

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Дослідження каскадної системи охолодження
електропобутового пристрою на основі
термоелектричного ефекту

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

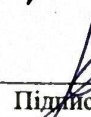
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-24-1


Підпис


Підкова Д.В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата


проф. д.т.н., Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

С.І. Пучин
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. к.т.н., Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 202 5 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр і назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»


Шифр і назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доцент Неймак В.С.

 12 .2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Підкова Денис Віталійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

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

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Технологічні та технічні рішення каскадних систем охолодження на основі термоелектричного ефекту

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз технологічних та технічних рішень термоелектричних процесів та обладнання для генерації холоду. 2. Аналіз та теоретичне обґрунтування роботи каскадних термоелектричних систем охолодження. 3. Розробка конструкції лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження. 4. Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Пристрої для охолодження на основі термоелектричного ефекту. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Лабораторна установка. Схема структурна (A1). Аркуш 3. Лабораторна установка. Схема електрична (A1). Аркуш 4. Лабораторна установка. Складальне креслення (A1). Аркуш 5. Лабораторна установка. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Дослідження каскадного з'єднання елементів Пельтьє. Результати

дослідження (A1). Аркуш 7. Результати розрахунків для двокаскадного модуля Пельтьє. Результати розрахунків (A2).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

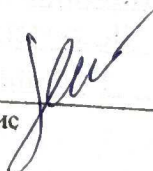
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технологічних та технічних рішень термоелектричних процесів і обладнання для генерації холоду	до 15.10.25р.	
2. Аналіз та теоретичне обґрунтування роботи каскадних термоелектричних систем охолодження	до 30.10.25р.	
3. Розробка конструкції лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження	до 5.11.25р.	
4. Експериментальне дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту	до 20.11.25р.	
5. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.25р.	

Студент


Підпис

Д.В. Підкова
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

М.С. Скиба
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Підкова Денис Віталійович
2. Тема магістерської роботи Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 76 стор.

5. Ця робота присвячена дослідженню каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту з метою визначення ефективних температурних режимів та підвищення енергоефективності процесу охолодження.

Запропоновано конструкцію каскадної термоелектричної системи охолодження, здійснено підбір основних термоелектричних модулів Пельтьє та елементів системи тепловідведення, що забезпечують необхідні параметри холодопродуктивності та стабільність роботи установки.

У роботі описується розробка та реалізація лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту.

У розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні теоретичні та експериментальні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

У першому розділі розглянуто термоелектричні процеси генерації холоду та виконано огляд і аналіз технічних рішень охолоджувальних пристроїв на основі ефекту Пельтьє.

У другому розділі наведено теоретичне обґрунтування роботи каскадних термоелектричних систем охолодження. Подано основні розрахункові залежності для визначення холодопродуктивності, електричної потужності, температурних перепадів та ефективності однокаскадних і багатокаскадних модулів Пельтьє.

У третьому розділі представлено конструкцію лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою, на якій показано основні складові елементи установки. Наведено структурну та електричну схеми, виконано вибір основних компонентів та розроблено систему тепловідведення каскадного термоелектричного модуля.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження каскадної системи охолодження, виконано вимірювання основних температурних та енергетичних параметрів і наведено результати досліджень.

Підпис студента Дід

« 10 » 12 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК

Протокол 1 від « 18 » 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно / 4 / 100

Рекомендації ЕК Виробляється у навчальній процесі

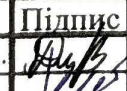

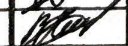

Особливі відмітки -

Технічний секретар Гармас А.В.

« 18 » 12 20 25 р.

ЗМІСТ

	с.
Вступ	7
1 Огляд та аналіз технологічних та технічних рішень термоелектричних процесів та обладнання для генерації холоду	9
1.1 Теоретичні передумови отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту	9
1.2 Огляд та аналіз пристроїв для охолодження на основі термоелектричного ефекту	18
1.3 Висновки до першого розділу	26
2 Аналіз та теоретичне обґрунтування роботи каскадних термоелектричних систем охолодження	27
2.1 Теоретичні основи побудови та функціонування каскадних модулів Пельтьє	27
2.2 Розрахунок однокаскадних і багатокаскадних термоелектричних модулів Пельтьє	37
2.3 Висновки до другого розділу	41
3 Розробка конструкції лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження	42
3.1 Розробка структурної схеми лабораторної установки	42
3.2 Розробка електричної схеми лабораторної установки	49
3.3 Розробка системи тепловідведення каскадного модуля Пельтьє	52
3.4 Висновки до третього розділу	58
4 Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту	59
4.1 Дослідження каскадного з'єднання елементів Пельтьє	59

МРМА 25.00.00.000 ПЗ									
Зм.	Адк.	№докум.	Підпис	Дата	Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту	Літера	Аркуш	Аркушів	
		Підкова Д.В.						5	76
		Скиба М.Є.							
		Пундик С.І.							
		Неймак В.С.							
					ХНУ, гр. ЕТм-24				

4.2 Калориметричний розрахунок двокаскадного модуля Пельтье	71
4.3 Висновки до четвертого розділу	73
Висновки.....	74
Перелік джерел посилань.....	75

ВСТУП

Актуальність магістерської роботи. Охолодження є важливою технологічною складовою у широкому спектрі сфер – від електроніки та медицини до промислових застосувань, де стабільність температурного режиму визначає надійність та ефективність роботи обладнання.

Одним із перспективних підходів до отримання холоду є термоелектричне охолодження на основі ефекту Пельтьє, яке вирізняється компактністю, екологічністю, відсутністю рухомих частин та можливістю точного керування температурою. Серед сучасних технічних рішень особливу увагу привертають каскадні системи охолодження, що дають змогу досягати значно нижчих температур порівняно з одноелементними модулями та відкривають можливості для створення високоефективних малогабаритних холодильних пристроїв. Разом із тим актуальним залишається питання визначення їх реальних робочих характеристик, оптимальних режимів живлення та умов ефективного тепловідведення. Саме необхідність підвищення ефективності й надійності термоелектричних систем охолодження визначає актуальність даної роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є дослідження каскадної системи охолодження на основі термоелектричного ефекту та розробка лабораторної установки для визначення її характеристик у різних режимах роботи.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконати такі завдання:

- проаналізувати теоретичні основи термоелектричного ефекту та процесів охолодження в модулях Пельтьє;
- здійснити огляд існуючих технічних рішень та конструкцій термоелектричних охолоджувальних пристроїв;
- провести теоретичний розрахунок однокаскадних і багатокаскадних модулів Пельтьє та визначити особливості їх роботи;
- розробити структурну та електричну схеми лабораторної установки для дослідження каскадної системи;

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		7

- спроектувати систему тепловідведення каскадного модуля Пельтьє;
- провести експериментальні дослідження каскадної системи та оцінити її холодопродуктивність.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес охолодження каскадною системою, що побудована на базі термоелектричних модулів Пельтьє.

Предметом дослідження є параметри функціонування каскадної термоелектричної системи, зокрема електричні режими, особливості тепловідведення та конструктивні рішення лабораторної установки.

Наукова новизна отриманих результатів. У рамках дослідження встановлено залежності між електричними режимами живлення каскадної системи, тепловими характеристиками радіаторів та температурними параметрами холодної сторони каскаду. Отримано нові експериментальні дані щодо роботи багатокаскадних модулів Пельтьє в лабораторній установці, що дозволило уточнити особливості розподілу температур між каскадами. Запропоновано методичний підхід до оцінки ефективності каскадних модулів в залежності від струму живлення, теплового навантаження та параметрів тепловідведення, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності охолодження.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена лабораторна установка може бути використана в навчальному процесі для демонстрації принципів термоелектричного охолодження та дослідження властивостей каскадних модулів. Отримані результати можуть слугувати основою для створення компактних та енергоощадних охолоджувальних систем для електронних компонентів, сенсорів та прецизійних приладів. Практичні рекомендації щодо вибору режимів живлення і параметрів тепловідведення дозволяють застосовувати каскадні модулі Пельтьє у спеціалізованих технічних системах, де необхідне досягнення низьких температур в обмежених габаритах.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		8

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ХОЛОДУ

1.1 Теоретичні передумови отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту

Термоелектричний ефект є одним із найцікавіших та найперспективніших явищ сучасної фізики твердого тіла, який полягає у взаємному перетворенні теплової та електричної енергії. Його сутність полягає в тому, що за наявності різниці температур між двома ділянками електропровідного матеріалу або під дією електричного струму в ньому виникають термоелектричні процеси, здатні або генерувати електричну напругу, або створювати різницю температур. Іншими словами, термоелектричний ефект дозволяє безпосередньо перетворювати тепло в електрику і навпаки, без використання проміжних механічних елементів або робочих тіл, як це відбувається в традиційних холодильних чи енергетичних системах [1].

Фізична природа цього явища полягає у тому, що при наявності температурного градієнта змінюється концентрація та енергія носіїв заряду (електронів і дірок) у матеріалі. Вони починають переміщуватися від області з більшою температурою до області з меншою, утворюючи при цьому електричне поле або, навпаки, поглинаючи або виділяючи тепло при протіканні струму. Така взаємодія між потоками теплової та електричної енергії є основою роботи термоелектричних систем, у яких тепло та електрика пов'язані на мікроскопічному рівні [1].

Термоелектричний ефект лежить в основі роботи кількох важливих типів пристроїв - термоелектричних генераторів, термопар, сенсорів температури, а також термоелектричних охолоджувачів, відомих як елементи Пельтьє. Залежно від напрямку процесу, термоелектричний ефект може використовуватися як для перетворення теплової енергії у електричну (у випадку термоелектрогенерато-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		9

рів), так і для створення холоду шляхом перенесення тепла під дією електричного струму (у термоелектричних холодильниках).

Особливістю термоелектричних пристроїв є їхня повна відсутність рухомих частин, що робить їх надзвичайно надійними, довговічними та безшумними у роботі. Вони не потребують мастильних матеріалів або компресорів, а отже, можуть функціонувати у важкодоступних або агресивних середовищах, де застосування звичайних холодильних систем неможливе. Саме ці властивості обумовлюють широке використання термоелектричних систем у сучасній техніці – від охолодження процесорів, лазерних діодів і матриць камер до стабілізації температури біомедичних приладів, міні-холодильників та енергетичних установок космічного призначення [1].

Функціонування термоелектричних охолоджувачів базується на трьох взаємопов'язаних фізичних явищах – ефекті Зеебека, ефекті Пельтьє та ефекті Томсона. Ці ефекти є різними проявами одного й того ж фундаментального принципу взаємодії теплових і електричних потоків у провідниках та напівпровідниках. Проте кожен з них описує різні аспекти цієї взаємодії:

- ефект Зеебека пояснює виникнення електрорушійної сили у колі з різних матеріалів при наявності різниці температур;
- ефект Пельтьє описує виділення або поглинання тепла на контакті різних матеріалів при протіканні електричного струму;
- ефект Томсона розкриває процеси поглинання чи виділення тепла всередині одного провідника, якщо через нього проходить струм у присутності температурного градієнта.

Ефект Зеебека є одним із фундаментальних термоелектричних явищ, відкритих на початку XIX століття. У 1821 році німецький фізик Томас Йоганн Зеебек виявив, що якщо замкнути електричне коло з двох різних провідників і створити різницю температур між місцями їхнього з'єднання (спаями), у колі виникає електрорушійна сила (ЕРС) і починає протікати електричний струм. Це явище отримало назву ефект Зеебека.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		10

Фізична природа ефекту полягає у тому, що при нагріванні одного спаю провідника енергія носіїв заряду (електронів або дірок) збільшується, що призводить до їх більш інтенсивного руху у напрямку холоднішої області. У результаті цього в системі виникає розподіл електричних потенціалів на гарячому спаю накопичуються носії з більшою енергією, а на холодному з меншою енергією. Таким чином, між спаями виникає електрорушійна сила, пропорційна різниці температур [2].

У найпростішому випадку ефект Зеєбека можна описати рівнянням:

$$E = \alpha \cdot (T_2 - T_x), \quad (1.1)$$

де E – термоелектрорушійна сила (ЕРС), що виникає у колі;

α – коефіцієнт Зеєбека, який є характеристикою конкретного матеріалу;

T_2 і T_x – температури гарячого та холодного спаїв відповідно.

Коефіцієнт Зеєбека α залежить від типу матеріалу, його кристалічної структури, концентрації носіїв заряду та температури. Для металів його значення, як правило, становить кілька мікрвольт на градус ($\mu V/^\circ C$), тоді як для напівпровідників воно може досягати сотень мікрвольт на градус, що робить саме напівпровідникові матеріали найбільш придатними для створення термоелектричних пристроїв [2].

Суттєвим є те, що знак коефіцієнта Зеєбека визначається типом основних носіїв заряду: у матеріалах n -типу (де переважають електрони) коефіцієнт має від'ємне значення, а у матеріалах p -типу (де основними носіями є дірки) – додатне. Це дозволяє створювати пари елементів, які при з'єднанні послідовно утворюють термобатарею, здатну генерувати значну напругу.

Завдяки цій властивості ефект Зеєбека використовується у термопарах – простих і надійних датчиках температури. У такому пристрої один спай підтримується при відомій температурі (референсній), а інший знаходиться у середовищі, температуру якого потрібно виміряти. Різниця потенціалів, що виникає

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		11

між спаями, прямопропорційна різниці температур, тому, вимірявши напругу, можна визначити температуру об'єкта [2].

Для точного опису ефекту Зеєбека у випадку, коли температурна різниця значна, використовують інтегральну форму рівняння:

$$E = \int_{T_x}^{T_2} \alpha(T) \cdot dT, \quad (1.2)$$

де $\alpha(T)$ – температурна залежність коефіцієнта Зеєбека.

Такий підхід дозволяє враховувати зміну властивостей матеріалу з температурою, що особливо важливо для точних вимірювань і моделювання термоелектричних систем.

З практичної точки зору, ефект Зеєбека є не лише основою для вимірювання температури, але й фундаментальним принципом роботи термоелектрогенераторів. У таких пристроях теплова енергія, що надходить від різниці температур, перетворюється безпосередньо у електричну. Це дозволяє створювати джерела живлення для автономних систем, космічних апаратів, сенсорів і приладів, які працюють у важкодоступних місцях, де традиційні джерела енергії неможливо застосувати.

Ефект Томсона являє собою термоелектричне явище, яке полягає у виділенні або поглинанні тепла всередині однорідного провідника або напівпровідника, через який проходить електричний струм, якщо вздовж нього існує різниця температур. Це означає, що коли по провіднику протікає струм і одна його частина нагріта, а інша холодніша, у матеріалі додатково виникає тепловий обмін, зумовлений не лише звичайним джоулевым нагрівом, а й взаємодією струму з температурним градієнтом.

Явище було відкрито англійським фізиком Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном) у 1851 році. На відміну від ефектів Зеєбека та Пельтьє, які спостерігаються лише в контакті двох різнорідних матеріалів, ефект Томсона проявляється в одному матеріалі. Якщо напрям струму збігається з напрямом зростання

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		12

температури, то в матеріалі може відбуватися поглинання тепла; якщо ж струм спрямований у протилежний бік – виділення тепла. Знак і величина цього ефекту залежать від властивостей речовини та визначаються коефіцієнтом Томсона (τ), який показує, скільки теплоти виділяється або поглинається на одиницю заряду при проходженні через температурний градієнт [3].

Математично ефект Томсона описується співвідношенням:

$$Q_T = \tau \cdot I \cdot \frac{dt}{dx}, \quad (1.3)$$

де Q_T – кількість тепла, що виділяється або поглинається;

τ – коефіцієнт Томсона;

I – сила струму;

$\frac{dt}{dx}$ – температурний градієнт уздовж провідника.

Цей ефект відіграє важливу роль у термодинамічному описі всіх термоелектричних процесів. Лорд Кельвін довів, що між ефектами Зеебека, Пельтьє та Томсона існує взаємозв'язок, який описується рівняннями Кельвіна. Вони свідчать, що всі три ефекти мають спільну фізичну природу, а коефіцієнти, що їх характеризують, пов'язані через температуру та електричні властивості матеріалу [3].

Хоча ефект Томсона має менший вплив на загальну роботу термоелектричних систем, ніж ефекти Зеебека і Пельтьє, він є важливим для точних розрахунків теплового балансу в елементах Пельтьє та термоелектричних генераторах. У високоточних моделях розподілу температури та енергії його обов'язково враховують для забезпечення максимальної ефективності охолодження або перетворення тепла в електроенергію.

Ефект Пельтьє є другим фундаментальним термоелектричним явищем, тісно пов'язаним із ефектом Зеебека, проте має протилежну фізичну суть. Його відкрив у 1834 році французький фізик Жан-Шарль Пельтьє, який експеримен-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		13

тально встановив, що при пропусканні електричного струму через коло, утворене двома різними провідниками або напівпровідниками, на місцях їхнього контакту відбувається або виділення, або поглинання тепла, залежно від напрямку струму.

Інакше кажучи, коли електричний струм проходить через з'єднання двох різнорідних матеріалів, на одному спаю спостерігається поглинання теплової енергії (охолодження), а на іншому – виділення тепла (нагрівання). При цьому кількість тепла, що переноситься, прямо пропорційна силі струму, який проходить через коло. Цей процес отримав назву ефект Пельтьє і є основою роботи сучасних термоелектричних холодильників, або елементів Пельтьє [4].

Кількісно ефект Пельтьє описується рівнянням:

$$Q_p = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (1.4)$$

де Q_p – кількість теплоти, що виділяється або поглинається,
 Π – коефіцієнт Пельтьє, який залежить від пари матеріалів,
 I – сила електричного струму,
 t – час протікання струму.

Коефіцієнт Пельтьє Π виражає кількість тепла, яке переноситься одним кулоном заряду через спай і є термоелектричною характеристикою конкретної пари матеріалів. Його чисельне значення пов'язане з коефіцієнтом Зеєбека співвідношенням, відомим як співвідношення Кельвіна [4]:

$$\Pi = \alpha \cdot T, \quad (1.5)$$

де α – коефіцієнт Зеєбека;
 T – абсолютна температура.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		14

Коли через модуль Пельтьє пропускається постійний струм, на одній його поверхні утворюється зона охолодження, з якої тепло поглинається, а на протилежній – зона нагріву, де це тепло виділяється. Якщо змінити полярність живлення, напрям переносу тепла змінюється, і «холодна» сторона стає «гарячою». Ця властивість робить термоелектричні модулі універсальними, адже вони можуть працювати як у режимі охолодження, так і в режимі нагріву.

Також пояснити ефект Пельтьє можна через генерацію та рекомбінацію електронно-діркових пар у напівпровідниках р-типу та n-типу під час проходження електричного струму (рис. 1.2).

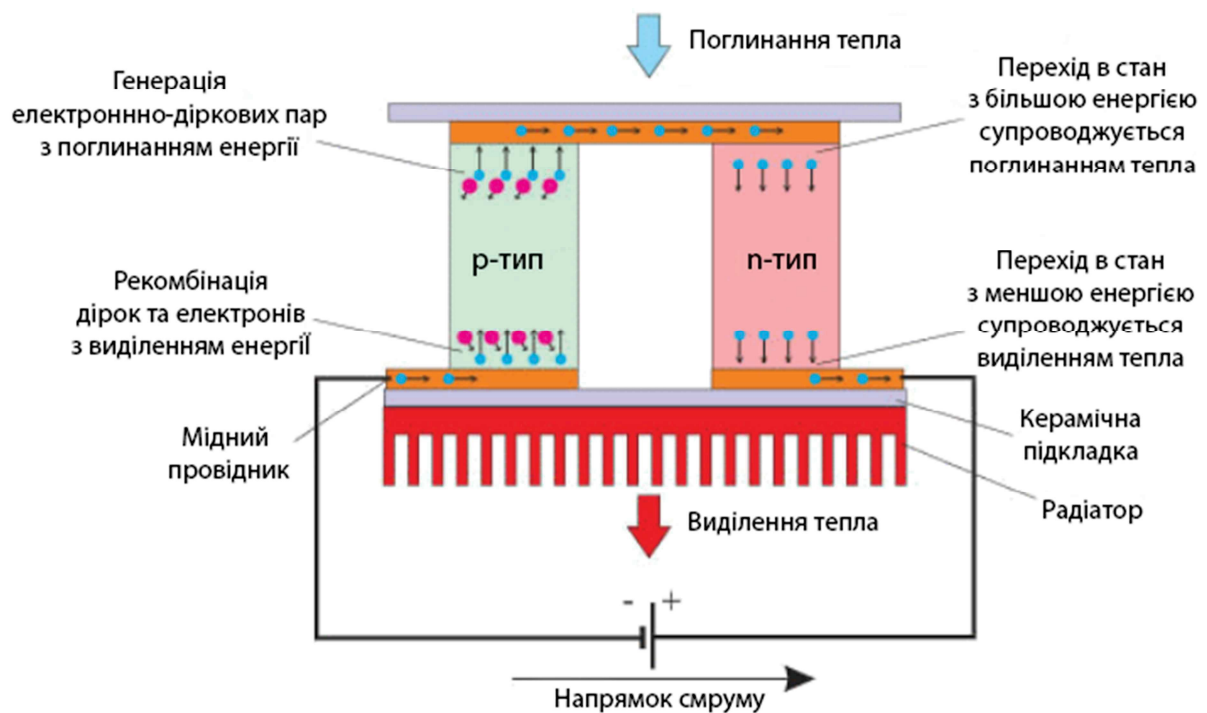


Рисунок 1.2 – Принцип роботи елемента Пельтьє

Коли струм проходить через провідник і переходить у *p*-типовий напівпровідник, відбувається генерація електронно-діркових пар, що супроводжується поглинанням енергії. Це призводить до відбору тепла з верхньої поверхні моду-

ля, таким чином формується холодна сторона. У p -типі дірки рухаються донизу, а електрони вгору, що забезпечує стабільне перенесення теплової енергії.

У нижній частині p -типового матеріалу відбувається рекомбінація електронів і дірок, унаслідок чого енергія вже виділяється. Аналогічні процеси спостерігаються і в n -типовому напівпровіднику: під час переходу носіїв у стан із більшою енергією тепло поглинається, а під час переходу в стан із меншою енергією – виділяється. У результаті теплова енергія переноситься від холодної поверхні до гарячої.

Однією з ключових переваг ефекту Пельтьє є відсутність рухомих частин та робочих тіл. Це забезпечує безшумну роботу, високу надійність і можливість точного керування температурою шляхом регулювання сили струму. Завдяки цьому ефект Пельтьє широко використовується у медичному обладнанні, лазерній техніці, системах стабілізації температури сенсорів, мікропроцесорів, а також у портативних холодильниках.

Нині для виготовлення ефективних термоелементів використовують напівпровідники на основі сполук вісмуту-телуриду (Bi_2Te_3), селеніду сурми (Sb_2Se_3), свинцю-телуриду (PbTe), а також новітні наноструктуровані матеріали з пониженою теплопровідністю. Такі матеріали дозволяють досягати більшої різниці температур між гарячою та холодною поверхнями та зменшувати енергетичні втрати.

Всі ці ефекти утворюють цілісну теоретичну основу термоелектрики. Їхнє розуміння дає можливість створювати ефективні термоелектричні пристрої, підбирати оптимальні матеріали, підвищувати коефіцієнт корисної дії систем і розробляти нові типи енергозберігаючих технологій [5].

Сучасна теорія термоелектричних явищ базується на законах термодинаміки та кінетичній теорії переносу. Згідно з нею, рух носіїв заряду супроводжується переносом енергії, а теплові потоки можуть викликати появу електричних потенціалів. Це означає, що будь-який процес, який спричиняє нерівномірний розподіл температури або електричного поля в матеріалі, призводить до виникнення термоелектричних явищ. Таким чином, термоелектричний ефект є не ли-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		17

ше практично корисним, але і фундаментальним проявом глибинних закономірностей фізики провідників і напівпровідників.

Окрім цього, ефективність термоелектричних процесів визначається властивостями матеріалу, такими як електропровідність, теплопровідність. У напівпровідниках ці параметри можна цілеспрямовано змінювати за допомогою домішок, що дозволяє покращувати робочі характеристики термоелементів. Завдяки цьому сучасні термоелектричні пристрої стають енергоефективнішими та придатними для ширшого кола практичних застосувань.

1.2 Огляд та аналіз пристроїв для охолодження на основі термоелектричного ефекту

Термоелектричні охолоджувальні пристрої, незважаючи на нижчу ефективність у порівнянні з компресорними та абсорбційними установками, залишаються доволі привабливим рішенням у багатьох технічних сферах. Їх цінують передусім за високу надійність і специфічні властивості, які складно отримати від традиційних систем холодопостачання. Завдяки своїм конструктивним особливостям такі модулі можуть застосовуватися у приладах, де важлива точність підтримання температури, невеликі габарити, автономність або робота в умовах, де небажані вібрації чи шум.

Однією з ключових переваг є максимально спрощена будова термоелектричного охолоджувача. Модуль Пельтьє складається з напівпровідникових елементів, а його робота забезпечується лише подачею постійного струму, що робить систему технологічно простою та надійною. Завдяки цьому зростає стійкість до механічних впливів: термоелектричні пристрої добре переносять удари, трясіння та вібрацію, тому їх часто використовують у переносних приладах та транспортному обладнанні.

Ще однією суттєвою перевагою є те, що в конструкції фактично немає рухомих деталей, окрім вентилятора, який відводить тепло від гарячої сторони. Відсутність механічних вузлів не лише зменшує ймовірність поломок, а й ро-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		18

бити роботу системи майже безшумною. Це надзвичайно важливо в оптичних приладах, медичному обладнанні, лабораторній техніці та електроніці, де тиша є критичною умовою.

Компактність термоелектричних модулів дозволяє інтегрувати їх у дуже обмежені простори. Малі розміри поєднуються з можливістю працювати у будь-якому положенні – вертикальному, горизонтальному або навіть перевернутому. Така універсальність відкриває широкі можливості для конструювання нестандартних систем охолодження, особливо там, де традиційні холодильні агрегати встановити неможливо.

Не менш важливою характеристикою є тривалий термін експлуатації. Оскільки в системі мінімум елементів, що піддаються зношуванню, термоелектричні охолоджувачі можуть працювати роками без втрати функціональності. Ця властивість робить їх економічно вигідними для довготривалого використання, особливо у пристроях, що мають працювати безперервно або автономно.

На рисунку 1.3 зображена принципова схема найпростішого термоелектричного охолоджувача, який побудований на основі модуля Пельтьє, що в свою чергу є центральним елементом системи.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		19

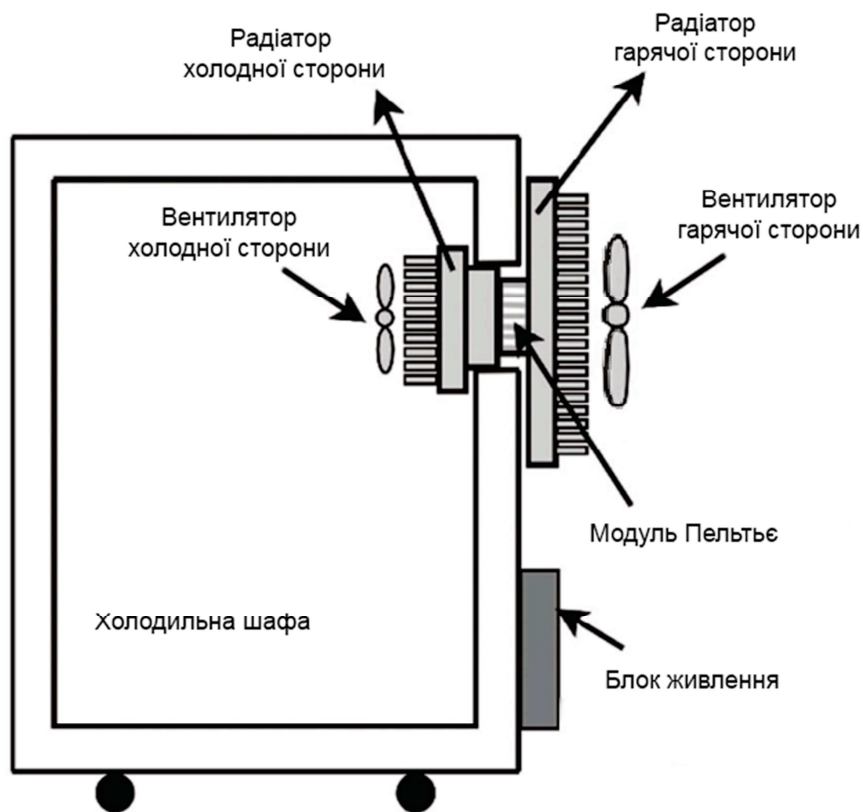


Рисунок 1.3 – Конструктивна схема типового термоелектричного охолоджувача

Холодна сторона модуля контактує з радіатором, який передає охолодження до внутрішнього об'єму холодильної шафи. Для покращення теплообміну на цій стороні встановлено вентилятор, що забезпечує циркуляцію повітря і рівномірне охолодження простору.

Гаряча сторона модуля, навпаки, нагрівається під час роботи, тому до неї прикріплено радіатор гарячої сторони, який відводить тепло назовні. Щоб підвищити ефективність охолодження радіатора, на гарячій стороні також встановлено вентилятор, який активно продуває ребра радіатора і запобігає перегріву. Уся система живиться від блока живлення, який забезпечує постійний струм для роботи модуля Пельтьє та вентиляторів.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Серед різноманітних застосувань термоелектричних модулів Пельтьє можна виділити декілька найбільш поширених пристроїв, які відрізняються конструкцією, призначенням і принципом роботи.

Термоелектричний осушувач повітря (рис. 1.4). У такій схемі модуль Пельтьє охолоджує спеціальну холодну пластину до температури нижче точки роси повітря.



Рисунок 1.4 – Термоелектричний осушувач повітря [6]

Як результат – волога з повітря конденсується на холодній поверхні, утворюючи водяні краплі, які стікають у резервуар або збираються там. Гаряча сторона модуля направляє тепло в навколишнє повітря через радіатор, що сприяє циркуляції і випару води. Така конструкція дозволяє ефективно зменшувати вологість у невеликих приміщеннях, шафах, сейфах чи контейнерах. Вона працює тихо, не потребує фреонів чи компресорів, і може бути компактною та енергоефективною [6].

Автомобільний термоелектричний холодильник (рис. 1.5). В основі лежить термоелектричний модуль, гаряча сторона якого з'єднана з радіатором і вентилятором, а холодна – із внутрішньою камерою холодильника. При жив-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		21

ленні від 12 В (стандарт бортової мережі авто) модуль створює перепад температур, охолоджуючи вміст. Така конструкція позбавлена компресора, значно менша за габаритами, легша, не потребує складного обслуговування й підходить для транспортування продуктів, напоїв під час подорожей [7].



Рисунок 1.5 – Автомобільний термоелектричний холодильник

Охолоджувач для фотокамер, сенсорів, наукових детекторів (рис. 1.6). Модулі Пельтьє застосовуються для охолодження фоточутливих елементів – наприклад, сенсорів у фотокамерах, астрономічних приладах або спектрометрах [8].

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		22



Рисунок 1.6 – Охолоджувач для фотокамер, сенсорів, наукових детекторів

Холодна сторона модуля контактує із сенсором або теплообмінною пластиною, гаряча – з тепловідводом та радіатором. Таке охолодження значно зменшує тепловий шум, підвищує чутливість та стабільність роботи при низькому освітленні. Ці властивості роблять термоелектричні охолоджувачі популярними у високоточній науковій оптиці, астрономії, фотодетекторах, де необхідне точне і стабільне охолодження без рухомих механізмів.

Охолоджувач процесора комп'ютера (рис. 1.7). У таких системах модуль Пельтьє розміщується між корпусом процесора і холодною пластиною повітряного або водяного охолодження. При активації модуль знижує температуру поверхні процесора нижче за температуру навколишнього середовища, що може бути корисним при розгоні або підвищеному тепловому навантаженні [9].

Для ефективної роботи обов'язковим є гарячий радіатор або водоблок із гарним теплообміном, бо гаряча сторона модулю сильно нагрівається.



Рисунок 1.7 – Охолоджувач процесора комп'ютера [4]

Така схема популярна в складних та потужних збірках, де важлива стабільна низька температура центрального чи графічного процесора.

Також широкого використання в побуті набули кулери для охолодження води (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Кулер для охолодження води [10]

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

24

У таких пристроях холодна сторона термоелектричного модуля контактує з металевим резервуаром або трубкою, яка містить воду, а гаряча – приєднана до радіатора з повітряним (або іноді водяним) охолодженням. При подачі постійного струму модуль відбирає тепло з води, знижуючи її температуру до ~10 – 15 °С нижче за температуру навколишнього середовища. Така конструкція – без компресорів, без рідких холодоагентів, з малою кількістю рухомих частин, робить кулери простими, тихими та компактними. Вони зручні для офісів, квартир або невеликих приміщень, де потрібне охолодження питної води без гучних компресорів чи великих габаритів.

Міні-холодильник для медичних препаратів та реагентів (рис. 1.9). Такі пристрої використовують модулі Пельтьє для охолодження внутрішньої теплоізоляованої камери, де зберігаються медикаменти, вакцини, інсулін або біологічні зразки. Холодна сторона модуля охолоджує вміст камери, гаряча віддає тепло через радіатор із вентилятором або інший теплообмінник [11).



Рисунок 1.9 – Міні-холодильник для медичних препаратів та реагентів

Завдяки низькому споживанню енергії та компактному розміру такі бокси можуть працювати від павербанка, автомобільного живлення або зовнішнього джерела – що забезпечує мобільність і надійне підтримання температур у межах, необхідних для зберігання чутливих речовин. Таке рішення особливо актуальне

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		25

для транспортування медичних препаратів у польових умовах, віддалених пунктах або у ситуаціях, коли відсутнє стаціонарне обладнання.

Термоелектричний охолоджувач для смартфонів (рис. 1.10). Сучасні смартфони, особливо ігрові моделі та пристрої з високопродуктивними процесорами, камерами високої роздільності та потужними радіомодулями, під час інтенсивної роботи можуть сильно нагріватися. Для підтримання оптимальної температури корпусу і внутрішніх компонентів все більшого поширення набувають портативні термоелектричні охолоджувачі для смартфонів. У таких пристроях застосовується компактний модуль Пельтьє, холодна сторона якого контактує з задньою поверхнею смартфона або спеціальною теплообмінною платформою. Гаряча сторона підключається до алюмінієвого радіатора, через який тепло відводиться за допомогою невеликого вентилятору або пасивного обдування.



Рисунок 1.10 – Термоелектричний охолоджувач для смартфонів

Узагальнюючи викладений матеріал, можна відзначити, що термоелектричні охолоджувальні пристрої демонструють значну універсальність і адаптивність до різних технічних завдань. Попри відносно нижчу ефективність у порівнянні з традиційними компресорними або абсорбційними системами, вони залишаються привабливим рішенням завдяки простоті конструкції, надійності та

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		26

можливості точного контролю температури. Модулі Пельтьє дозволяють створювати компактні, безшумні та маловібраційні системи, що працюють у будь-якому положенні та витримують механічні навантаження. Розглянуті приклади застосувань – від осушувачів повітря і автомобільних холодильників до охолоджувачів процесорів, медичних міні-холодильників і смартфонів – підтверджують, що термоелектричні модулі здатні ефективно виконувати спеціалізовані завдання, де традиційні системи не підходять або надто громіздкі. Таким чином, термоелектричні охолоджувачі можна розглядати як сучасне, гнучке та надійне рішення для широкого спектру технічних і побутових застосувань, що потребують стабільного і локального охолодження.

1.3 Висновки до розділу

У даному розділі проведено огляд та аналіз термоелектричних процесів та технічних рішень, що використовуються для генерації холоду. Детально розглянуто теоретичні передумови отримання охолодження на основі термоелектричного ефекту, зокрема фізичну природу та взаємозв'язок ефектів Пельтьє, Зеебека і Томсона. Окрему увагу приділено основним параметрам термоелектричних елементів, які визначають їх енергетичні та температурні характеристики і впливають на ефективність роботи охолоджувальних пристроїв.

Також проаналізовано сучасні термоелектричні системи охолодження, їх конструктивні особливості та основні напрями практичного застосування. Узагальнення існуючих технічних рішень дозволило сформулювати цілісне уявлення про принципи побудови та функціонування термоелектричних охолоджувачів. Отримані результати аналізу створюють основу для подальшого розгляду та аналізу каскадних термоелектричних систем охолодження.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		27

2 АНАЛІЗ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ КАСКАДНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

2.1 Теоретичні основи побудови та функціонування каскадних модулів

Пельтьє

Проектування термоелектричних охолоджувальних систем базується на визначенні ключових параметрів: продуктивності охолодження та характеристик живлення, зокрема сили струму. Необхідна холодопродуктивність визначається через калориметричні розрахунки, враховуючи внутрішній об'єм камери, бажаний діапазон зниження температури та умови експлуатації.

Першим етапом є вибір матеріалів і геометрії елементів, що дозволяє досягти балансу між ефективністю, простотою конструкції та економічністю. При заданій різниці температур між гарячим і холодним спаями визначається продуктивність одного термоелемента, після чого встановлюється кількість елементів, необхідних для досягнення максимальної ефективності системи. Наступним кроком є моделювання та розрахунок вузлів живлення, щоб забезпечити стабільну роботу в реальних умовах [12].

Робочі характеристики термопар залежать від співвідношення площ перерізів гілок, величини термоЕРС, електропровідності та теплопровідності напівпровідникових матеріалів. Основні параметри, що визначають ефективність:

- пропорція площ перетину гілок, яка впливає на розподіл теплового потоку та струму;
- коефіцієнт термоЕРС (α), що характеризує здатність генерувати електричну напругу при температурному градієнті;
- електропровідність (σ) і теплопровідність (λ), які визначають ефективність перенесення заряду та тепла.

Для оптимізації цих характеристик інженери прагнуть підвищити коефіцієнт термоЕРС та електропровідність шляхом регулювання концентрації носіїв

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		28

заряду (*n*- та *p*-типу), а також зменшити теплопровідність за рахунок введення домішок, що перешкоджають поширенню теплових хвиль [12].

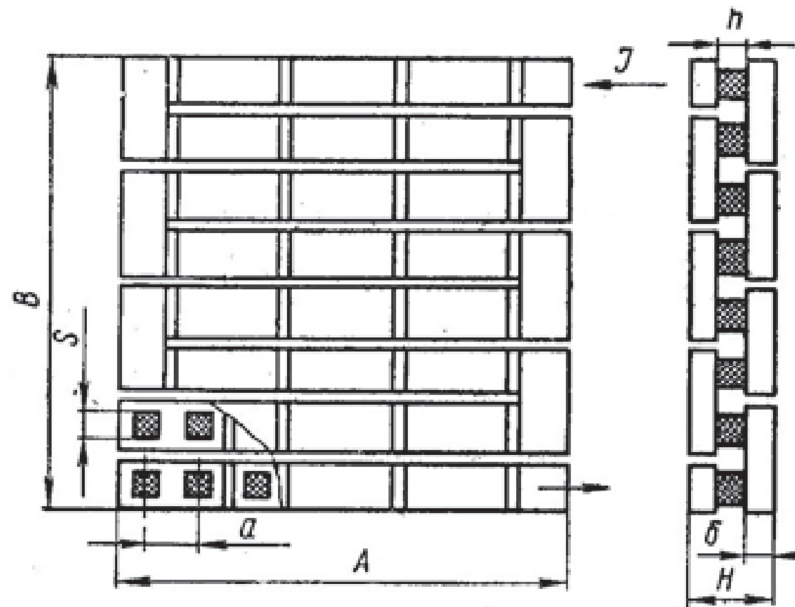
Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення термопар є телурид вісмуту, селенід вісмуту та антимонід телуру. Телурид вісмуту особливо часто застосовується в автомобільних холодильниках, оскільки має оптимальне співвідношення між термоЕРС та теплопровідністю. Для стабільної роботи термоелектричних пристроїв потрібне джерело постійного струму. Якщо живлення має значну пульсацію, виникає додаткове тепловиділення через ефект Джоуля, що знижує ефективність охолодження. Найкращим варіантом є двонапівперіодний випрямляч із нульовим виходом на вторинній обмотці трансформатора, який зазвичай реалізується на кремнієвих або германієвих діодах.

Енергоспоживання є важливим показником для побутових систем. Попри низку переваг – відсутність рухомих деталей, низький рівень шуму та компактність – термоелектричні холодильники мають обмежене застосування через невисоку енергоефективність.

Геометрія та форма термопар залежать від матеріалу, конструкції охолоджувальної поверхні та умов теплообміну. Оптимальне співвідношення перетинів гілок зазвичай не дорівнює одиниці, що дозволяє отримати потрібну площу охолодження. Розташування термоелементів на охолоджувальній поверхні має забезпечувати рівномірний теплообмін між гарячими та холодними спаями. Для цього часто застосовують зовнішні радіатори, які зменшують різницю температур.

Щільність розміщення термопар визначається співвідношенням площі всіх елементів до площі теплообміну. Зменшення щільності пакування дозволяє економити напівпровідниковий матеріал і водночас підвищувати ефективність. Наприклад, конструкція термоелемента висотою 2 мм забезпечує зростання ККД без ускладнення системи (рис. 2.1). Для малих холодильників об'ємом 5 – 7 літрів оптимальна щільність становить 0,15 – 0,17 [12].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		29



A – ширина термобатареї, B – довжина термобатареї, S – ширина напівпровідників, a – відстань між напівпровідниками n та p типу,

h – висота напівпровідників, δ – висота комутаційної пластини,

H – висота термобатареї

Рисунок 2.1 – Конструкція термобатареї типового елемента Пельтьє

Спрощення конструкції досягається відмовою від додаткової циркуляції повітря на гарячому spaу, що є прийнятним для малих моделей. Термопари з'єднуються м'якою пайкою зі змінною пластинною, а гілки попередньо залужуються припоєм із низькою температурою плавлення.

Для батарей, що працюють при значних температурних перепадах, застосовують свинцеві демпфери, а пластини виконують так, щоб компенсувати термічні деформації. Це реалізується за допомогою гнучких перемикаючих пластин або пластин із проміжками [13].

Захист комутуючих пластин від теплових перехідних процесів забезпечується електроізоляцією. Для цього на поверхню анода наносять спеціальну плів-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ку з ізоляційними властивостями. Для покращення теплопередачі поверхні обробляють термокомпандом. Як ізоляційне середовище між елементами батареї найчастіше використовується повітря, хоча можливе застосування пластикових вставок із додатковою електроізоляцією.

Одним із методів підвищення ефективності є зниження температури гарячого спаю шляхом інтенсивного відведення тепла. Це можна реалізувати, під'єднавши холодний спай іншої батареї до гарячого спаю першої. При зменшенні різниці температур між спаями коефіцієнт охолодження зростає. Таким чином, ефективність можна підвищувати як за рахунок охолодження гарячого спаю, так і зниження температури холодного.

Для досягнення балансу між потужністю охолодження та енергоспоживанням у системах великої продуктивності використовують режими, що оптимізують ККД. У малопотужних пристроях допускається робота при вищих струмах, навіть якщо це збільшує витрати енергії.

Це призводить до створення двоступеневих термоелектричних батарей (рис. 2.2).

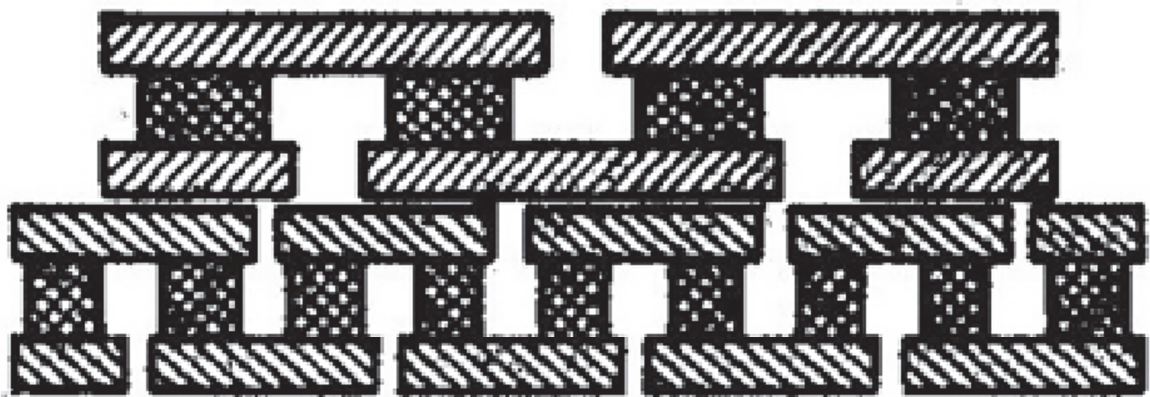
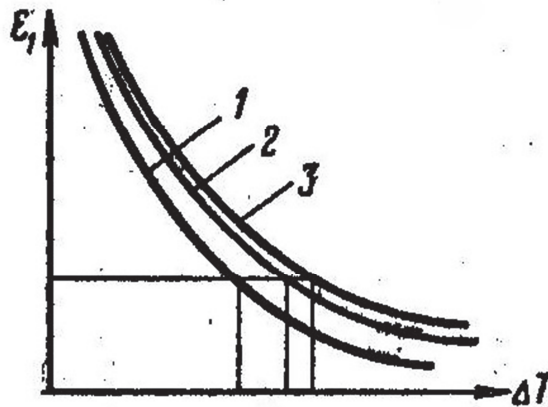


Рисунок 2.2 – Двокаскадна термоелектрична батарея

Другий ступінь може використовуватися для підвищення ефективності першого або для додаткового охолодження холодного спаю. Існують також триступеневі та багатоступеневі системи, де кожен наступний рівень охолоджує попередній [13].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		31

У випадку триступневих акумуляторів, коли кожен етап працює на оптимальному струмі (I_{opt}), коефіцієнт охолодження залежить від температурного градієнта. Це стосується як одноступневих, так і багатоступневих систем при однаковому значенні Z , що наочно показано на графіку (рис. 2.3).



1 – одноступневий, 2 – двоступневий, 3 – триступневий термоелемент

Рисунок 2.3 – Графічне представлення залежності холодильного коефіцієнта ϵ від різниці температур ΔT

Функціонування термоелемента ґрунтується на використанні двох напівпровідникових гілок, що характеризуються електронною та дірковою провідністю, з'єднаних між собою металевими перемичками. При проходженні постійного електричного струму у визначеному напрямку відбувається нагрівання нижніх контактів, тоді як верхні охолоджуються. У такій схемі верхня перемичка виступає як холодний спай із температурою T_x , а нижня – як гарячий спай із температурою T_2 .

Теплова енергія Q_p , що поглинається або виділяється на цих спаях з'єднаннях унаслідок дії ефекту Пельтьє, описується відповідним рівнянням:

$$Q_p = \alpha \cdot T \cdot I, \quad (2.1)$$

де: α – коефіцієнт термоЕРС;

T – температура відповідного контакту;

I – сила струму, що проходить крізь контакт.

У реальних умовах функціонування термоелектричної пари супроводжується двома основними видами втрат:

– джоулевими, що виникають під час проходження електричного струму крізь провідник;

– теплопередачею від нагрітої поверхні до охолодженої внаслідок теплопровідності матеріалів, які формують електричний контур.

Кількість тепла, що витрачається на джоулеве нагрівання Q_J , визначається наступним рівнянням [14]:

$$Q_J = I^2 \cdot R, \quad (2.2)$$

де R – електричний опір двох гілок термоелектричного елемента.

У процесі розрахунків приймається допущення, що джоулеве тепло розподіляється рівномірно: одна його частина надходить до гарячого спаю, а інша – до холодного.

У процесі розрахунків приймається допущення, що джоулеве тепло розподіляється рівномірно: одна його частина надходить до гарячого спаю, а інша – до холодного. Це дозволяє значно спростити аналітичні вирази та зберегти коректність моделі при практичних інженерних розрахунках.

Кількість теплової енергії, яка переноситься від гарячого контакту до холодного завдяки теплопровідності матеріалу Q_T , описується наступним за наступною формулою [14]:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		33

$$Q_T = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_2 - T_x) \cdot F, \quad (2.3)$$

де δ – довжина контактної ділянки;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

T_2, T_x – температури відповідно гарячої та холодної поверхонь термоелектричної пари;

F – площа поперечного перерізу контакту.

Таким чином, охолоджувальна здатність термопари (кількість тепла, що поглинається на холодній поверхні термопари) Q_0 визначається рівнянням:

$$Q_0 = Q_P - 0,5 \cdot Q_J - Q_T = \alpha \cdot T_x \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot T_2 - T_x \cdot F \quad (2.4)$$

Тепловий потік Q_2 , що формується на гарячій стороні термоелемента та передається у навколишнє середовище, описується за формулою:

$$Q_2 = Q_P - 0,5 \cdot Q_J - Q_T = \alpha \cdot T_2 \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot T_2 - T_x \cdot F \quad (2.5)$$

Енергія N , яку витрачає термоелектричний елемент із врахуванням процесів тепловиділення, визначається за наступною формулою:

$$N = I^2 \cdot R + \alpha \cdot (T_2 - T_x) \quad (2.6)$$

За умови ідеалізованої роботи системи кількість теплоти, яка виділяється на гарячому зварному з'єднанні Q_2 , буде більшою за ту теплову енергію, що поглинається холодним спаєм. Це перевищення відповідає витратам електричної енергії, необхідної для підтримання процесу [14]:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		34

$$Q_2 = N + Q_0 \quad (2.7)$$

Витрати енергії N спрямовуються на виконання роботи A , що, згідно із законом Зеєбека, забезпечує переміщення електричного заряду всупереч потенціальної різниці, яка виникає в колі через температурний градієнт між гарячим спаєм T_r та холодним спаєм T_x .

$$A = Q_2 - Q_0 = \alpha \cdot (T_2 - T_x) \cdot I \quad (2.8)$$

У випадку, коли робочому середовищі відсутні будь-які незворотні втрати, зокрема джоулеве тепло та процеси теплопередачі, коефіцієнт продуктивності охолодження ε для зворотного циклу термоелектричної пари визначається наступним співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{A} = \frac{\alpha \cdot T_2 \cdot I}{\alpha \cdot (T_2 - T_x) \cdot I} = \frac{T_2}{T_2 - T_x} \quad (2.9)$$

Оскільки відбір теплової енергії здійснюється при сталій температурі T_2 , а теплопередача відбувається до гарячого джерела при постійній температурі T_x , величина ε відповідає коефіцієнту Карно, який характеризує ефективність охолодження у зворотному циклі.

Енергетична результативність системи та коефіцієнт охолоджувальної дії, з урахуванням усіх можливих втрат, описуються наступним рівнянням:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon = \frac{\alpha \cdot T_x - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda(T_2 - T_x)}{I^2 \cdot R + \alpha \cdot I \cdot (T_2 - T_x)}, \quad (2.10)$$

Термоелектричні перетворювачі виготовляються з матеріалів, що характеризуються особливим параметром – добротністю, яка позначається символом Z . Значення цього показника визначається сукупністю фізичних властивостей термоелектричного матеріалу. До них належать: електропровідність σ , теплопровідність λ та коефіцієнт термоелектрорушійної сили α . Вказані характеристики взаємопов'язані між собою через наступне рівняння [15]:

$$Z = \frac{\sigma \cdot \alpha}{\lambda}, \quad (2.11)$$

Із наведеного рівняння випливає, що величина холодильного коефіцієнта істотно визначається силою струму I , який проходить крізь термоелемент. Значення струму, за якого коефіцієнт охолодження ε досягає свого максимуму, можна виразити наступним співвідношенням:

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_2 - T_x)}{R \cdot \sqrt{1 + 0,5 \cdot Z \cdot (T_2 - T_x)} - 1}, \quad (2.12)$$

Для підвищення ефективності роботи термоелектричних охолоджувачів необхідно застосовувати матеріали з високим коефіцієнтом добротності Z . На сьогодні найкращі зразки термоелектричних матеріалів демонструють значення цього параметра близько $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, а інтегральний показник при кімнатних температурах наближається до одиниці.

Під час конструювання термоелектричних модулів вирішальним чинником є вибір матеріалу. Такі модулі зазвичай формуються з набору термопар, ро-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		36

зташованих між двома теплопровідними пластинами, які найчастіше виготовляють із кераміки. Матеріал цих пластин повинен поєднувати властивості ефективного електроізолятора, достатню механічну міцність та високу теплопровідність, наближену до показників міді (386 Вт/(м·К)). Геометричні параметри пластин визначають розміри всього модуля, адже площа термоелементного блоку становить приблизно 40% від загальної площі пластини [15].

Найчастіше для керамічних переходів використовують оксид алюмінію (Al₂O₃), теплопровідність якого сягає близько 24 Вт/(м·К). Оксид берилію має значно вищу теплопровідність – близько 240 Вт/(м·К), проте його токсичність та висока ціна обмежують практичне застосування. Перспективною альтернативою є нітрид алюмінію, який характеризується теплопровідністю на рівні 190 Вт/(м·К) і поступово стає більш доступним завдяки масовому виробництву.

Модулі без керамічних пластин відрізняються компактністю, оскільки елементи розділені лише тонким шаром електроізолятора товщиною близько 0,1 мм. У таких конструкціях потрібна додаткова ізоляція між мідними контактами та теплообмінником, для чого зазвичай застосовують органічні матеріали, наприклад майлар або каптон. Ефективність роботи модуля значною мірою визначається якістю напівпровідникового матеріалу, а в меншій мірі – теплопровідністю ізоляційного шару [15].

Важливим параметром є тепловий опір інтерфейсу модуля, який суттєво впливає на продуктивність термобатарей. Найнижчі значення опору забезпечують паяні з'єднання. У сучасному виробництві часто застосовують кріплення кераміки за допомогою так званої «термосмоли», що являє собою суміш порошку оксиду цинку та рідкого скла.

2.2 Розрахунок однокаскадних і багатокаскадних термоелектричних модулів Пельтьє

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		37

Основний принцип поглинання тепла при каскадній системі охолодження полягає в тому, що кожен наступний елемент Пельтьє в каскаді приймає тепло, яке було відведено попереднім елементом, і додає до нього власне тепловиділення (рис. 2.4).

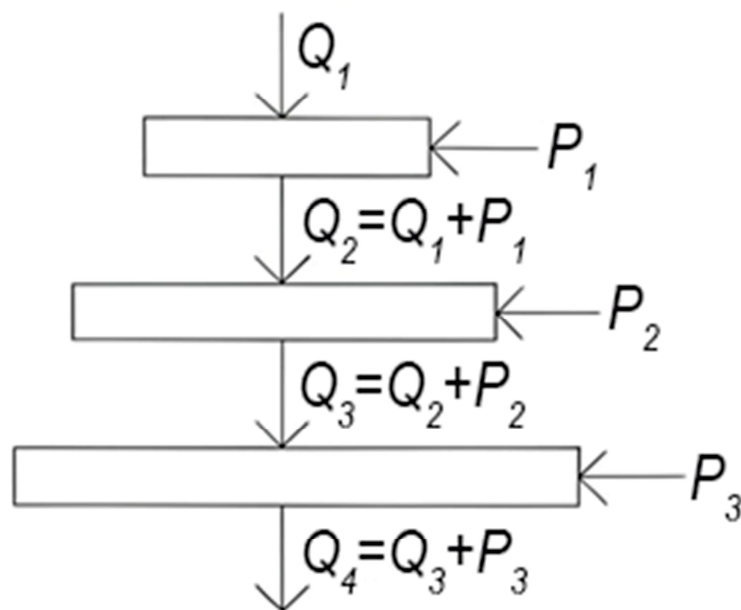


Рисунок 2.4 – Схема поглинання тепла при каскадному з'єднанні термоелементів

У трикаскадній системі охолодження перший каскад поглинає теплоту Q_1 , яка є результатом теплового навантаження. При цьому кожен наступний каскад не тільки передає тепло від попереднього, а й додає власну теплову потужність P_1, P_2, P_3 , що виникає при живленні термоелектричних елементів. Таким чином, другий каскад відводить тепло $Q_2 = Q_1 + P_1$, третій $Q_3 = Q_2 + P_2$, а останній каскад має відвести загальне тепло $Q_4 = Q_3 + P_3$, що є сумою всіх попередніх теплових внесків і тепла, поглинутого на першому етапі. Це демонструє, як зростає навантаження на нижчі каскади, що вимагає ефективного тепловідведення.

Вибір типового термоелектричного елемента для заданих умов експлуатації здійснюється щонайменше за трьома основними показниками. До них нале-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		38

жать температурний рівень гарячої поверхні T_2 , температура холодної сторони T_x , а також теплова потужність Q_0 , що відбирається з охолоджуваної зони. На поверхні модуля, де під час протікання постійного струму відбувається виділення тепла, встановлюються теплообмінні компоненти. За умови використання повітряного охолодження – як природного, так і примусового – температуру цієї гарячої сторони T_2 можна визначити за допомогою відповідного розрахункового виразу:

$$T_2 = T_{nc} + R_2 \cdot Q_2, \quad (2.13)$$

де T_{nc} – характеризує температуру навколишнього середовища;
 R_2 – представляє термічний опір гарячої сторони теплообмінного вузла;
 Q_2 – визначає теплову потужність, що виділяється в гарячих зонах переходів і обчислюється за наступною формулою:

$$Q_2 = P + Q_2, \quad (2.14)$$

де P – вхідна потужність у ватах.

Наявність термічного опору теплообмінного елемента зумовлює підвищення температури гарячої поверхні відносно температури навколишнього середовища на певну величину [15]. У разі відсутності точних даних щодо цього опору допускається його оціночне визначення залежно від способу відведення тепла:

- за умов природної конвекції — у межах 20–40 °С;
- при застосуванні примусової конвекції — приблизно 10–15 °С;
- у системах з рідинним охолодженням – між 2 та 5 °С орієнтовно 2–5 °С вище температури теплоносія.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		39

Теплообмінний вузол є ключовою складовою такого обладнання. Обмежена площа його тепловіддачі здатна спричинити неможливість забезпечення заданого ступеня охолодження [14].

Холодна поверхня термоелектричного елемента характеризується відбором теплової енергії в процесі протікання постійного електричного струму через термопарний вузол. Значення температури цієї зони T_x повинно бути меншим за температуру об'єкта охолодження T_{on} , зокрема у випадку, коли між ними відсутній прями́й тепловий контакт:

$$T_x = T_{on} + R_x + Q_0, \quad (2.15)$$

де R_x – представляє термічний опір на холодній стороні теплообмінника;
 Q_0 – кількість тепла, яке поглинається холодною стороною.

Визначення теплового навантаження, що має бути відведене з холодної сторони, є складною інженерною задачею, оскільки система зазнає впливу кількох різних джерел тепла. Основним джерелом є тепло, яке потрібно відвести від самого охолоджуваного об'єкта $Q_{відв}$ з метою зниження його температури на задану величину. Це тепло визначається за наступною формулою:

$$Q_{відв} = i \cdot G, \quad (2.16)$$

де i – представляє ентальпію матеріалу, що охолоджується;
 G – масовий потік у кілограмах за секунду.

Окрім цього, на холодну сторону надходить частина тепла, що передається з гарячої поверхні через теплопровідність матеріалу термоелектричного модуля. Додатково слід урахувувати тепловиділення, пов'язане з проходженням електричного струму крізь електричні провідники.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		40

Відомо, що джоулеве тепло $P \cdot R$ розподіляється порівну: половина спрямовується у напрямку холодної сторони, а половина – до гарячої, що потребує компенсації шляхом збільшення холодопродуктивності.

Важливим фактором є також надходження тепла через теплоізоляційні матеріали $Q_{надх}$. Це тепло характеризується рівнянням, яке враховує якість теплоізоляції та вплив навколишніх умов:

$$Q_{надх} = \lambda \cdot \Delta T \cdot \frac{S}{\delta}, \quad (2.17)$$

Коефіцієнт теплопровідності λ описує здатність матеріалу пропускати тепло та вимірюється у Вт/(м·К), а товщина теплоізоляційного шару δ визначає, наскільки цей матеріал перешкоджає теплопередачі. Чим більша товщина, тим повільніше тепло потрапляє до холодної зони, що є необхідним для підтримання низької температури. Температурна різниця ΔT , яка існує між поверхнями теплоізоляції, визначає величину теплового потоку, що потенційно може проникати до холодної камери. Площа ізольованої поверхні S – ще один ключовий параметр, оскільки від її розміру залежить загальна величина небажаних теплових надходжень [14].

Таким чином, формування повного теплового балансу холодної сторони модуля Пельтьє вимагає одночасного врахування ентальпійного навантаження від охолоджуваного об'єкта, теплопередачі з гарячої сторони, впливу джоулевого тепла в провідниках та теплообміну через теплоізоляційні матеріали. Саме сукупність цих чинників визначає, якою має бути холодопродуктивність модуля та яким повинен бути радіатор для забезпечення стабільного відведення тепла.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		41

2.3 Висновки до розділу 2

У цьому розділі проаналізовано теоретичні основи побудови та функціонування каскадних термоелектричних модулів Пельтьє. Представлено методи розрахунку однокаскадних і багатокаскадних систем, що дозволяють оцінити їх потенційну ефективність та холодопродуктивність. Розглянуто принципи впливу електричних та теплових параметрів на роботу модулів, підкреслено переваги та недоліки багатокаскадних конструкцій.

Представлені теоретичні положення створюють основу для подальшої розробки лабораторної установки, яка дозволить експериментально перевіряти ефективність каскадних термоелектричних систем охолодження і визначати оптимальні умови їх роботи.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		42

3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

3.1 Розробка структурної схеми лабораторної установки

У процесі створення лабораторної установки для дослідження термоелектричного охолодження постала необхідність розробити структурну схему (рис. 3.1), яка б забезпечувала узгоджену роботу всіх елементів системи та дозволяла реалізувати точне керування температурними параметрами. Враховуючи специфіку дослідження – використання двокаскадного модуля Пельтьє, було важливо забезпечити ефективний теплообмін, стабільне живлення та надійний зворотний зв'язок від температурних датчиків.

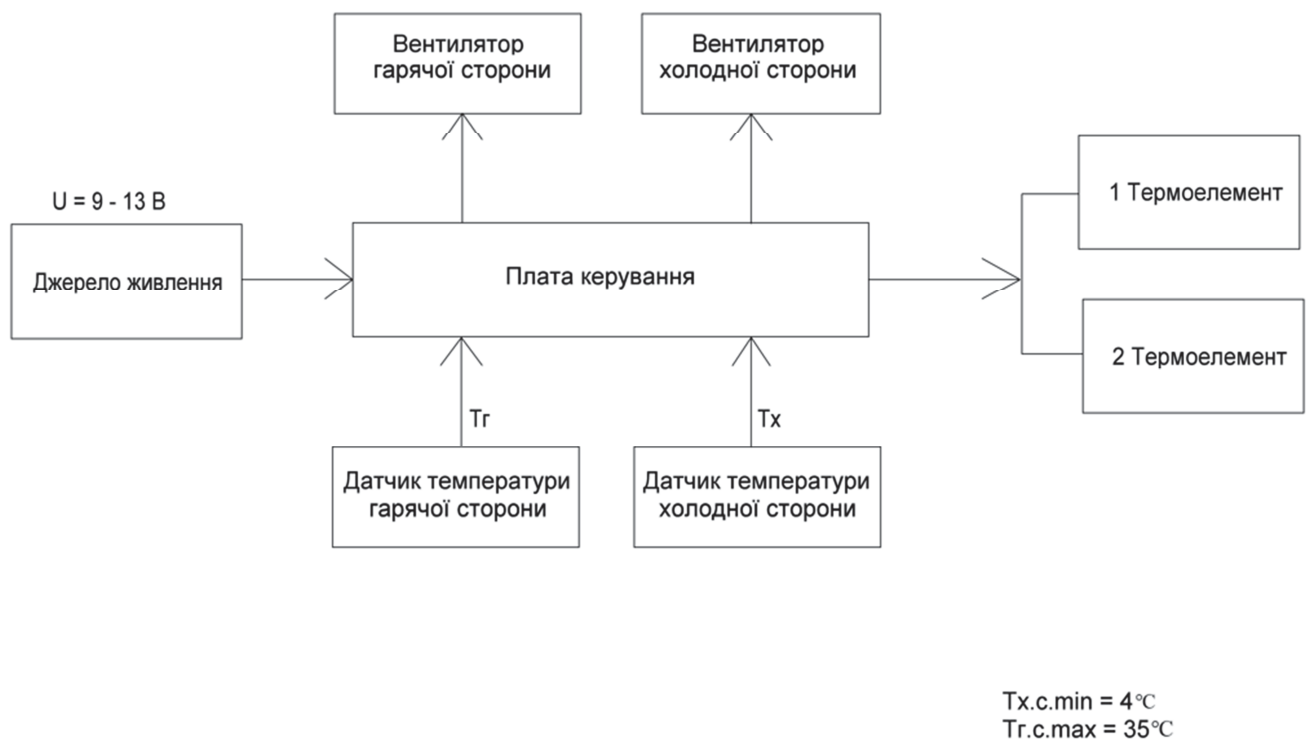


Рисунок 3.1 – Структурна схема лабораторної установки

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		43

В схемі показані основні компоненти, які злагоджено працюють для досягнення ефективного охолодження та стабільної роботи. Нижче подано детальний опис компонентів та їх взаємодії.

Для живлення системи використовується стабілізований блок постійного струму з вихідною напругою в межах 9 – 13 В (рис. 3.2) . Його функція полягає у забезпеченні живленням всіх елементів, зокрема термоелектричних модулів, вентиляторів та логічної плати. Надійність джерела живлення є важливою для підтримки постійного теплового градієнта між гарячою та холодною сторонами.



Рисунок 3.2 – Блок живлення постійного струму

У якості центрального елемента керування термоелектричним холодильником використано плату Arduino Nano (рис. 3.3), яка забезпечує ефективне управління всіма компонентами системи. Завдяки своїм компактним розмірам та високій продуктивності, вона дозволяє точно контролювати параметри роботи термоелементів, вентиляторів та датчика температури, забезпечуючи стабільність температурного режиму та оптимальну енергоефективність. Arduino Nano приймає дані від датчиків DS18B20, аналізує їх та регулює потужність елементів Пельтьє, а також швидкість обертання вентиляторів, гарантуючи надійну та автоматизовану роботу всієї системи [16].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		44

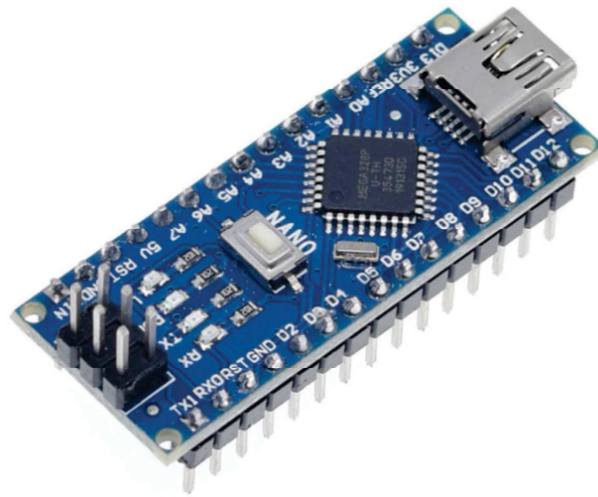


Рисунок 3.3 – Плата Arduino Nano

У конструкції використано два термодатчики DS18B20 (рис. 3.4) Перший датчик розташований на гарячій стороні термоелектричного модуля та призначений для постійного моніторингу її температури під час роботи системи. Другий датчик встановлено на холодній стороні для контролю ефективності охолодження.



Рисунок 3.4 – Температурний датчик DS18B20

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		45

Ці сенсори забезпечують точне вимірювання температури з високою роздільною здатністю, що дозволяє оперативно реагувати на зміни теплового режиму. Дані з датчиків надходять на плату керування, де відбувається їх обробка та приймаються рішення щодо регулювання потужності та вентиляції.

У системі використовується LCD-дисплей 16x2 (рис. 3.5), який слугує основним засобом виведення інформації про стан термоелектричного холодильника. Дисплей складається з двох рядків по 16 символів, що дозволяє відображати поточну температуру, стан елементів Пельтьє та швидкість обертання вентиляторів у зручному форматі.

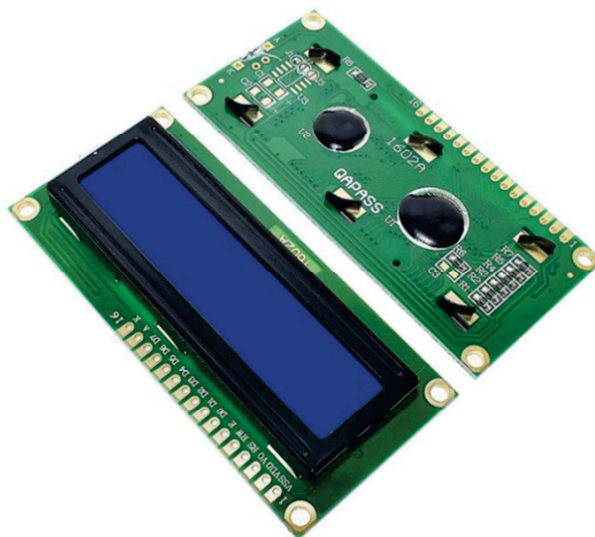


Рисунок 3.5 – LCD-дисплей 16x2

LCD 16x2 працює на інтерфейсі I2C або паралельному підключенні, що спрощує його інтеграцію з Arduino Nano та мінімізує кількість необхідних проводів. Завдяки підсвічуванню, дисплей зручний у використанні за різних умов освітлення. Оновлення показників здійснюється в реальному часі, відповідно до даних, отриманих від датчика DS18B20, забезпечуючи надійний контроль температурного режиму холодильника.

Для забезпечення зручного налаштування параметрів роботи лабораторної установки до схеми було додано поворотний енкадер (рис. 3.6). Він слугує еле-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		46

ментом ручного введення, що дозволяє регулювати температуру, змінювати режими охолодження та керувати швидкістю вентиляторів.

Енкодер формує імпульсні сигнали, які надходять на контролер Arduino Nano. За їхньою кількістю та напрямком обертання плата визначає необхідну зміну параметра. Завдяки цьому забезпечується точне й плавне регулювання без використання кнопок. У поєднанні з LCD-дисплеєм енкодер формує простий та інтуїтивний інтерфейс керування системою.



Рисунок 3.6 – Поворотний енкодер з кнопкою натискання

Для охолодження гарячого спаю термоелемента використано вентилятор розміром 80×80 мм із потужністю 4,5 Вт (рис. 3.7). Його головна функція полягає у швидкому відведенні теплової енергії в навколишнє середовище. Завдяки цьому забезпечується стабільність роботи охолоджувального елемента та виключається ризик перегріву.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		47



Рисунок 3.7 – Вентилятор гарячої сторони

На охолоджуваній частині термоелектричного блоку закріплено вентилятор з габаритами 50 × 50 мм і потужністю 1 Вт (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Вентилятор холодної сторони

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

48

Його призначення - створення інтенсивного потоку охолодженого повітря, що підвищує ефективність роботи всієї системи. Завдяки цьому забезпечується рівномірне охолодження простору.

Основним компонентом охолоджувальної системи є каскадний модуль Пельтьє (рис. 3.9), який забезпечує формування температурного перепаду між холодною та гарячою сторонами. Конструктивне виконання модуля дозволяє інтегрувати його до складу лабораторної установки відповідно до загальної компоновки елементів системи. Каскадна структура визначає характер теплових процесів у модулі та впливає на розподіл температур між окремими каскадами модуля. У процесі роботи модуль функціонує як джерело холоду і тепла, параметри яких залежать від режиму електричного живлення та умов теплового контакту з елементами лабораторної установки.

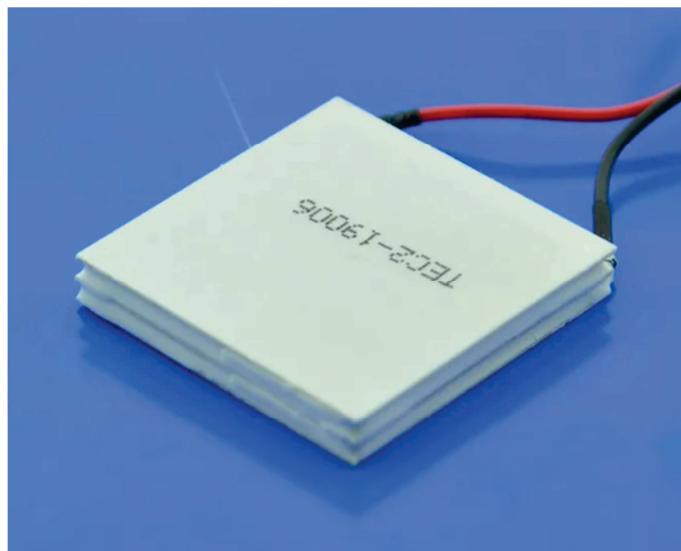


Рисунок 3.9 – Каскадний модуль Пельтьє

Для досягнення максимальної ефективності охолодження важливо забезпечити якісну теплоізоляцію холодної частини та оптимальне розташування вентиляторів. Використання матеріалів з низькою теплопровідністю дозволяє мінімізувати небажані втрати тепла, а правильне компонування елементів сприяє стабільному температурному режиму.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		49

Уся система функціонує як єдиний інтегрований механізм: джерело живлення подає енергію на термоелементи, Arduino Nano аналізує температурні показники з DS18B20 та регулює роботу охолоджувальних елементів, а вентилятори забезпечують ефективний теплообмін. Такий підхід дозволяє досягти високої точності температурного контролю та створити надійну платформу для проведення експериментів.

3.2 Розробка електричної схеми лабораторної установки

У процесі виконання роботи мною було розроблено електричну схему керування двокаскадною системою охолодження лабораторної установки (Рис. 3.10).

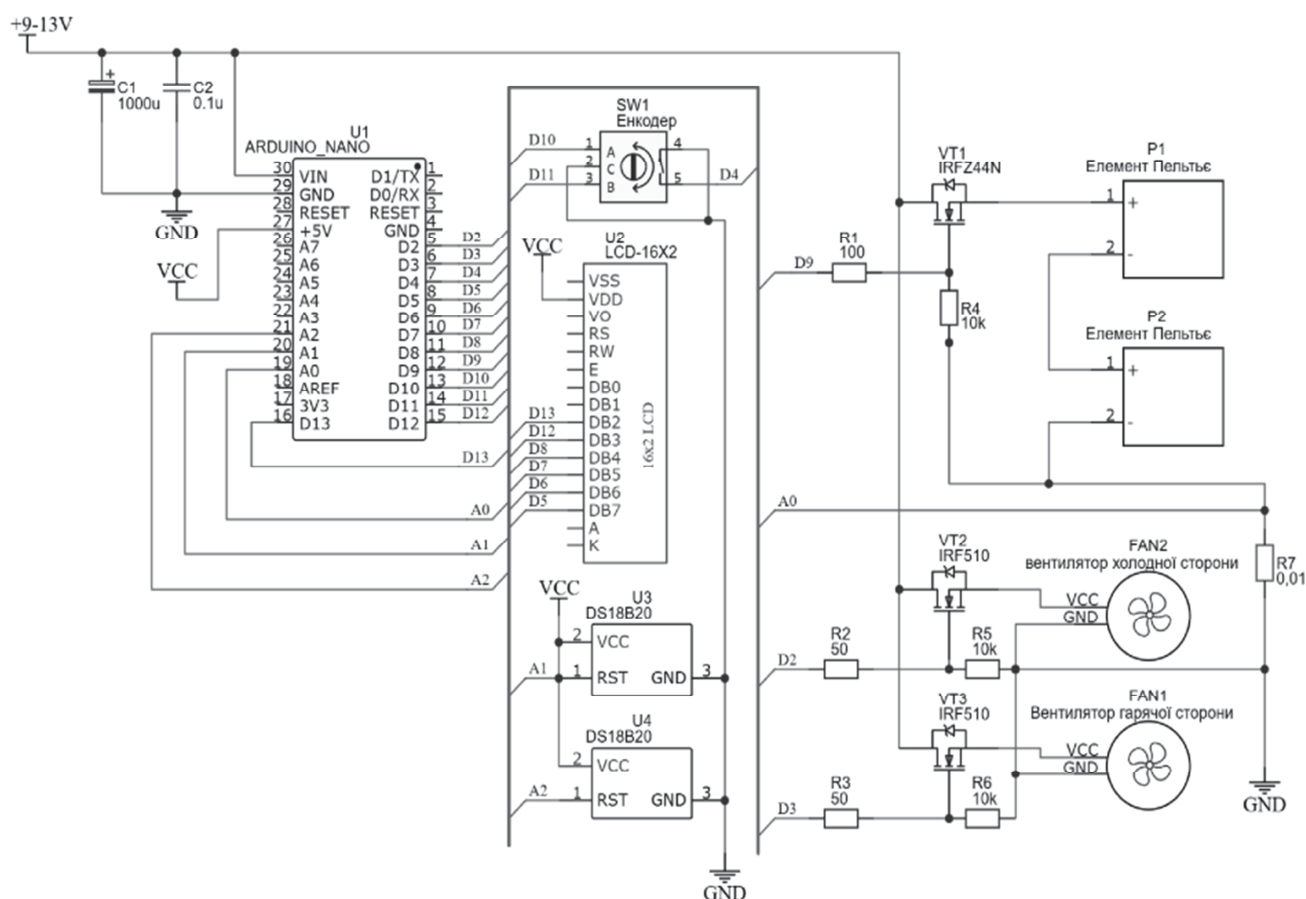


Рисунок 3.10 – Електрична схема лабораторної установки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Система призначена для проведення експериментальних досліджень у сфері термоелектричного охолодження, зокрема з метою аналізу ефективності двокаскадного з'єднання елементів Пельтьє, а також для моделювання автономного охолоджуючого пристрою з цифровим керуванням. Основною задачею цієї електричної схеми є реалізація автоматизованого процесу охолодження за допомогою двох послідовно з'єднаних модулів Пельтьє, керованих мікроконтролером Arduino Nano. Кожен модуль створює температурний градієнт між холодною та гарячою сторонами, а каскадне з'єднання дає змогу досягнути нижчої температури холодної поверхні, що є важливим для досліджень характеристик охолодження.

Для живлення пристрою використовується джерело постійного струму з напругою від 9 до 13 В. Ця напруга подається одночасно на елементи Пельтьє та вентилятори, а також на модуль Arduino через вхід VIN. На вході встановлено два конденсатори фільтрації: C1 (1000 мкФ) та C2 (0,1 мкФ), які згладжують пульсації та знижують рівень високочастотних завад у живленні. Arduino Nano виконує роль основного керуючого елемента, що відповідає за опитування датчиків, генерацію керуючих сигналів, обробку даних і взаємодію з користувачем.

До Arduino підключено два цифрові датчики температури DS18B20, які встановлені на відповідних зонах охолоджувального модуля для вимірювання температури холодної і гарячої поверхонь. Ці датчики забезпечують високу точність та стабільність вимірювання, працюють по цифровому протоколу 1-Wire та передають дані без потреби у складній аналоговій обробці. На основі отриманих температурних значень мікроконтролер визначає необхідний режим роботи модулів Пельтьє та вентиляторів.

Живлення обох модулів Пельтьє (P1 і P2), з'єднаних каскадно, здійснюється через силовий MOSFET-транзистор VT1 (IRFZ44N), який виконує функцію високострумовевого комутатора. На затвор VT1 сигнал подається з цифрового виходу D9 через резистор R1 (100 Ом), що обмежує імпульсний струм керування. Резистор R4 (10 кОм) підтягує затвор до землі, забезпечуючи надійне вимкнення транзистора при відсутності керуючого сигналу. Керування модулем Пе-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		51

льтє здійснюється за допомогою ШІМ-сигналу, сформованого Arduino, що дозволяє плавно регулювати потужність, яка подається на каскад. Такий режим керування обраний на основі попередніх експериментальних досліджень двокаскадного модуля Пельтьє, у ході яких був визначений оптимальний струм живлення, що забезпечує мінімальну температуру холодної поверхні та максимальний коефіцієнт ефективності. Зміна коефіцієнта заповнення ШІМ дає можливість точно встановлювати цей оптимальний режим.

Оскільки елементи Пельтьє виділяють значну кількість тепла на гарячій стороні та можуть переохолоджувати холодну сторону, у схемі застосовано два вентилятори: FAN1 для гарячої сторони та FAN2 для холодної сторони. Кожен вентилятор керується окремим MOSFET-транзистором VT2 і VT3 (обидва IRF510). Сигнали на вентиляційні ключі подаються з виходів D2 та D3 Arduino через обмежувальні резистори R2 і R3 (по 50 Ом). Підтягувальні резистори R5 і R6 (по 10 кОм) забезпечують вимкнений стан вентилятора при нульовому сигналі. Як і у випадку з модулями Пельтьє, вентиляторами керують за допомогою ШІМ, що дозволяє регулювати їхню швидкість залежно від теплового навантаження. Такий підхід забезпечує адаптивне охолодження: вентилятор гарячої сторони може працювати на максимальних обертах при підвищеному навантаженні, тоді як вентилятор холодної сторони – зменшувати швидкість, що знижує шум та енергоспоживання і дозволяє тонко стабілізувати робочу температуру холодильної установки.

Для контролю енергоспоживання та оцінки струму через модулі Пельтьє у схемі встановлено шунтовий резистор R7 номіналом 0,01 Ом. Падіння напруги на ньому зчитується Arduino через аналоговий вхід, що дозволяє визначати фактичний струм, контролювати робочу точку охолоджувача та реалізувати захист від перевантаження.

Користувацький інтерфейс реалізовано на базі LCD-дисплея 16×2, який відображає температуру, стан каскадів, режим роботи та додаткову інформацію. Для зміни параметрів та навігації використовується енкодер з кнопкою, підключений до входів D10, D11 (сигнали обертання) та D4 (натискання). Такий інтер-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		52

фейс є зручним, інтуїтивним та дозволяє проводити лабораторні дослідження, аналізувати режими роботи та виконувати налаштування в режимі реального часу.

Таким чином, розроблена електрична схема повністю відповідає поставленим у роботі завданням. Вона забезпечує функціонування двокаскадної охолоджувальної системи на модулях Пельтьє, автоматичне регулювання температури, можливість точного встановлення оптимального струму за допомогою ШІМ-керування, моніторинг параметрів, захист від перевантаження та зручний інтерфейс взаємодії з користувачем. Конструкція має достатню гнучкість і може бути розширена чи модифікована для проведення подальших експериментальних досліджень у сфері термоелектричного охолодження.

3.3 Розробка системи тепловідведення каскадного модуля Пельтьє

Проведення теплових розрахунків є важливим етапом проєктування каскадної системи охолодження, оскільки ефективність роботи модуля Пельтьє безпосередньо залежить від умов відведення тепла з його гарячої поверхні. У межах даної роботи використовуються модулі Пельтьє із електричною потужністю P_{el} близько 60 Вт і робочим струмом приблизно 5 А, що створює значне теплове навантаження на гарячу сторону та потребує високо – ефективної системи теплообміну. Щоб забезпечити стабільність роботи системи та уникнути перегрівання, було прийнято рішення розраховувати тепловідведення із запасом, відповідним холодопродуктивності $Q_0 = 30$ Вт. Це дозволяє врахувати додаткові теплові втрати та зменшення ефективності при підвищених зовнішніх температурах. Окрім цього, конструкція включає вентилятор потужністю 4,5 Вт, який забезпечує примусове повітряне охолодження та суттєво зменшує термічний опір радіатора.

Почнемо з розрахунку теплового навантаження, яке має бути відведене від гарячої поверхні модуля. Загальна теплова потужність визначається сумою електричної потужності та холодопродуктивності. Це є базовим підходом при оцін-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		53

ці навантаження на будь-який радіатор у системах на основі ефекту Пельтьє. Таким чином, визначимо теплове навантаження Q_z за наступною формулою [17]:

$$Q_z = P_{el} + Q_0, \quad (3.1)$$

де P_{el} – електрична потужність модуля, а Q_0 – холодопродуктивність, яка переноситься від холодної поверхні та перетворюється на додаткове тепло.

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$Q_z = 60 + 30 = 90 \text{ Вт}, \quad (3.2)$$

що означає необхідність гарантованого відведення не менше 90 Вт теплової енергії.

Оскільки нормальна робота модуля Пельтьє можлива лише при обмеженні максимальної температури гарячої поверхні, слід визначити допустимий термічний опір радіатора. Прийmemo допустиму температуру гарячої сторони $T_z = 50$ °С, тоді як температура навколишнього середовища становить $T_{nc} = 25$ °С. Різниця температур ΔT , яка визначає припустиме підвищення температури радіатора, становить [18]:

$$\Delta T = T_z - T_{nc} = 50 - 25 = 25 \text{ °С}. \quad (3.3)$$

Враховуючи, що термічний опір радіатора $R_{рад}$ показує, наскільки нагрівається радіатор при розсіюванні одного Ватта тепла, його визначимо за формулою:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		54

$$R_{рад} = \frac{\Delta T}{Q_c} = \frac{25}{90} = 0,28 \text{ К/Вт.} \quad (3.4)$$

Отримане значення є граничним, тобто радіатор повинен мати термічний опір менше або дорівнювати 0,28 К/Вт, щоб забезпечити потрібне охолодження модуля.

Подальший етап розрахунків полягає у врахуванні роботи вентилятора, який забезпечує примусову конвекцію. Вентиляція дозволяє зменшити термічний опір у 2 – 3 рази порівняно з природною конвекцією за рахунок підвищення коефіцієнта тепловіддачі h . Для невеликих вентиляторів реалістичним є значення коефіцієнта тепловіддачі 40 – 60, тому в розрахунках використаємо середнє значення $h = 50$.

Тепловіддача радіатора $Q_{рад}$ з примусовим повітряним охолодженням описується за формулою [18]:

$$Q_{рад} = \frac{1}{h \cdot A}, \quad (3.5)$$

де A – сумарна площа поверхні радіатора.

Оскільки нас цікавить мінімальна площа, достатня для забезпечення потрібного термічного опору, формулу доцільно перетворити до вигляду:

$$A = \frac{1}{h \cdot R_{рад}}. \quad (3.6)$$

Значення площі поверхні є основним показником, який визначає габарити радіатора, оскільки саме ребриста структура забезпечує необхідну інтенсивність теплообміну. Підставивши необхідні значення, отримаємо:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		55

$$A = \frac{1}{50 \cdot 0,28} = 0,071 \text{ м}^2, \quad (3.7)$$

що еквівалентно приблизно 700 см² ребристої поверхні. Така площа добре відповідає реальним конструкціям алюмінієвих радіаторів з вентиляторним обдувом.

На рисунку 3.11 зображена запропонована конструкція радіатора, яка буде ефективно відводити тепло з модуля Пельтьє.

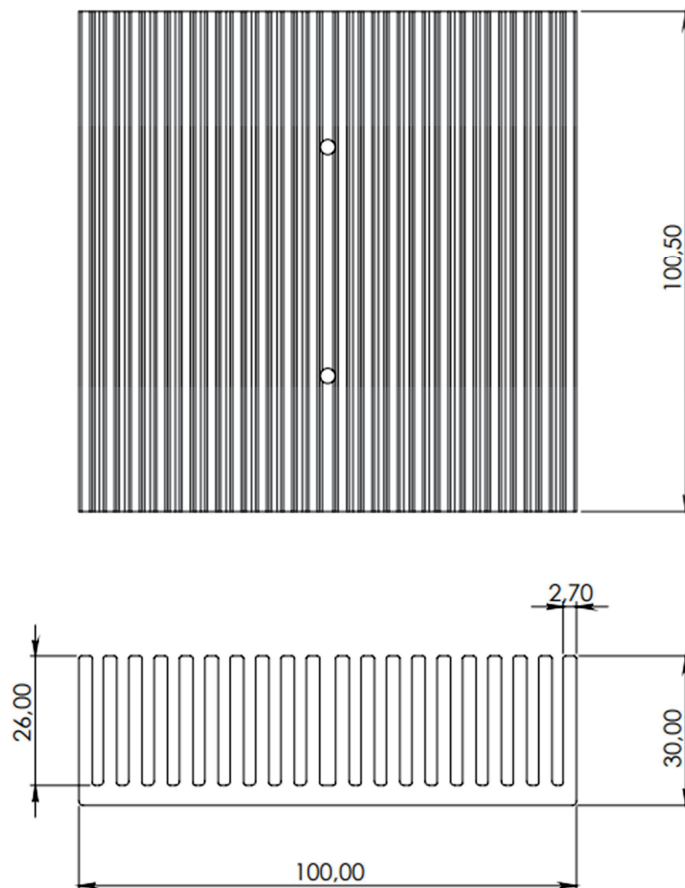


Рисунок 3.11 – Запропонована конструкція радіатора тепловідведення

Проведемо підсумки виконаних розрахунків і сформуємо висновок щодо необхідних теплових характеристик системи. Встановлено, що каскадний мо-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		56

дуль Пельтьє з електричною потужністю 60 Вт і робочою холодопродуктивністю 30 Вт вимагає від радіатора здатності розсіювати щонайменше 90 Вт тепла. Щоб забезпечити допустиму температуру гарячої поверхні на рівні 50 °С, радіатор повинен мати термічний опір не більше 0,28 К/Вт. З урахуванням примусової конвекції площа ребристої поверхні повинна становити приблизно 0,07 м², що відповідає компактному, але продуктивному радіатору з активним охолодженням. Такий підхід дозволяє гарантувати стабільну роботу каскадної термоелектричної системи навіть при значних теплових навантаженнях.

Після проведення розрахунків теплового навантаження та підбору необхідних параметрів радіаторів була спроектована конструкція лабораторної установки, призначеної для реалізації каскадної системи охолодження на основі модуля Пельтьє. Основною метою розробки цієї конструкції було забезпечення ефективного відведення тепла, стабільної роботи модуля та зручності проведення експериментальних досліджень. Загальна компоновка охолоджувального вузла лабораторної установки (рис. 3.12) і включає всі ключові елементи системи тепловідведення.

Основою установки є корпус холодильної шафи (1), який виконує одразу кілька функцій: забезпечує механічний захист внутрішніх компонентів, формує замкнений охолоджуваний об'єм і разом із теплоізоляцією зменшує вплив зовнішнього середовища на процес охолодження. Внутрішні стінки корпусу покриті теплоізоляційним матеріалом (2), що дозволяє знизити теплові втрати та підтримувати більш стабільний температурний режим під час роботи установки. Верхня кришка (3) забезпечує доступ до елементів системи, що значно спрощує монтаж, налаштування та технічне обслуговування.

У центральній частині конструкції розміщений каскадний модуль Пельтьє (6), який є основним активним елементом охолоджувальної системи. З боку холодної поверхні модуля встановлений радіатор (4), призначений для відведення тепла від охолоджуваного об'єму та рівномірного розподілу температури. Для зменшення небажаного теплопередавання між холодною і гарячою сторонами

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		57

модуля використовується теплоізоляційний прошарок (5), який підвищує загальну ефективність роботи каскадної системи.

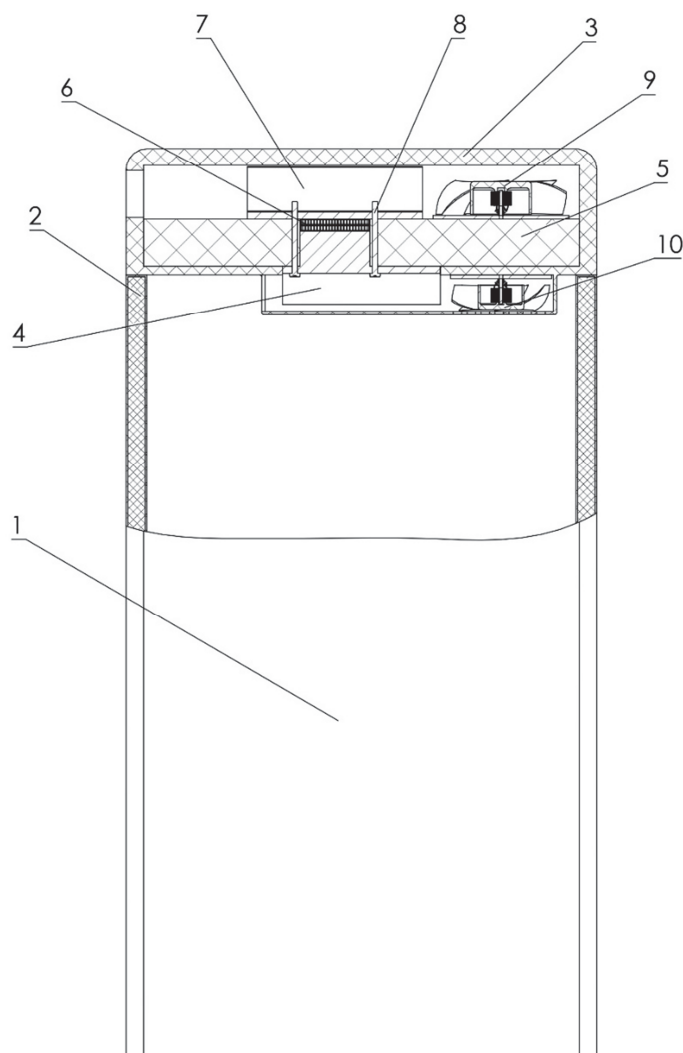


Рисунок 3.12 – Загальна конструкція лабораторної установки

Гаряча сторона модуля Пельтьє оснащена радіатором (7) з вентилятором (9), який забезпечує примусове повітряне охолодження та ефективне відведення тепла в навколишнє середовище. Додатково для покращення теплового режиму холодної сторони застосовано вентилятор (10), що сприяє стабілізації температури та рівномірному охолодженню по всьому об'єму холодильної шафи.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

58

Усі елементи конструкції жорстко закріплені між собою за допомогою гвинтів (8), що забезпечує механічну міцність, надійність монтажу та відсутність зміщень під час експлуатації.

Таким чином, розроблена система тепловідведення каскадного модуля Пельтьє повністю відповідає результатам теплотехнічних розрахунків і забезпечує стабільну та надійну роботу лабораторної установки. Компактна конструкція з активним вентиляторним охолодженням дозволяє ефективно підтримувати задані температурні режими навіть за умов значних теплових навантажень, що створює необхідні умови для проведення експериментальних досліджень ефективності багатокаскадних термоелектричних систем і подальшого вдосконалення холодильних пристроїв на основі ефекту Пельтьє.

3.4 Висновки до розділу 3

У даному розділі було розроблено конструкцію лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження. Сформовано структурну та електричну схеми лабораторної установки, визначено склад основних функціональних елементів і принципи їх взаємодії, що забезпечують автоматизоване керування температурним режимом. Проведено розрахунок системи тепловідведення каскадного модуля Пельтьє та обґрунтовано вибір радіаторів, відповідно до теплового навантаження. Запропонована конструкція лабораторної установки забезпечує стабільні умови роботи каскадного модуля та створює необхідну основу для подальшого проведення експериментальних досліджень каскадної системи охолодження.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		59

4 ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПОБУТОВОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ

4.1 Дослідження каскадного з'єднання елементів Пельтьє

Перед проведенням експерименту були підготовлені три термоелектричні модулі Пельтьє – однокаскадної, двокаскадної та трикаскадної конфігурації (рис. 4.1). Усі вони мали однаковий перший каскад розмірами 40×40 мм та номінальну напругу 12 В.

Перед проведенням дослідження усі модулі пройшли візуальний огляд та перевірку електричних параметрів для забезпечення стабільної роботи під час випробувань. Це дозволяло оцінити їх поведінку в реальних умовах і порівняти ефективність різних конфігурацій [19].

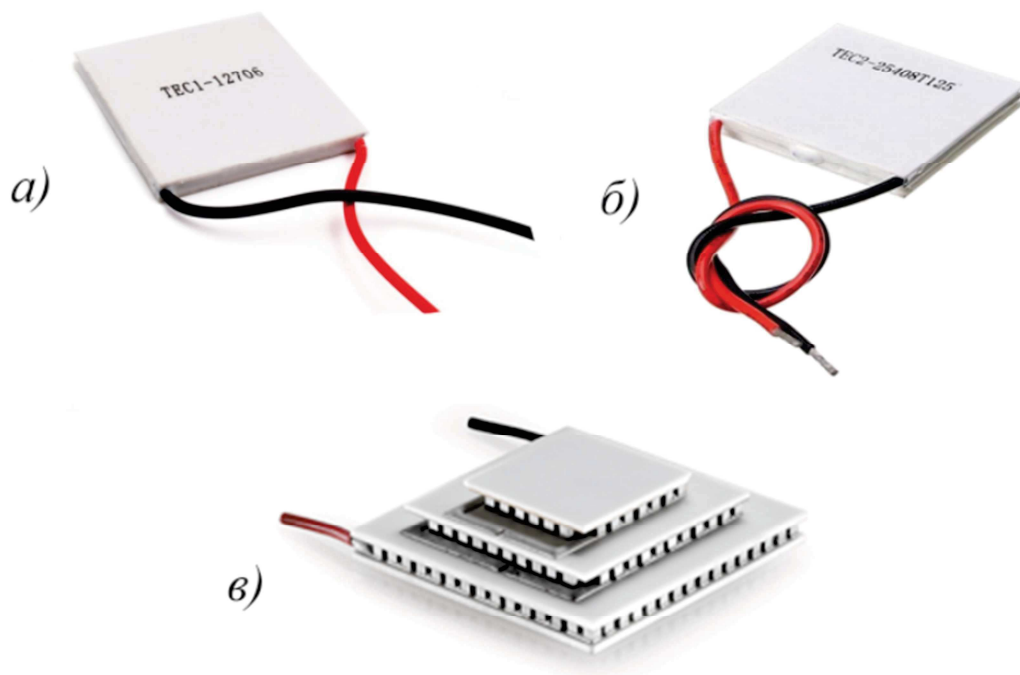


Рисунок 4.1 – Однокаскадний (а), двокаскадний (б) та трикаскадний (в) модулі Пельтьє

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		60

Температурні вимірювання здійснювалися за допомогою термопари ТР-01А, під'єднаної до цифрового мультиметра (6). На рисунку 4.2 зображено експериментальну установку для проведення дослідження термоелектричних модулів на основі ефекту Пельтьє. Установка включає холодильну шафу (1) як основну базу для охолодження, радіатор гарячої сторони (2) для відведення тепла, радіатор холодної сторони (3) для посилення охолодження, модуль Пельтьє (4) як ключовий елемент термоелектричного перетворення, лабораторний блок живлення (5) для подачі напруги.

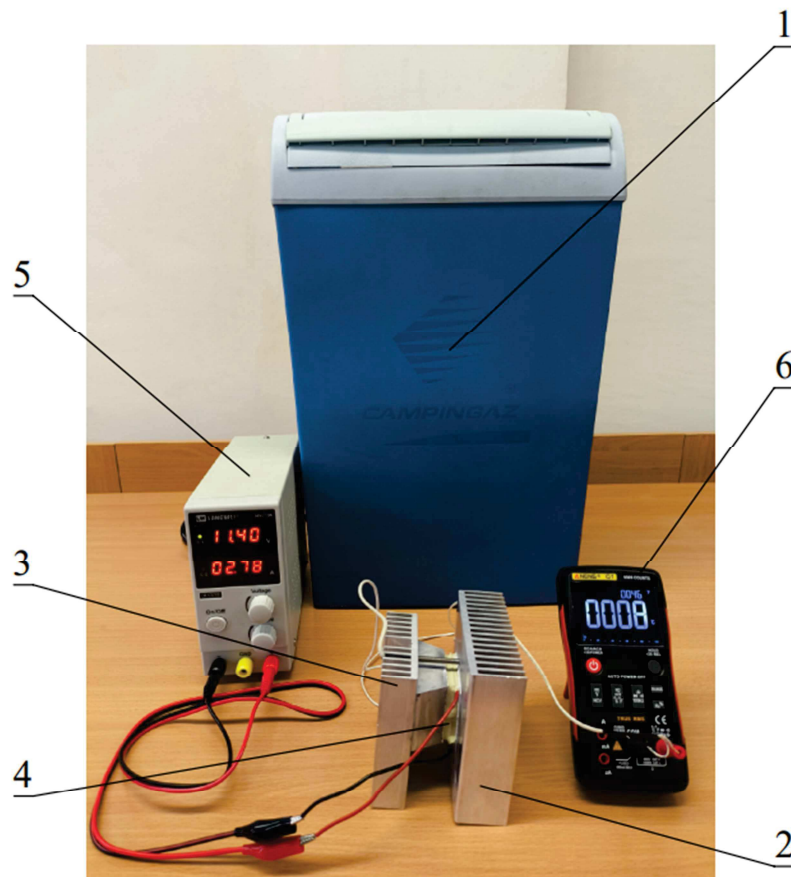


Рисунок 4.2 – Проведення експериментального дослідження

Верхній каскад двокаскадного елемента мав однакові розміри з першим каскадом, а трикаскадного елемента мав пропорційно менші робочі площі (30 мм у

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		61

другому каскаді та 20 мм у третьому), що відповідає типовим конструктивним схемам багатокаскадних охолоджувачів на основі Bi_2Te_3 . Електричні параметри всіх трьох модулів були подібними: максимальний робочий струм становив близько 5 А, типова робоча потужність сягала приблизно 60 Вт.

Напруга подавалася поступово, у діапазоні від 9 до 13 В із кроком 0,5 В, що забезпечувало можливість простежити зміну температурних характеристик системи при різних умовах роботи.

Для кожного з трьох термоелектричних модулів виконувалася серія вимірювань температури у двох контрольних точках:

- на внутрішньому радіаторі холодної сторони, розташованому в холодильній камері;
- на радіаторі гарячої сторони, закріпленому в кришці термоелектричного холодильника.

Дослідження проводилися у холодильній камері об'ємом 24,3 л. при температурі навколишнього середовища 25 °С.

У ході дослідження були отримані значення струму, температур холодної та гарячої сторін для кожного режиму роботи, після чого обчислювалася різниця температур $\Delta T = T_c - T_h$. Ці дані дозволяють оцінити тепловий баланс модуля, визначити характер зміни температури при зміні електричного навантаження та проаналізувати ефективність роботи кожного каскаду у складі системи.

У таблиці 4.1 наведено результати експериментальних вимірювань для однокаскадного модуля Пельтьє в діапазоні прикладених напруг від 9,0 В до 13,0 В. Зі збільшенням напруги спостерігається монотонне зростання струму від 2,77 А до 3,81 А, що супроводжується підвищенням температури гарячої сторони T_c з 29 °С до 35 °С. Температура холодної сторони T_h у цьому випадку зменшується від 13 °С до 9 °С, однак після досягнення напруги близько 11,5 В подальше зниження T_h практично не спостерігається, що вказує на вихід системи на характерний робочий режим. Різниця температур ΔT зростає від 16 °С до 26 °С, при цьому у верхній частині діапазону напруг темп її зростання дещо зменшується. Отримані дані свідчать, що для однокаскадного модуля підвищення напруги пі-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

ся певного рівня призводить переважно до зростання тепловиділення, тоді як зниження температури холодної сторони є обмеженим.

Таблиця 4.1 - Результати вимірювань для однокаскадного модуля Пельтьє.

U (В)	I (А)	T_x (°С)	T_z (°С)	ΔT (°С)
9,0	2,77	13	29	16
9,5	2,91	11	30	19
10	3,05	10	31	21
10,5	3,18	10	32	22
11	3,32	10	33	23
11,5	3,45	9	33	24
12	3,57	9	34	25
12,5	3,69	9	34	25
13	3,81	9	35	26

У таблиці 4.2 представлені результати вимірювань для двокаскадного модуля Пельтьє. При зміні напруги в діапазоні 9,0 – 13,0 В струм зростає від 2,81 А до 3,93 А, що супроводжується більш вираженим зниженням температури холодної сторони порівняно з однокаскадним варіантом. Значення T_x зменшується від 13 °С до 4 °С майже монотонно у всьому досліджуваному діапазоні напруг, без чітко вираженої стабілізації. Температура гарячої сторони при цьому змінюється в межах 30 – 35 °С, тобто залишається на рівні, близькому до однокаскадного модуля. Різниця температур ΔT збільшується від 17 °С до 31 °С. Порівняння результатів при однакових напругах показує, що двокаскадний модуль забезпечує нижчу температуру холодної сторони: наприклад, при 10,0 В T_x становить 8 °С, тоді як для однокаскадного модуля – 10 °С. Це підтверджує позитивний вплив каскадного з'єднання на зниження температури холодної поверхні за помірного зростання температури гарячої сторони.

Таблиця 4.2 - Результати вимірювань для двокаскадного модуля Пельтьє.

U (В)	I (А)	T_x (°С)	T_2 (°С)	ΔT (°С)
9,0	2,81	13	30	17
9,5	2,95	10	30	20
10	3,10	8	31	23
10,5	3,24	7	31	24
11	3,38	6	32	26
11,5	3,52	6	33	27
12	3,66	5	34	29
12,5	3,80	4	34	30
13	3,93	4	35	31

У таблиці 4.3 наведено результати експериментальних досліджень трикаскадного модуля Пельтьє. Для цієї конфігурації характерні найбільші значення струму, які зростають від 3,30 А до 4,52 А при збільшенні напруги від 9,0 В до 13,0 В. Температура гарячої сторони T_2 у трикаскадному модулі істотно вища, ніж у попередніх випадках, і змінюється від 32 °С до 41 °С. Температура холодної сторони T_x зменшується від 13 °С до 9 °С, однак уже при напругах близько 10,5–11,0 В спостерігається її стабілізація, незважаючи на подальше зростання струму та напруги. Різниця температур ΔT у цьому випадку досягає найбільших значень серед усіх досліджених конфігурацій і зростає від 19 °С до 32 °С, що відображає накопичувальний ефект послідовного каскадного з'єднання термоелектричних елементів.

Додатковою причиною обмеженого зниження температури холодної сторони у трикаскадному модулі є конструктивна особливість, пов'язана зі зменшенням робочої площі верхніх каскадів. У досліджуваному модулі перший каскад має розміри 40×40 мм, другий – 30×30 мм, а третій – 20×20 мм, тобто кожен наступний каскад характеризується пропорційно меншою площею контакту. Зменшення активної поверхні холодної сторони верхнього каскаду призводить

до збільшення щільності теплового потоку, що ускладнює реалізацію подальшого зниження температури T_x .

Таблиця 4.3 - Результати вимірювань для трикаскадного модуля Пельтьє.

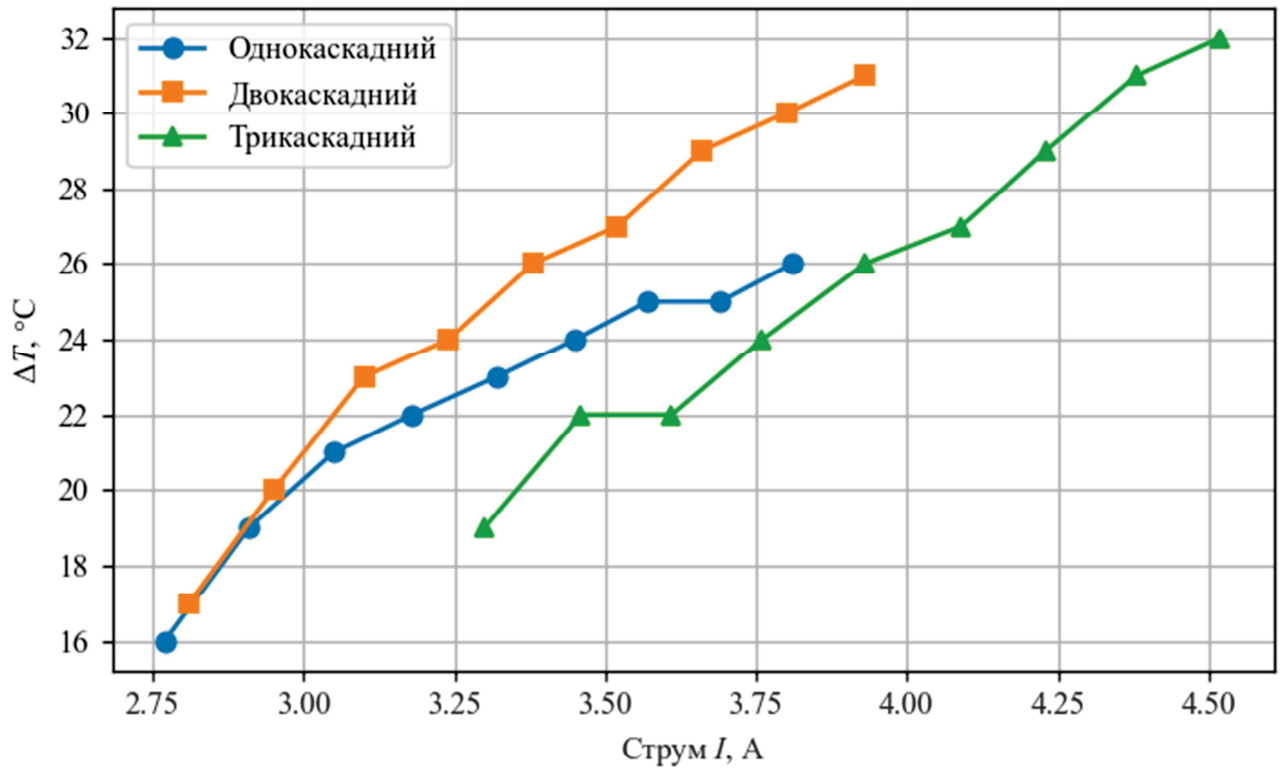
U (В)	I (А)	T_x (°С)	T_2 (°С)	ΔT (°С)
9,0	3,30	13	32	19
9,5	3,46	11	33	22
10	3,61	11	33	22
10,5	3,76	10	34	24
11	3,93	9	35	26
11,5	4,09	9	36	27
12	4,23	9	38	29
12,5	4,38	9	40	31
13	4,52	9	41	32

Порівняльний аналіз результатів, отриманих для однокаскадного, двокаскадного та трикаскадного модулів Пельтьє, дозволяє встановити чіткий взаємозв'язок між кількістю каскадів, температурою холодної сторони та загальним температурним перепадом. Однокаскадний модуль характеризується обмеженим зниженням T_x та раннім виходом на режим стабілізації. Двокаскадний модуль демонструє найбільш рівномірне і глибоке зниження температури холодної сторони при помірних значеннях температури гарячої сторони. Трикаскадний модуль забезпечує максимальний температурний перепад ΔT , однак зменшення температури холодної сторони у ньому є менш вираженим і супроводжується значно вищими значеннями T_2 та струму. Отримані експериментальні результати підтверджують визначальний вплив каскадності та геометричних параметрів модулів на температурні режими роботи термоелектричних охолоджувальних систем.

На рисунку 4.3 подано графіки залежності температурного перепаду ΔT від струму I та ΔT від напруги U для однокаскадного, двокаскадного та трикаскадного модулів Пельтьє.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		66

Залежність різниці температур ΔT від струму I



Залежність різниці температур ΔT від напруги U

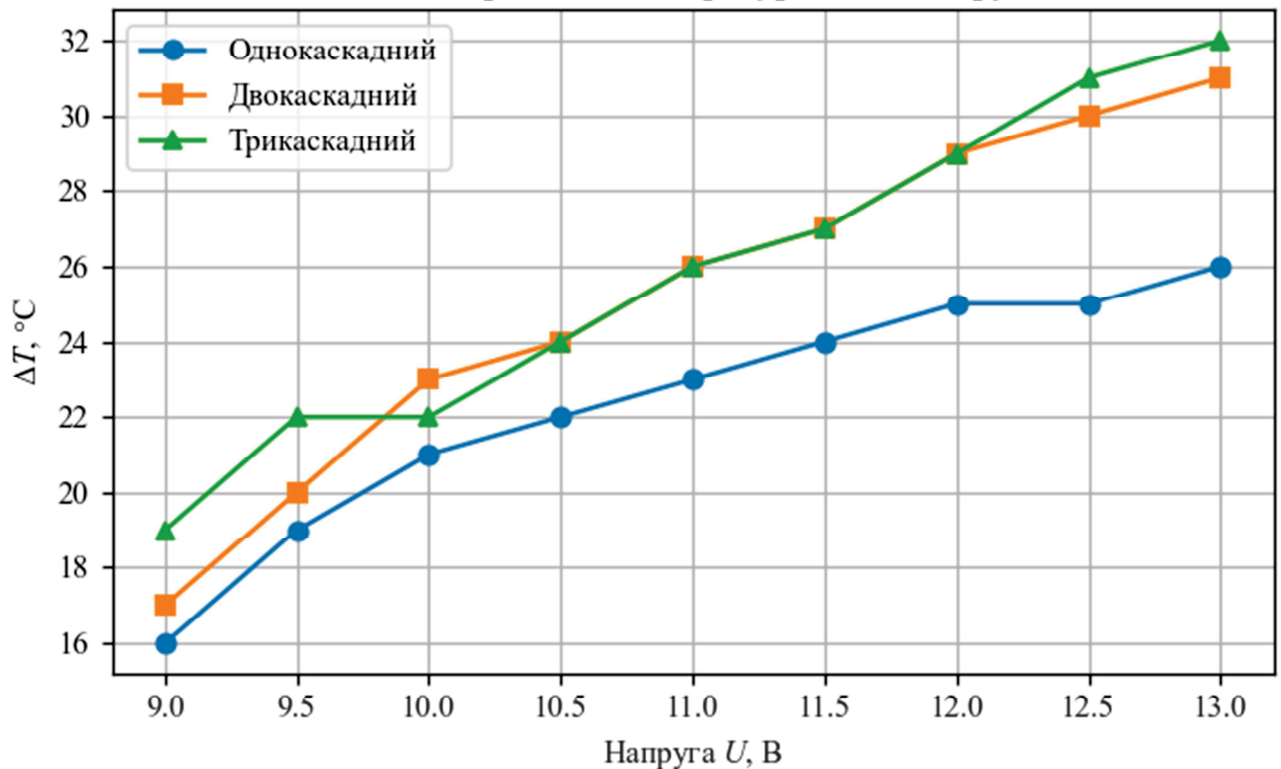


Рисунок 4.3 – Графіки залежності ΔT від струму I та напруги U для однокаскадного, двокаскадного і трикаскадного модулів Пельтьє

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Порівняння наведених графічних залежностей дає змогу оцінити температурні режими роботи однокаскадного, двокаскадного та трикаскадного модулів Пельтьє, а також проаналізувати характер зміни температури гарячої сторони при зростанні електричного навантаження. Аналіз показує, що для двокаскадної конфігурації зростання температури гарячої сторони є менш інтенсивним порівняно з однокаскадним і трикаскадним варіантами в усьому досліджуваному діапазоні напруг, що узгоджується з експериментальними даними таблиць 4.1 – 4.3. За цих умов двокаскадний модуль забезпечує помітніше зниження температури холодної сторони при близьких значеннях температури гарячої сторони.

В основу розрахунків покладено дані експериментальної таблиці 4.2, яка надає значення напруги, струму, температур холодної та гарячої сторін, а також ΔT для різних робочих точок.

Для оцінки ефективності модуля Пельтьє використовується ряд стандартних фізичних величин та формул. Електрична потужність $P_{ел}$, що споживається модулем, визначається як добуток напруги та струму:

$$P_{ел} = U \cdot I, \quad (4.1)$$

де U – напруга живлення (В);

I – струм (А).

Це дозволяє обчислити повну електричну потужність, яка перетворюється на теплову енергію та холодопродуктивність. Для двокаскадного модуля, на основі параметрів елемента Пельтьє 40×40 мм, прийнято: коефіцієнт термоЕРС $\alpha = 0,10$ В/К, опір термоелемента $R = 4$ Ом, теплопровідність $\lambda = 1,6$ Вт/К.

Холодопродуктивність модуля Q_0 розраховується за стандартною формулою:

$$Q_0 = \alpha \cdot I \cdot T_x - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot \Delta T, \quad (4.2)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		69

де T_x – температура холодної сторони;

$\Delta T = T_2 - T_x$ – різниця температур між гарячою та холодною сторонами;

R – опір термоелемента;

λ – коефіцієнт теплопровідності модуля.

Ця формула дозволяє визначити кількість теплової енергії, яку модуль ефективно відводить із холодної сторони, враховуючи внутрішні втрати та тепловий потік через корпус.

Для оцінки ефективності також використовується холодильний коефіцієнт ε , який визначає відношення корисної холодопродуктивності до спожитої електричної потужності. Його розрахунок виконується за формулою:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P_{el}}, \quad (4.3)$$

Розраховані значення параметрів для кожного режиму роботи наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Результати розрахунків для двокаскадного модуля Пельтьє.

U , (В)	I , (А)	T_x , (°С)	T_2 , (°С)	ΔT , (°С)	P_{el} , (Вт)	Q_0 , (Вт)	ε
9	2,81	13	30	17	25,29	16,78	0,66
9,5	2,95	10	30	20	28,03	17,49	0,62
10	3,10	8	31	23	31,00	17,22	0,56
10,5	3,24	7	31	24	34,02	16,80	0,49
11	3,38	6	32	26	37,18	16,30	0,44
11,5	3,52	6	33	27	40,48	15,94	0,39
12	3,66	5	34	29	43,92	15,60	0,36
12,5	3,80	4	34	30	47,50	14,99	0,32
13	3,93	4	35	31	51,09	14,58	0,29

На основі даних, наведених у таблиці 4.4, було побудовано два аналітичні графіки, що дозволяють оцінити роботу двокаскадного модуля Пельтьє при різних режимах живлення.

Перший графік(рис. 4.5), ілюструє залежність холодильного коефіцієнта ϵ від струму споживання I . З аналізу графіка видно, що зі збільшенням струму від 2,81 А до 3,93 А значення ϵ поступово зменшується від 0,66 до 0,29. Максимальний холодильний коефіцієнт досягається при мінімальному струмі 2,81 А та напрузі 9 В, що відповідає найбільш енергоефективному режиму роботи модуля. Подальше підвищення струму супроводжується зростанням теплових втрат, що призводить до зниження ефективності охолодження та меншої частини холодопродуктивності, яка реально використовується для підтримки температурного перепаду між холодною та гарячою сторонами модуля.

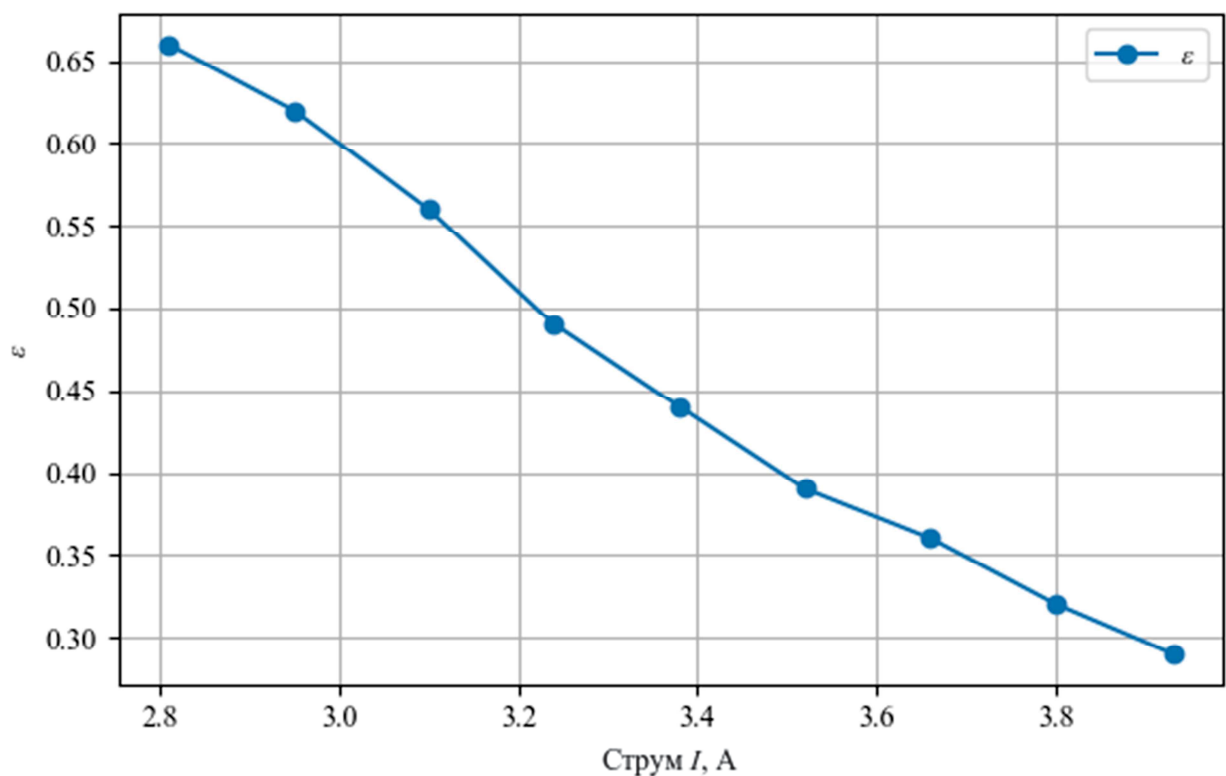


Рисунок 4.5 – Графік залежності холодильного коефіцієнта ϵ від струму I

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Другий графік (рис. 4.6) показує залежність холодопродуктивності Q_0 від струму живлення I . Із графіка видно, що максимальна холодопродуктивність досягається при струмі 2,95 А та напрузі 9,5 В. У цьому режимі температура холодного боку зменшується до 10 °С, а холодильний коефіцієнт становить 0,62. Цей робочий режим є оптимальним у випадках, коли пріоритетом є саме інтенсивність відведення тепла.

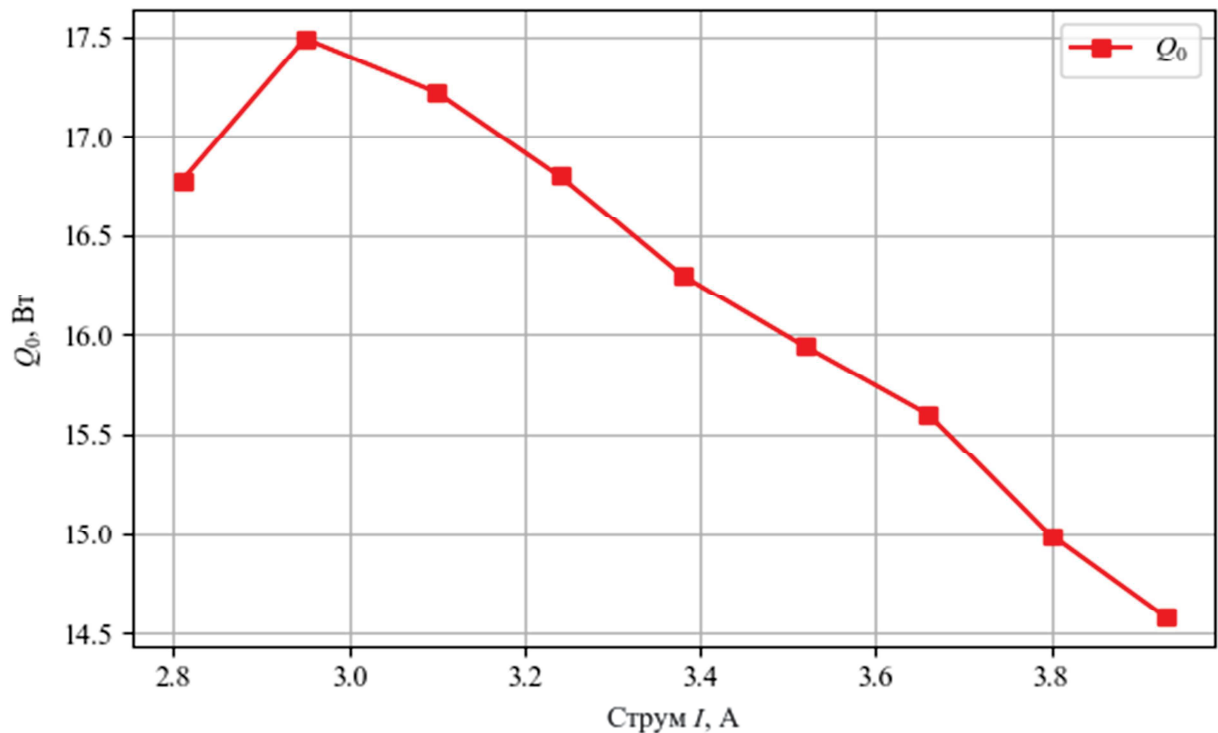


Рисунок 4.6 – Графік залежності холодопродуктивності Q_0 від струму I

Узагальнюючи результати аналізу, можна зазначити, що максимальний ϵ спостерігається при мінімальному струмі 2,81 А, тоді як максимальна продуктивність охолодження досягається при дещо вищому струмі 2,95 А. Мінімальна температура холодної сторони (4 °С) була отримана при напрузі 12,5 В та струмі 3,80 А. Цю робочу точку можна вважати придатною для режимів, де ключовим є досягнення максимально низьких температур у робочому об'ємі.

4.2 Калориметричний розрахунок двокаскадного модуля Пельтьє

Калориметричний розрахунок холодопродуктивності двокаскадного модуля Пельтьє виконується на основі енергетичного балансу охолоджуваного об'єму. Для цього необхідно визначити масу повітря, що міститься у камері, та кількість теплоти, яка відводиться від нього в процесі охолодження. Об'єм камери становить $V=24$, що еквівалентно $0,0243 \text{ м}^3$. Якщо прийняти густину повітря при кімнатних умовах рівною $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$, то маса повітря в камері m визначається як добуток густини на об'єм. Таким чином,

$$m = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 0,0243 = 0,029, \text{ кг.} \quad (4.4)$$

Отримане значення показує, що в камері міститься близько 29 грамів повітря, яке є основним теплоносієм у процесі охолодження.

Питома теплоємність повітря при сталому тиску в діапазоні робочих температур приймається рівною $c \approx 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Початкова температура повітря в камері відповідає температурі навколишнього середовища і становить $T_{\text{поч}} = 25 \text{ С}$. Згідно з експериментальними даними, температура холодної сторони модуля зменшувалася до $T_x = 4 \text{ С}$, що дає підстави прийняти кінцеву температуру повітря в камері як $T_{\text{кін}} \approx 5 \text{ С}$. Таким чином, зміна температури повітря у камері $\Delta T_{\text{кам}}$ становить [20]:

$$\Delta T_{\text{кам}} = T_{\text{поч}} - T_{\text{кін}} = 25 - 5 = 20, \text{ К.} \quad (4.5)$$

Кількість теплоти, яка відводиться від повітря за весь цикл охолодження $Q_2^{\text{кал}}$, визначається за класичною формулою:

$$Q_2^{\text{кал}} = m \cdot c \cdot \Delta T_{\text{кам}} \quad (4.6)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		73

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$Q_2^{кал} = 0,029 \cdot 1000 \cdot 20 = 580, \text{ Дж.} \quad (4.7)$$

Це означає, що за час експерименту від повітря в камері було відведено близько 580 джоулів теплової енергії.

Оскільки кожен із дев'яти режимів напруги підтримувався протягом 5 хвилин, загальний час експерименту $t_{заг}$ дорівнює:

$$t_{заг} = 9 \cdot 300 = 2700, \text{ с.} \quad (4.8)$$

Таким чином, середня калориметрично оцінена холодопродуктивність $Q_0^{кал}$ системи визначається як відношення відведеної кількості теплоти до часу експерименту:

$$Q_0^{кал} = \frac{Q_2^{кал}}{t_{заг}} = \frac{580}{2700} = 0,21, \text{ Вт.} \quad (4.9)$$

Таким чином, калориметричний розрахунок дозволяє кількісно оцінити ефективну частину холодопродуктивності модуля Пельтьє та підтверджує, що реальна продуктивність системи значною мірою залежить від теплоізоляції та конструктивних особливостей камери, які визначають рівень теплових втрат і стабільність температурного режиму під час експлуатації. Крім того, отримані результати демонструють важливість правильного розташування вентиляційних елементів та радіаторів для підтримки рівномірного охолодження та забезпечення оптимального розподілу температур між холодною та гарячою сторонами модуля.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		74

4.3 Висновки до розділу 4

Дослідження каскадної системи охолодження пристроїв на основі термоелектричного ефекту показало, що ефективність охолодження залежить від кількості каскадів, прикладеної напруги та величини струму.

Однокаскадний модуль забезпечує обмежене зниження температури холодної сторони та швидко виходить на стабілізований режим.

Двокаскадний модуль продемонстрував оптимальне співвідношення між охолодженням та помірним нагріванням гарячої сторони, забезпечуючи значне зниження температури холодної сторони при стабільних значеннях температури гарячої сторони і струму, що робить його найефективнішим серед досліджених конфігурацій.

Трикаскадний модуль досягає найбільшого температурного перепаду, проте високі значення струму та температури гарячої сторони обмежують його ефективність у практичних умовах, а зменшена робоча площа верхніх каскадів ускладнює ефективне поглинання тепла.

Калориметричний розрахунок дозволяє кількісно оцінити холодопродуктивність модулів та визначити оптимальні режими їх експлуатації.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		75

ВИСНОВОК

У дипломній роботі виконано теоретичне та експериментальне дослідження каскадних термоелектричних систем охолодження на основі ефекту Пельтьє. У першому розділі проаналізовано термоелектричні процеси генерації холоду, розкрито фізичну сутність і взаємозв'язок ефектів Пельтьє, Зеебека та Томсона, а також визначено основні параметри термоелектричних елементів, що впливають на їх енергетичні та температурні характеристики. Узагальнення сучасних технічних рішень дозволило сформулювати цілісне уявлення про принципи побудови термоелектричних охолоджувальних систем і обґрунтувати доцільність застосування каскадних схем.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи функціонування однокаскадних і багатокаскадних модулів Пельтьє, наведено методи їх розрахунку та проаналізовано вплив електричних і теплових параметрів на ефективність роботи. На основі теоретичних положень розроблено конструкцію лабораторної установки для дослідження каскадної системи охолодження, сформовано її структурну та електричну схеми, а також обґрунтовано вибір системи тепловідведення, що забезпечує стабільні умови роботи модулів.

Дослідження каскадного з'єднання елементів Пельтьє показало, що ефективність охолодження великою мірою залежить від кількості каскадів, прикладеної напруги та сили струму. Встановлено, що однокаскадний модуль забезпечує обмежений температурний перепад, двокаскадний модуль характеризується найбільш оптимальним співвідношенням між досягнутим охолодженням і тепловим навантаженням, тоді як трикаскадний модуль має найбільше споживання струму та не може забезпечити достатнє охолодження через недостатню площу верхнього каскаду охолодження. Калориметричний розрахунок підтвердив можливість кількісної оцінки холодопродуктивності та вибору оптимальних режимів експлуатації каскадних термоелектричних систем.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		76

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛІ ПОСИЛАНЬ

1. Understanding Thermoelectric Cooling: Principles and Applications [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gagner-toomey.com/understanding-thermoelectric-cooling-principles-and-applications/>.
2. Seebeck effect, Thermoelectricity, Temperature Gradients [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/Seebeck-effect>.
3. Peltier effect, Definition, Discovery [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/Peltier-effect>.
4. Thomson effect, Thermal Conduction, Heat Transfer [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/Thomson-effect>.
5. Carrier generation and recombination [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.
6. How Do Peltier Dehumidifiers Work? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bestdehumidifier.reviews/how-do-peltier-dehumidifiers-work/>.
7. Automotive Applications of Peltier Thermoelectric Coolers [Електронний ресурс]. Режим доступу [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.zjcxtech.com/where-are-peltier-thermoelectric-coolers-applied-in-a-car/>.
8. Thermoelectric Cooling for CMOS Sensors – Tark Thermal Solutions [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tark-solutions.com/thermal-technical-library/application-notes/thermoelectric-cooling-cmos-sensors>.
9. What Is a Peltier Cooler, and Is It Better for Your PC? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.howtogeek.com/866533/what-is-a-peltier-cooler/>.
10. Hot and Cold Water Cooler Using A Peltier Thermoelectric Cooling Module [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.circuits-diy.com/hot-and-cold-water-cooler-using-a-peltier-thermoelectric-cooling-module/>.
11. Design and Fabrication of Mini Refrigerator Using Peltier Modules [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ijsred.com/volume6/issue6/IJSRED-V6I6P63.pdf>.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		77

12. Principles and Techniques of Thermoelectric Cooling [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.compelma.com/en/thermoelectric-cooling/>.

13. Анатичук Л.І. Термоелектричний побутовий холодильник. Патент України № 81979. МПК F25B 21/02. А.С. 200604211. Опубл. 25.02.2008.

14. Удосконалення конструкції системи охолодження термоелектричного автомобільного холодильника О.О. Налобіна, В.В. Якимчук. Вісник КНУТД №5 2010 р. с.296-303.

15. Анатичук Л.І. Термоелектричний побутовий холодильник. Патент України № 27103. МПК F25B 21/02. А200603526. Опубліковано 25.10.2007.

16. L.I. Anatyshuk and R.V. Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. Berlin: Expert Verlag, 2011.

17. Анатичук Л. І., Лусте О. Я., Демчук Б. М. Термоелектрична батарея. Патент України № 67369. МПК H01L 35/00. Опубл. 15.06.2004.

18. Thermoelectric Modules – Operating Principles [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric-modules/>.

19. Aluminum Heat Sink Design for Peltier Modules [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tetech.com/aluminum-heat-sink-design/>.

20. Cascaded Thermoelectric Cooling Systems [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217312390>.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		78