентилятора у вертикальній площині не є критичним.
- **Вимкнений вентилятор** — температура зросла до **62.6 °C**, що свідчить про малу ефективність примусового охолодження, але також демонструє, що система має достатній запас ефективності у пасивному режимі.

Solver: ThermalSim(1_100c)(noKozirek)(close_plateHoles)modulRadDown)(stopVent) [Default] (01.00 Модуль.SLDASM) - [List of Goals]

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
modul Average Total Temperature 5	62.2467 °C	Achieved (IT = 39)	3.6106 °C	62.2616 °C
modul Maximum Total Temperature 6	62.5768 °C	Achieved (IT = 39)	3.61285 °C	62.5902 °C
SG DC_Average Heat Flux 5	-1.85496 W/m^2	Achieved (IT = 25)	1.49331 W/m^2	-2.68347 W/m^2
SG InUp_Average Heat Flux 4	-4.8086 W/m^2	Achieved (IT = 500)	1.71639 W/m^2	-9.70565 W/m^2
SG Module_Average Heat Flux 6	16.8101 W/m^2	Achieved (IT = 26)	4.54193 W/m^2	23.7139 W/m^2
SG Kopnyc Average Heat Transfer Coefficient 13	4.19064 W/m^2/K	Achieved (IT = 32)	0.325633 W/m^2/K	3.99405 W/m^2/K
SGKopnyc Average Heat Flux 14	143.716 W/m^2	Achieved (IT = 50)	13.6661 W/m^2	137.241 W/m^2
SGKopnyc Average Surface Heat Flux (Convective) 15	143.716 W/m^2	Achieved (IT = 50)	13.6661 W/m^2	137.241 W/m^2
SGKopnyc Average Temperature (Solid) 18	54.2329 °C	Achieved (IT = 40)	3.33766 °C	54.2818 °C
SGKopnyc Average Wall Temperature 16	54.2329 °C	Achieved (IT = 40)	3.33766 °C	54.2818 °C
SGKopnyc Heat Transfer Rate (Convective) 17	83.3017 W	Achieved (IT = 50)	7.92126 W	79.549 W

Рис 4.1 — Результати моделювання з вимкненим вентилятором

- Відсутність вентилятора та роздільної пластини — температура майже не змінилась (**62.7 °C**), що дозволяє зробити висновок про невагому роль пластини у заданих умовах.

Solver: ThermalSim(1_100c)(noKozirek)(close_plateHoles)modulRadDown)(NOVent)(noPlate) [Default] (01.00 Модуль.SLDASM) - [List of Goals]

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
modul Average Total Temperature 5	62.3733 °C	Achieved (IT = 39)	3.65224 °C	62.3548 °C
modul Maximum Total Temperature 6	62.7048 °C	Achieved (IT = 39)	3.65384 °C	62.6834 °C
SG DC_Average Heat Flux 5	-2.88352 W/m^2	Achieved (IT = 494)	1.23042 W/m^2	-4.85994 W/m^2
SG InUp_Average Heat Flux 4	-22.6994 W/m^2	Achieved (IT = 496)	3.1821 W/m^2	-20.9943 W/m^2
SG Module_Average Heat Flux 6	24.6901 W/m^2	Achieved (IT = 491)	2.86966 W/m^2	27.0645 W/m^2
SG Корпус Average Heat Transfer Coefficient 13	3.80477 W/m^2/K	Achieved (IT = 32)	0.32196 W/m^2	3.94316 W/m^2/K
SG Корпус Average Heat Flux 14	131.608 W/m^2	Achieved (IT = 45)	13.9102 W/m^2	135.927 W/m^2
SG Корпус Average Surface Heat Flux (Convective) 15	131.608 W/m^2	Achieved (IT = 45)	13.9102 W/m^2	135.927 W/m^2
SG Корпус Average Temperature (Solid) 18	54.4267 °C	Achieved (IT = 40)	3.37809 °C	54.3923 °C
SG Корпус Average Wall Temperature 16	54.4267 °C	Achieved (IT = 40)	3.37809 °C	54.3923 °C
SG Корпус Heat Transfer Rate (Convective) 17	76.4821 W	Achieved (IT = 45)	8.08369 W	78.9917 W

Рис 4.2 — Результати моделювання без вентилятора та пластини

4.3 Оптимізація розмірів корпусу з використанням поліноміальної регресії

З метою оптимізації теплового режиму було проаналізовано вплив габаритів корпусу при фіксованій площі на якій розміщується модуль, що дорівнює **$S = 37440 \text{ мм}^2$** (відповідає базовому розміру корпусу: 195 мм × 192 мм). При цьому довжина зменшувалась, а висота збільшувалась таким чином, щоб добуток залишався сталим або незначно меншим. Було змодельовано **дві серії симуляцій**: з монтажем модуля на **меншу** та на **більшу** стінку корпусу.

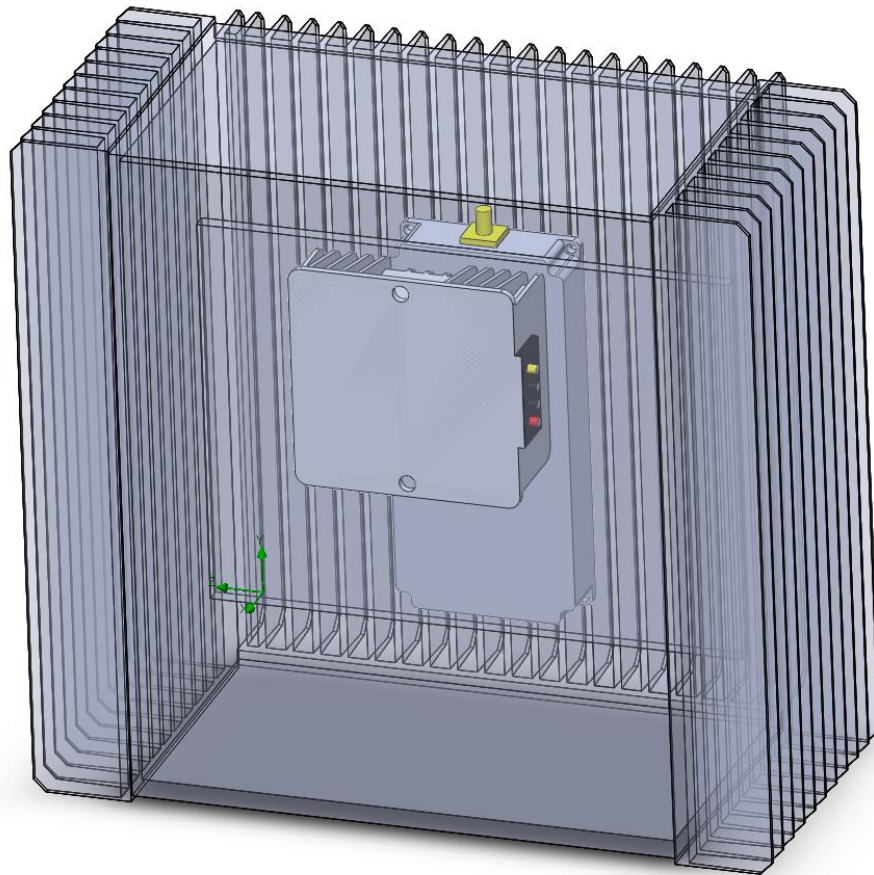


Рис 4.3 — Видозмінена модель

Мета:

З'ясувати, які пропорції корпусу забезпечують найкраще охолодження без збільшення площі корпусу.

Порівняння конфігурацій:

Розміщення на меншій стінці:

температура			
розміри	195	155	115
192	60.6	62.1	64.8
212	59.4	60.5	63.4
232	58.0	59.2	62.3

Рис 4.4 — Залежність температури від розмірів при розташування на модуля на меншій стінці.

Розміщення на більшій стінці:

розміри	195	155	115
192	57.9	60.6	63.3
212	56.5	58.8	62.0
232	55.3	57.5	60.5

Рис 4.5 — Залежність температури від розмірів при розташування на модуля на більшій стінці.

Основні висновки:

- Найбільш ефективні конфігурації при сталому S мають меншу довжину і більшу висоту.
- Це пов'язано з тим, що збільшення висоти сприяє посиленню природної конвекції, що частково компенсує втрату площі тепловідведення при зменшенні довжини.
- Однак при надто малих довжинах (115 мм) температура знову зростає, через обмежене відведення тепла через поверхню.

По результатам 2 серій симуляцій було виявлено, що розміщення модуля на більшій стінці ефективніше розсіює тепло. Температура в середньому менша на $\sim 2^{\circ}\text{C}$

Пошук оптимальних розмірів конструкції:

Побудована поліноміальна регресійна модель наведена в додатку Б

Використана **регресійна модель другого ступеня** дозволяє побудувати тривимірну поверхню залежності температури від геометричних розмірів корпусу. Отримані результати демонструють **оптимум** у діапазоні:

- Довжина L : **155–165 мм**
- Висота H : **212–222 мм**

$$T = a_0 + a_1L + a_2H + a_3L^2 + a_4H^2 + a_5LN \quad (4.2)$$

де:

- T — максимальна температура модуля,
- L — довжина корпусу,
- H — висота корпусу,
- a_i — коефіцієнти регресії, визначені методом найменших квадратів.

Переваги такого підходу:

- Можливість визначити оптимальну конфігурацію **без фізичних експериментів**.
- За допомогою математичної моделі можна прогнозувати поведінку системи при нових розмірах, зекономивши ресурси на симуляціях.

Отже, **оптимізація геометрії корпусу при фіксованій площі** дозволяє значно покращити температурні характеристики модуля навіть **без застосування активного охолодження**, якщо правильно підібрано пропорції. Результати зведено в поверхневий 3Д графік на рис. 4.6.

4.4 Графічна інтерпретація результатів

Для візуалізації результатів чисельного моделювання було виконано побудову графіка залежності максимальної температури модуля РЕБ від геометричних розмірів корпусу. У процесі оптимізації враховувалися дві ключові змінні: довжина корпусу (L) та його висота (H). Було змодельовано 9 конфігурацій з різними комбінаціями цих параметрів, розташовуючи модуль на великій та маленькій стінці корпусу.

Побудований 3D-графік зображений на рис.4.6 дозволяє оцінити просторовий характер впливу габаритів на температурний режим. У результаті аналізу спостерігається чітка тенденція: зі зменшенням довжини корпусу та збільшенням його висоти відбувається покращення тепловідведення і, відповідно, зниження максимальної температури модуля.

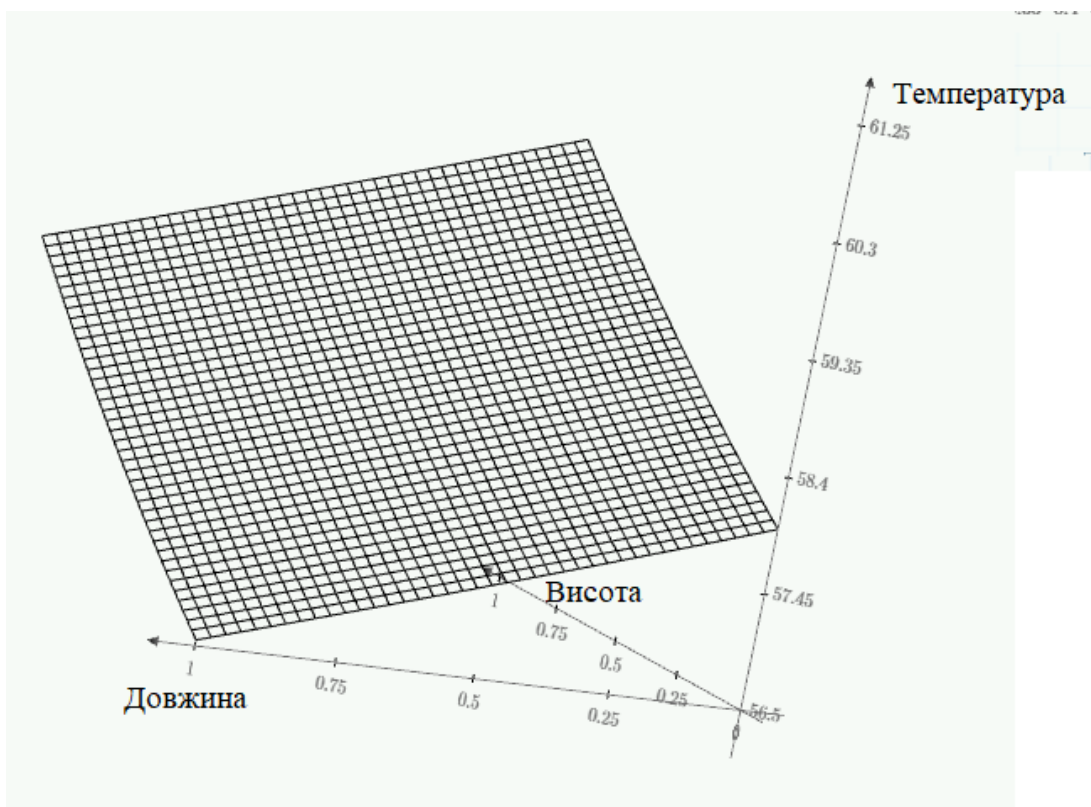


Рис 4.6 — Візуалізація поверхневого 3Д графіку

Цей ефект можна пояснити зміною співвідношення між поверхнею тепловіддачі та внутрішнім об'ємом корпусу. Зростання висоти сприяє ефективнішому конвективному охолодженню, тоді як зменшення довжини дозволяє краще розподілити теплові потоки до бокових радіаторів.

Графіки зображені на рис.4.7 підтверджують наявність оптимальної зони, в якій температура модуля є мінімальною. Такі візуалізації дозволяють не лише оцінити ефективність конкретних конфігурацій, але й обґрунтовано обрати розміри корпусу для серійного виробництва, забезпечуючи надійність і температурну стабільність пристрою.

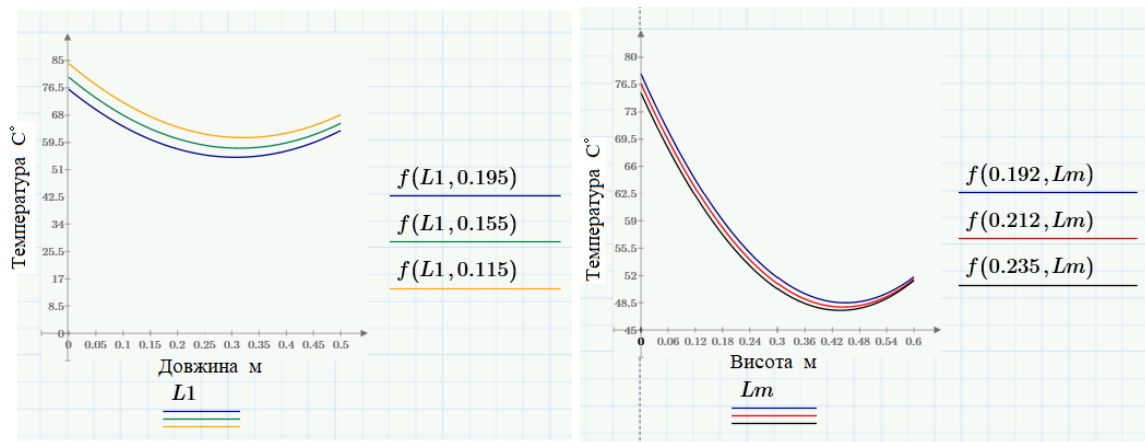


Рис 4.7 — Графіки впливу довжини та висоти на температуру

4.5 Моделювання удосконаленої конструкції

На основі проведеного аналізу та результатів чисельного моделювання була розроблена удосконалена конструкція модуля РЕБ. Основною метою даної конструкції було зниження температури при збереженні або навіть зменшенні габаритних розмірів. Для цього були впроваджені наступні зміни:

- зменшено довжину корпусу на 40 мм (до 155 мм);
- додано внутрішній радіатор до металевої пластини, що кріпиться на внутрішній частині верхньої кришки модуля;
- встановлено додаткові внутрішні радіатори на двох менших бічних стінках;
- змонтовано вентилятор для примусового охолодження;
- інтегровано пластикові перегородки для розділення та направлення повітряних потоків.

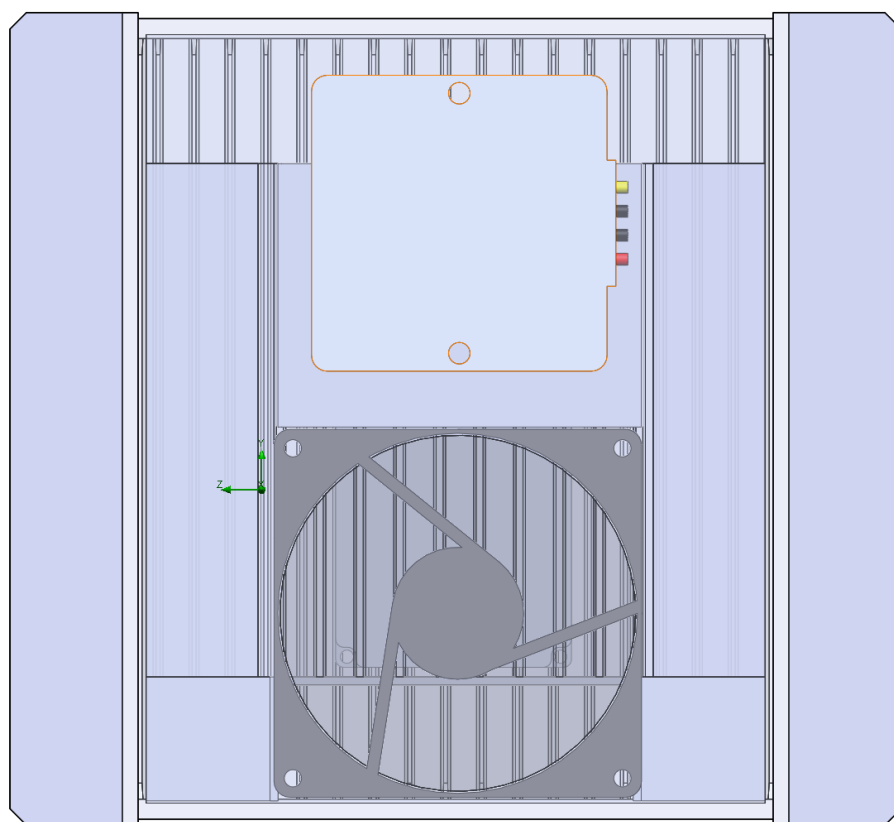


Рис 4.8 — Вид спереду удосконаленої конструкції

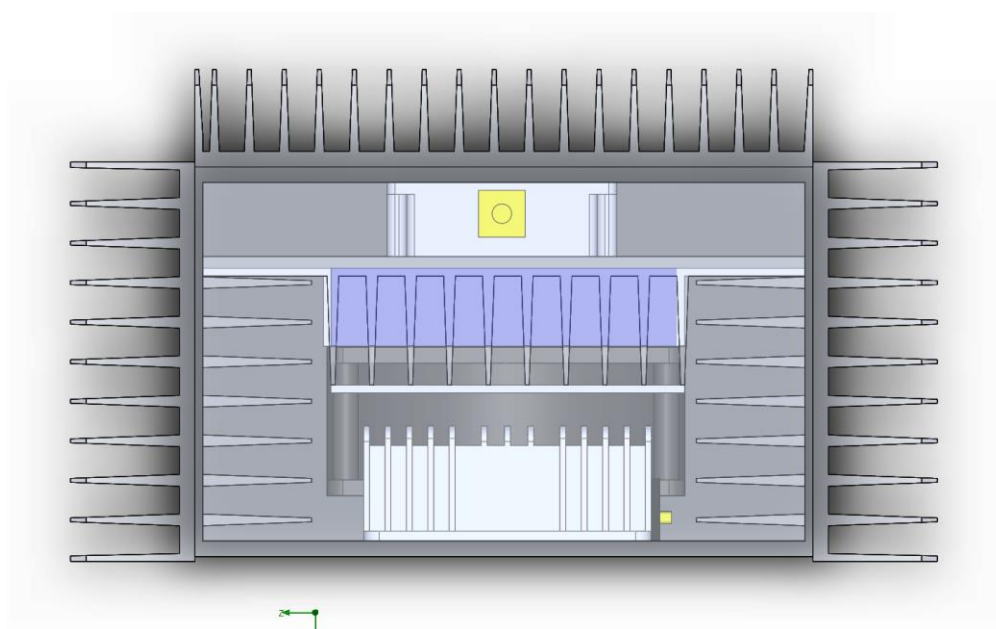


Рис 4.9 — Вид зверху удосконаленої конструкції

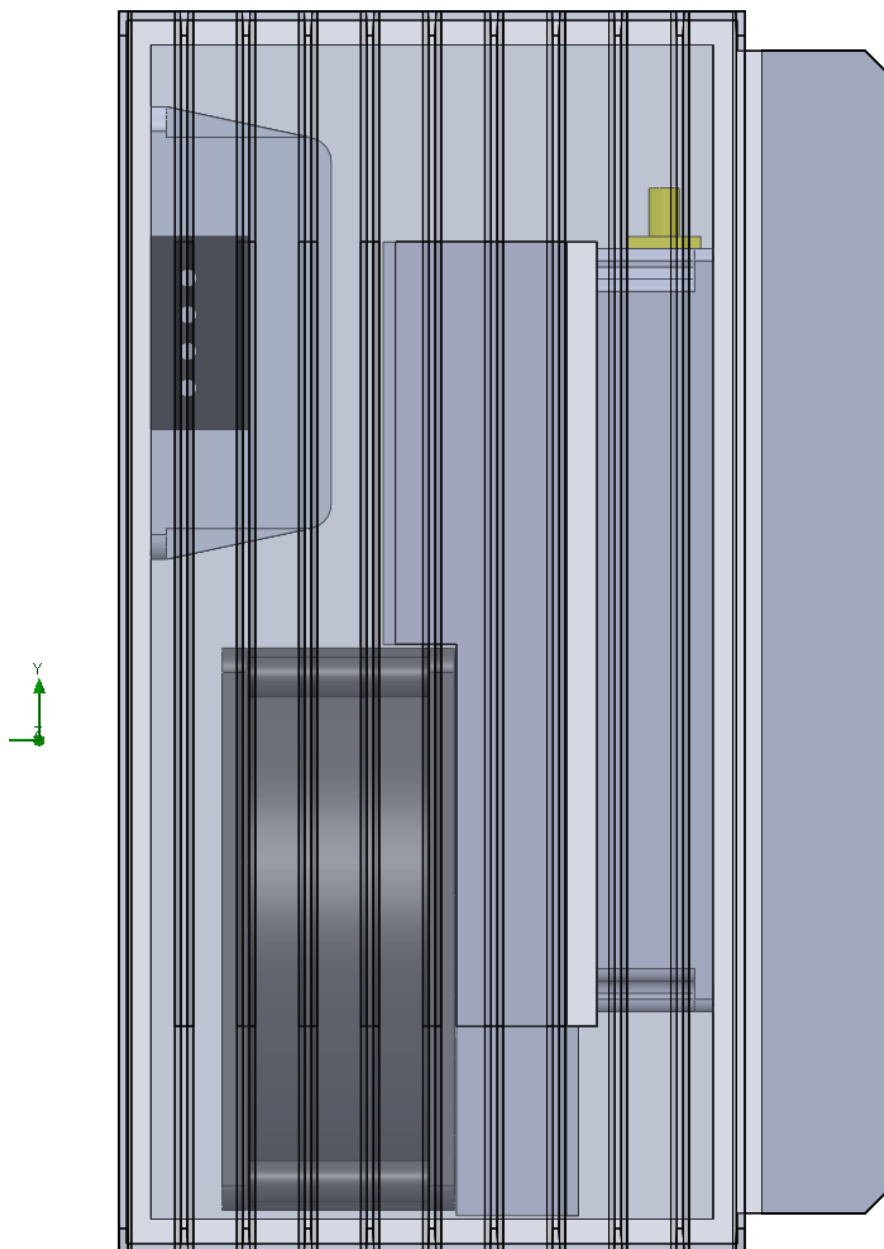


Рис 4.10 — Вид збоку удосконаленої конструкції

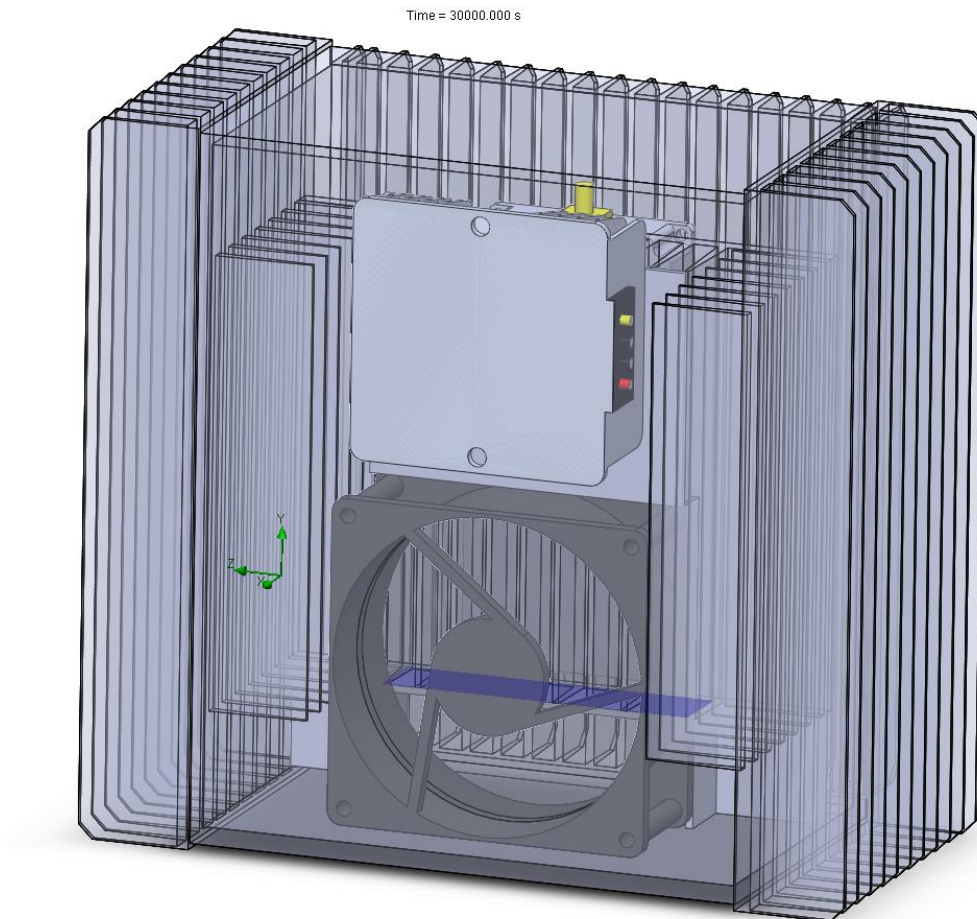


Рис 4.11 — Ізометричний вид удосконаленої конструкції

Було проведено дві симуляції: з активним охолодженням (увімкнений вентилятор) та без нього. У результаті:

- **з вентилятором** максимальна температура модуля **59.7 °C**;

Solver: DefaultDimensions(dcUp)(+0h)(-40L)(LsideModul)(test_sideDC)(radiatorModul)(Fan2)(peregorodkaFull)(1) [Default] (01.00 Модуль.SLDASM) - [List of Goals]				
File Calculation View Insert Window Help				
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
modul Average Total Temperature 5	59.4385 °C	Achieved (IT = 63)	1.97745 °C	59.4308 °C
modul Maximum Total Temperature 6	59.7508 °C	Achieved (IT = 63)	1.98144 °C	59.7408 °C
VG CASE Average Temperature (Solid) 1	56.4629 °C	Achieved (IT = 63)	1.93429 °C	56.4536 °C
VG CASE Maximum Temperature (Solid) 2	60.1436 °C	Achieved (IT = 63)	1.9829 °C	60.1339 °C
VG DC_Average Temperature (Solid) 3	54.9509 °C	Achieved (IT = 64)	1.92611 °C	54.9192 °C
VG DC_Maximum Temperature (Solid) 4	55.04 °C	Achieved (IT = 64)	1.92699 °C	55.0108 °C

Рис 4.12 — Результати моделювання удосконаленої конструкції

- без вентилятора – 60.3 °C.

Solver: DefaultDimensions(dcUp)(+0h)(-40L)(LsideModul)(test_sideDC)(radiatorModul)(NOFan2)(peregorodkaFull)(2) [Default] (01.00 Модуль.SLDASM) - [List of Goal]

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
modul Average Total Temperature 5	60.0641 °C	Achieved (IT = 55)	2.90912 °C	60.0748 °C
modul Maximum Total Temperature 6	60.2878 °C	Achieved (IT = 55)	2.91583 °C	60.2958 °C
VG CASE Average Temperature (Solid) 1	57.0897 °C	Achieved (IT = 55)	2.83084 °C	57.1187 °C
VG CASE Maximum Temperature (Solid) 2	60.6788 °C	Achieved (IT = 55)	2.91521 °C	60.6869 °C
VG DC_Average Temperature (Solid) 3	55.0691 °C	Achieved (IT = 57)	2.77218 °C	55.1007 °C
VG DC_Maximum Temperature (Solid) 4	55.1628 °C	Achieved (IT = 57)	2.76743 °C	55.1918 °C

Рис 4.13 — Результати моделювання удосконаленої конструкції без вентилятора.

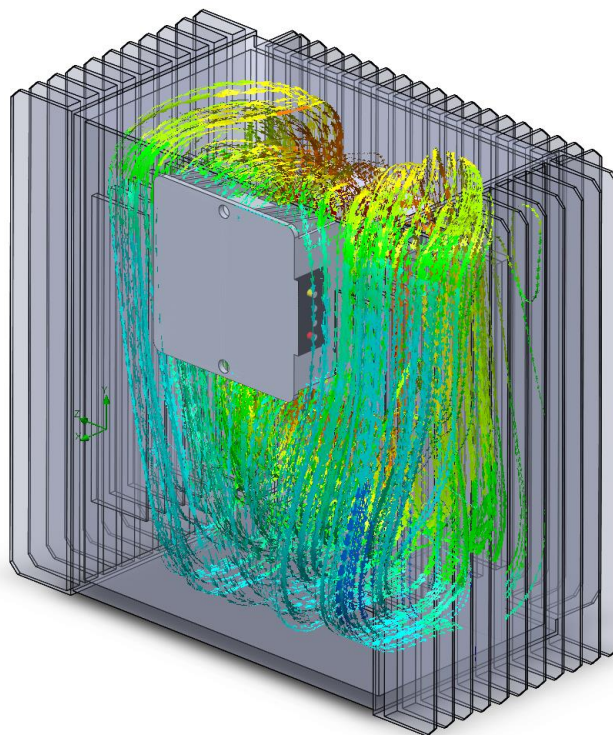


Рис 4.14 — Візуалізація теплових потоків удосконаленої конструкції.

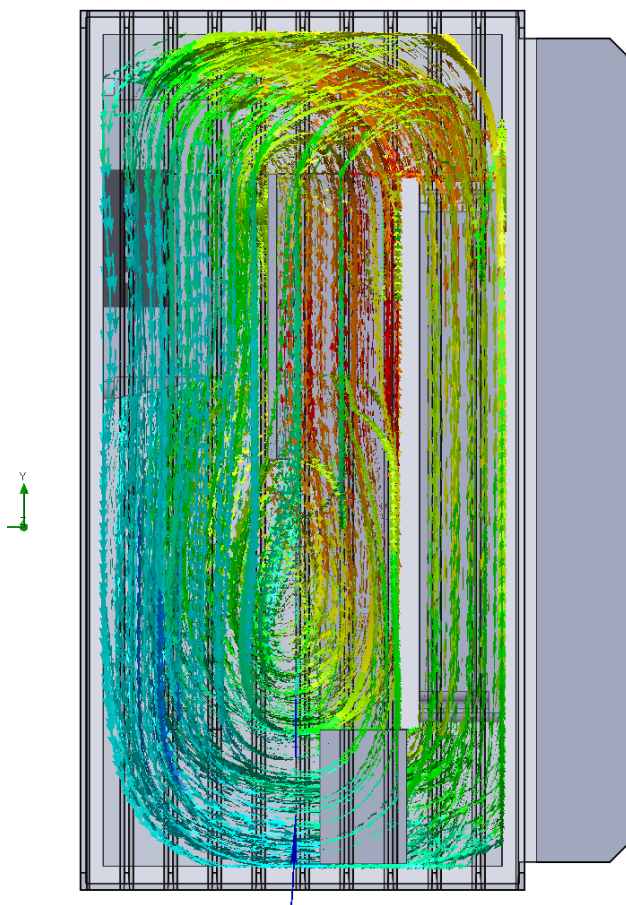


Рис 4.15 — Візуалізація теплових потоків, вид з боку

Порівнюючи ці значення з попередніми симуляціями (зокрема, 62.7 °C без вентилятора в базовій конфігурації), можна стверджувати про позитивний вплив удосконалень. Зниження температури більш ніж на 2 °C досягнуто навіть у пасивному режимі, що свідчить про ефективність нових тепловідвідних елементів, покращену циркуляцію повітря та малу потребу в вентиляторі.

Особливо важливо відзначити, що зниження температури було досягнуто при **одночасному зменшенні габаритів корпусу**, що вказує на ефективність розробленого конструктивного рішення. Це свідчить про те, що оптимізація тепловідводу може бути реалізована без

розширення габаритів, що критично важливо в умовах обмеженого простору.

ВИСНОВКИ

У межах дипломного дослідження проведено повноцінне теплове моделювання модуля радіоелектронної боротьби (РЕБ) із використанням програмного середовища SolidWorks Flow Simulation. Модуль, що аналізується, має тепловиділення близько 80 Вт при споживанні 120 Вт (ККД $\approx 40\%$).

Початкова симуляція була проведена з метою перевірки адекватності моделі. В ході моделювання максимальна температура модуля становила 59.7°C , тоді як під час лабораторних випробувань аналогічна конфігурація нагрівалася до 53.4°C . Відносна похибка склала $\approx 11.2\%$.

Далі були виконані симуляції з поетапним вилученням окремих елементів конструкції:

- Конфігурація 1 початкова модель: 57°C
- Конфігурація 2 (без бокового зовнішнього радіатора): 63.0°C
- Конфігурація 3 (додатково без внутрішнього верхнього радіатора): 63.3°C
- Конфігурація 4 (без внутрішнього радіатора на модулі): 64.4°C
- Еталонна симуляція (з великим кроком часу): 59.7°C
- Зміщення вентилятора вгору: 59.7°C
- Вимкнений вентилятор: 62.6°C
- Без вентилятора та прямої пластини: 62.7°C

Ці результати дозволили виявити ступінь впливу кожного конструктивного елемента на тепловий режим. Найбільший внесок у відведення тепла робить активне повітряне охолодження, хоча й пасивні елементи демонструють суттєву ефективність.

Після аналізу впливу окремих елементів було спроектовано оптимізовану конструкцію, яка включає:

- Зменшення довжини корпусу з 195 мм до 155 мм;
- Встановлення теплопровідної пластини між модулем та корпусом;
- Додаткові внутрішні радіатори на двох менших стінках;
- Встановлення вентилятора та перегородок для керування повітряними потоками.

У такій конфігурації отримано наступні результати:

- Температура з вентилятором: 59.7 °C
- Температура без вентилятора: 60.3 °C

Таким чином, різниця склала лише 0.6 °C, що свідчить про значний внесок пасивних елементів у забезпечення теплової стабільності, та малу ефективність вентилятора в даній конструкції.

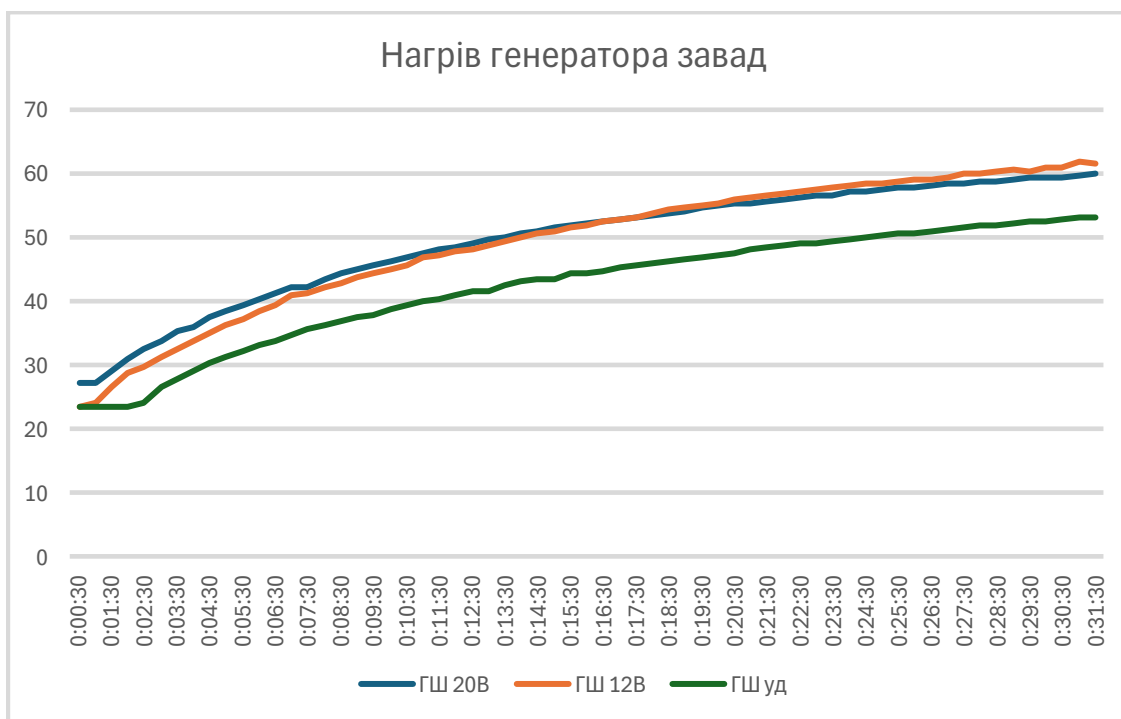
Окремим етапом стало дослідження впливу зміни габаритних розмірів корпусу (в межах довжини 195–115 мм та висоти 192–232 мм). Аналіз результатів із використанням поліноміальної регресії другого ступеня показав, що оптимальними розмірами з найменшою температурою є 0.3м по довжині, та 0.43м по висоті .

Таким чином отримано оптимальну конструкцію температура залишилась в межах допустимого при менших габаритах пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SolidWorks Flow Simulation 2024: Руководство пользователя [Електронний ресурс] / Dassault Systèmes. — Електрон. дані. — Режим доступу:
https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_sim_studentwb_2011_eng.pdf
2. Вентилятор PMD2409PMB1A: технічна специфікація / Sunon. — Електрон. дані. — Режим доступу:
<https://discon.ua/image/catalog/PDF/000014636.pdf>
3. Домнич В. І., Зінковський Ю. Ф. Конструирование РЭС. Оценка и обеспечение тепловых режимов : учеб. пособие. 1990. — 240 с.
4. Шилович Т. Б., Шилович І. Л. Основи теплопередачі. Теплообмінне обладнання : практикум. — К. : Ліра-К, 2020. — 184 с. — Режим доступу:
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/59b889eb-eb04-47c4-ad9e-011f7185f276/content>

ДОДАТОК А



	Е	Ғ	Г	Н	І	Ј	К	Л	М	Н	О	Р
1	РГШ 20В	РГШ 12В	РГШ уд	РБЖ 20В	РБЖ 12В	РБЖ уд	Повітря 2	Повітря 1	Повітря у	Корпус 20	Корпус 12	Корпус уд
216			53,23			43,75			51,96			49,26

ДОДАТОК Б

Програма обробки результатів досліджень

Матриця плану повного факторного експерименту 2^3 , позначена змінною X , створюється функцією *fullfact*, де задається кількість факторів та кількість рівнів зміни факторів.

$$X := \text{fullfact}(2, 3) = \begin{bmatrix} \text{"Run"} & \text{"Block"} & \text{"A"} & \text{"B"} \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 2 & 0 \\ 4 & 1 & 0 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 1 & 2 & 1 \\ 7 & 1 & 0 & 2 \\ 8 & 1 & 1 & 2 \\ 9 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

Змінній $Vals$ присвоєно значення факторів, які використовуються в експерименті. L – довжина внутрішньої стінки (м),
 H – висота внутрішньої стінки (м).

$$Vals := \begin{bmatrix} \text{"L"} & 0.195 & 0.155 & 0.115 \\ \text{"H"} & 0.192 & 0.212 & 0.232 \end{bmatrix}$$

Матриця плану експерименту 2^3 з підставленими значеннями факторів

$D := \text{doelabel}(X, Vals) =$	“Run”	“Block”	“L”	“H”
	1	1	0.195	0.192
	2	1	0.155	0.192
	3	1	0.115	0.192
	4	1	0.195	0.212
	5	1	0.155	0.212
	6	1	0.115	0.212
	7	1	0.195	0.232
	8	1	0.155	0.232
	9	1	0.115	0.232

Температури отримані за результатами моделювання в середовищі SolidWorks FlowSimulation, записані у вигляді векторів, де кожен рядок відповідає результатам, отриманим при значенні вхідних факторів з відповідного рядка матриці плану експерименту. Т – температура модулю C°

$T :=$	57.9
	60.6
	63.3
	56.5
	58.8
	62
	55.35
	57.3
	60.5

Розрахунок коефіцієнтів регресії для полінома другого ступеня

polyfitc(X, T, 2) =	“Term”	“Coefficient”	“Std Error”	“95% CI Low”	“95% CI High”	“VIF”	“T”
	“Intercept”	57.982	0.204	57.332	58.632	<i>NaN</i>	283.766
	“A”	2.021	0.354	0.895	3.147	14.5	5.71
	“B”	-1.496	0.354	-2.622	-0.37	14.5	-4.227
	“AB”	-0.062	0.114	-0.425	0.3	4	-0.549
	“AA”	0.358	0.161	-0.154	0.871	13	2.226
	“BB”	0.058	0.161	-0.454	0.571	13	0.362 ...

$$c := \text{polyfitc}(X, T, 2)^{(1)}$$

Апроксимація функції

$$\text{yield}(A, B) := c_1 + c_2 \cdot A + c_3 \cdot B + c_4 \cdot A \cdot B + c_5 \cdot A^2 + c_6 \cdot B^2$$

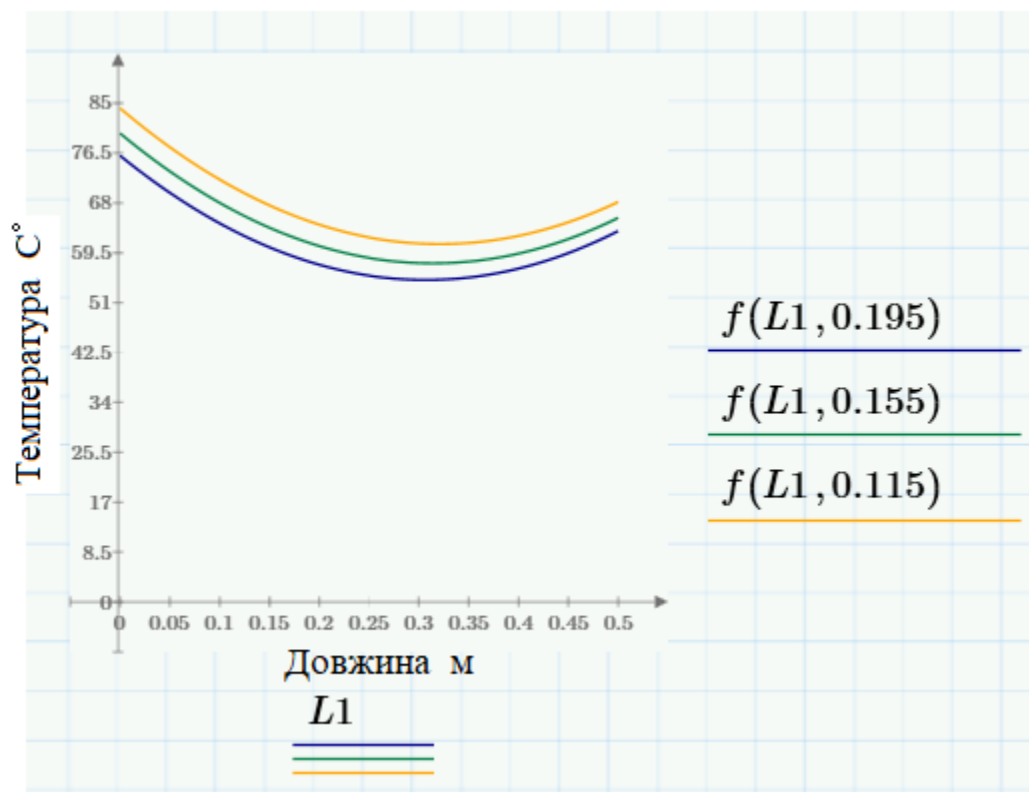
$$\text{Yield} := \text{polyfit}(D, T, 2)$$

Yield – назва апроксимованої функції, polyfit – функція, що розраховує за матрицею плану експерименту та результатами експерименту коефіцієнти полінома.

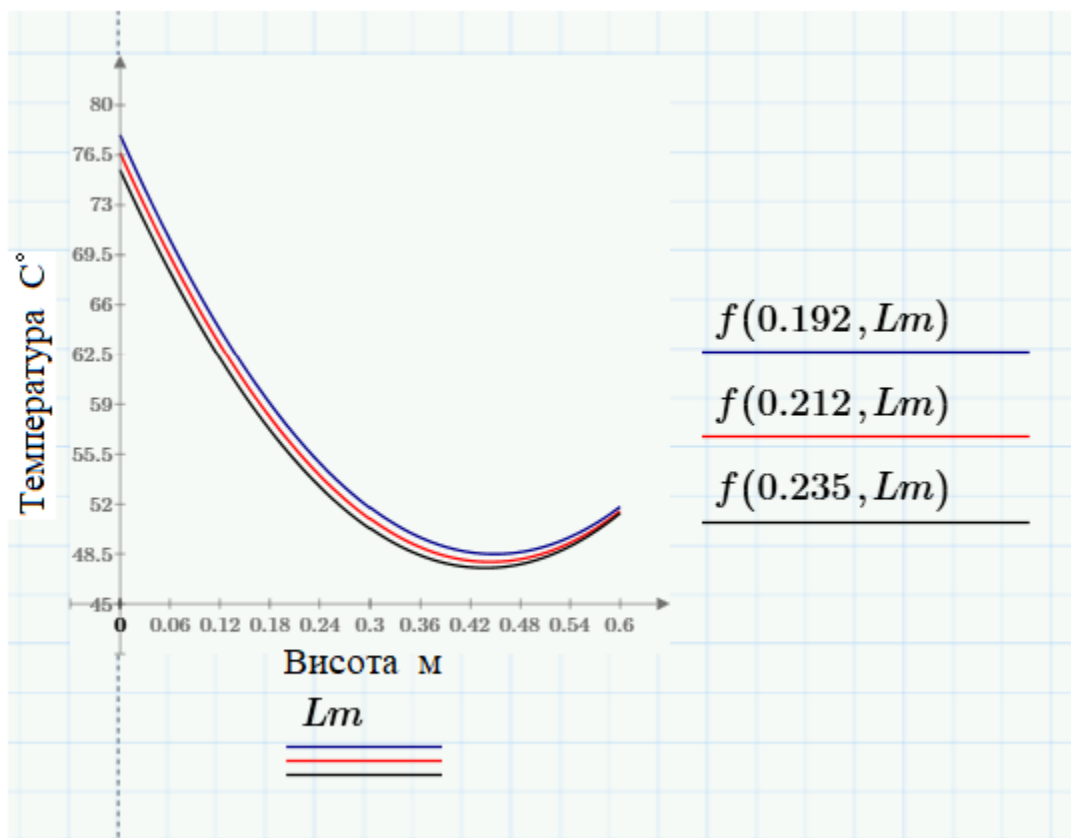
Побудова функції

$$f(a, b) := \text{Yield}\left(\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}\right)$$

Побудова залежності температури від довжини



Побудова залежності температури від висоти



Побудова залежності температури від довжини та висоти на тривимірному графіку.

