

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка термоелектричного  
холодильника з поліпшеними  
властивостями

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу група ЕТ-20-1

  
Підпис


Підкова Д.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

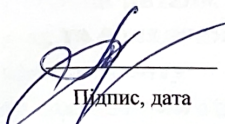
ст.викл. Лісевич С.П.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Пундик С.І.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

17 06 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

17. 06  .2024

ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
**Підкова Денис Віталійович**  
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями**

керівник роботи **Лісевич С.П. старший викладач**

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

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру МАЕЕС

3. Вихідні дані до роботи: **термоохолоджуючі пристрої, технічні параметри та особливості роботи термоелементів у системах охолодження**

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

**1 Аналіз термоелектричних явищ та обладнання для охолодження з використанням термоелектричного ефекту**

**2 Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями**

**3 Розробка конструкції термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

**Аркуш 1. Термоохолоджуючі пристрої. Документ оглядовий (А1).**

**Аркуш 2. Термоелектричний холодильник з поліпшеними**

**властивостями. Схема структурна (А1). Аркуш 3. Термоохолоджуючий**

пристрій. Складальне креслення (A1). Аркуш 4. Термоохолоджуючий пристрій. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5. Термоелектричний холодильник з поліпшеними властивостями. Вид загальний (A1).

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 Аналіз термоелектричних явищ та обладнання для охолодження з використанням термоелектричного ефекту	05.05.24р.	
2 Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями	20.05.24р.	
3 Розробка конструкції термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями	20.06.24р.	

Студент

  
Підпис

\_\_\_\_\_ Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

\_\_\_\_\_ Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові Підкова Денис Віталійович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента \_\_\_\_\_
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень \_\_\_\_ арк., сторінок записки \_\_\_\_

5. Ця робота присвячена розробці термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями, який використовує для охолодження термоелектричний ефект.

У роботі описується детальна розробка та реалізація конструкції термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями.

В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз термоелектричних явищ та пристроїв для охолодження з використанням термоелектричного ефекту. В другому розділі здійснюється огляд теоретичних основ розробки термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями та проведення розрахунків однокаскадних та багатокаскадних термоелементів і наведені графіки їх роботи. В третьому розділі здійснюється складання структурної та електричної схеми роботи термоелектричного холодильника. Розроблено складальне креслення термоохолоджуючого пристрою, на базі трьохкаскадного термоелемента Пельтьє. Здійснено детальний опис та розробку конструктивних елементів. Також, проведено випробування пристрою яке підтвердило його ефективність та надійність.

Підпис студента DPB

« 17 » 06 20 24 р.

### РІШЕННЯ ЕК

Протокол 13 від « 27 » 06 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК Вигинько ІА

Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

Особливі відмітки \_\_\_\_\_  
Технічний секретар AB

« 27 » 06 20 24 р.

# ЗМІСТ

	с.
Вступ .....	7
1 Аналіз термоелектричних явищ та обладнання для охолодження з використанням термоелектричного ефекту .....	8
1.1 Теоретичні основи охолодження з використанням термоелектричного ефекту .....	8
1.2 Огляд та аналіз термоелектричних холодильних пристроїв .....	12
1.3 Висновки до розділу .....	21
2 Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями .....	22
2.1 Теоретичні основи розробки термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями .....	22
2.2 Розрахунок однокаскадних та багатокаскадних елементів Пельтьє....	31
2.3 Розрахунок термоелектричного елемента в режимі холодопродуктивності та максимального холодильного коефіцієнта .....	33
2.4 Висновки до розділу .....	42
3 Розробка конструкції термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями .....	43
3.1 Розробка структурної схеми термоелектричного холодильника .....	43
3.2 Розробка конструкції термоохолоджуючого пристрою .....	47
3.3 Розробка електричної схеми термоелектричного холодильника .....	49
3.4 Розрахунок охолодження термоелектричного пристрою .....	52

## БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Адк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав	Підкова Д.В.	<i>Д.В. Підкова</i>					5	63
Перевір.	Лісевич С.П.	<i>С.П. Лісевич</i>						
Н.контр.	Пундик С.І.	<i>С.І. Пундик</i>						
Затвер.	Поліщук О.С.	<i>О.С. Поліщук</i>						

ХНУ, гр. ЕТ-20

3.5 Розрахунок теплоізоляції термоелектричного пристрою та підбір оптимальної товщини теплоізоляційного шару.....	55
3.6 Висновки до розділу .....	59
Висновки.....	60
Перелік джерел посилань.....	61
Додатки .....	63

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		6

## ВСТУП

У сучасному світі, де енергетичні ресурси стають все більш обмеженими, а вимоги до екологічності та ефективності енергосистем зростають, термоелектричні технології набувають нового значення. Термоелектричні явища, зокрема ефект Пельтьє, відкривають можливості для створення енергоефективних та екологічно чистих систем охолодження. Ці системи не містять рухомих частин, що суттєво знижує ризик зносу та поломок.

Аналіз термоелектричних явищ та устаткування для отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту вимагає глибокого розуміння фізичних принципів, що лежать в основі цих явищ, а також знання сучасних матеріалів і технологій. У цьому контексті, важливо розглянути не тільки теоретичні аспекти, але й практичні застосування, економічну ефективність та потенційні області використання термоелектричних систем охолодження.

Цей аналіз має на меті не лише оцінити існуючі термоелектричні технології, але й сприяти розвитку нових підходів та рішень, які б забезпечили більш ефективне та екологічно безпечне охолодження в різних галузях промисловості та побуту. Вивчення та оптимізація термоелектричних систем може відіграти ключову роль у створенні сталої та енергонезалежної інфраструктури майбутнього.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		7

# 1 Аналіз термоелектричних явищ та обладнання для охолодження з використанням термоелектричного ефекту

## 1.1 Теоретичні основи охолодження з використанням термоелектричного ефекту

Термоелектричний ефект — це фізичне явище, при якому виникає електричний струм у провіднику або напівпровіднику при нерівномірному нагріванні його двох кінців. Це явище базується на тому, що при нагріванні одного кінця матеріалу відбувається зміна температури та рух заряджених частинок, що призводить до виникнення різниці потенціалів і, відповідно, до виникнення електричного струму.

У масштабі атомів (зокрема, носіїв заряду) прикладена різниця температур змушує заряджені носії в матеріалі, будь то електрони або дірки, переміщатися з гарячої сторони матеріалу на холодну, таким чином ми можемо отримати термічно індукований струм.

Цей ефект може бути використаний для вироблення електроенергії, охолодження предметів, вимірювання температури, їх нагрівання чи приготування їжі. Оскільки напрямок нагріву і охолодження визначається знаком прикладеної напруги, з термоелектричних приладів виходять дуже зручні регулятори температури.

Традиційно термін “термоелектричний ефект” або “термоелектрика” охоплює три окремо визначені явища, відомі як ефект Зеєбека, ефект Пельтьє та ефект Томсона. У багатьох підручниках термоелектричний ефект також може називатися ефектом Пельтьє-Зеєбека. Цей поділ походить від незалежних відкриттів французького фізика Жана Шарля Атаназа Пельтьє та естонсько-німецького фізика Томаса Йоганна Зеєбека. Джоулеве нагрівання, тепло, яке виділяється щоразу, коли різниця напруг прикладається до резистивного матеріалу, певною мірою пов'язане, хоча зазвичай його не називають термоелектричним

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		8

ефектом (і його зазвичай розглядають як механізм втрат через не ідеальність у термоелектричних пристроях). Ефекти Пельтьє-Зеєбека і Томсона оборотні, в той час як нагрівання Джоуля - ні [1].

Ефект Томсона був передбачений і згодом експериментально спостережуваний Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном) в 1851 році. Він описує нагрівання або охолодження провідника зі струмом з градієнтом температури.

Будь-який провідник зі струмом (крім надпровідника), при різниці температур між двома точками, буде або поглинати, або виділяти тепло, в залежності від матеріалу. В залежності від знаку градієнта температури та типу матеріалу, теплова енергія може переноситися в напрямку або протилежному напрямку електричного струму.

Якщо через однорідний провідник пропускати густину струму  $J$ , то вироблення тепла на одиницю об'єму дорівнює:

$$Q = \rho J^2 - \mu J \frac{dT}{dx}, \#(1.1)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу;

$J$  - нагрів Джоуля.

$\mu$  - коефіцієнт Томсона;

$dT/dx$  - градієнт температури уздовж дроту;

Коефіцієнт Томсона є унікальним серед трьох основних термоелектричних коефіцієнтів, оскільки він є єдиним термоелектричним коефіцієнтом, який можна безпосередньо виміряти для окремих матеріалів. Коефіцієнти Пельтьє і Зеєбека можуть бути визначені тільки для пар матеріалів. Таким чином, не існує прямого експериментального методу для визначення абсолютного коефіцієнта Зеєбека (тобто термопотужності) або абсолютного коефіцієнта Пельтьє для окремого матеріалу.

Ефект Зеєбека полягає в тому, що напруга, термоелектрична ЕРС, створюється в присутності різниці температур між двома різними металами або напів-

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		9

провідниками. Це викликає безперервний струм в провідниках, якщо вони утворюють цілісний контур. Створювана напруга має порядок декількох мікрвольт на різницю кельвінів.

Отримати значення напруги в ланцюзі, використовуючи ефект Зеебека, можна по формулі:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad \#(1.2)$$

$S_A$  і  $S_B$  - це коефіцієнти Зеебека (також звані термоелектричною силою або термосилою) металів  $A$  і  $B$  в залежності від температури, а  $T_1$  і  $T_2$  - температури двох з'єднань.

Коефіцієнт Зеебека або термоелектрична потужність є дуже важливим параметром для термоелектричних матеріалів, що визначає продуктивність елементів Пельтьє. Для хорошого термоелектричного матеріалу коефіцієнт Зеебека повинен бути високим, щоб легше отримати потрібну напругу, електропровідність повинна бути високою, а теплопровідність повинна бути невеликою, щоб зменшити теплові втрати в місцях з'єднання термопари [2].

Ефект Пельтьє полягає в тому, що при проходженні постійного струму через замкнений електричний ланцюг, який складається з двох різних провідників, на одному з їхніх з'єднань тепло поглинається (відбувається охолодження), а на іншому - виділяється (відбувається нагрівання). Для підтримання постійно низької температури холодного з'єднання і його функціонування як джерела охолодження, необхідно безперервно пропускати струм і охолоджувати тепле з'єднання. При зміні напрямку струму гаряче і холодне з'єднання міняються місцями.

Кількість тепла, яка поглинається або виділяється за певний проміжок часу  $Q$ , залежить від струму  $I$  в ланцюзі та коефіцієнта Пельтьє  $P$ , який визначається фізичними властивостями матеріалів, що використовуються:

$$Q = P \cdot I \quad \#(1.3)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		10

Основну функцію охолоджувального пристрою виконує батарея термоелементів, що складається з напівпровідників з максимально високими термоелектричними властивостями.

Елемент Пельтьє – це термоелектричний модуль, який використовує ефект Пельтьє для створення різниці температур. При проходженні електричного струму через нього одна сторона охолоджується, а інша нагрівається.

Внутрішня структура елемента Пельтьє складається з напівпровідникових гранул, виготовлених з матеріалів телуриду вісмуту N-типу та P-типу. Масив гранул електрично з'єднаний послідовно, але термічно розташований паралельно для максимального теплообміну між гарячою та холодною керамічними поверхнями модуля (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Конструкція елемента Пельтьє

Застосування постійної напруги змушує позитивні та негативні носії заряду поглинати тепло з однієї поверхні підкладки, передавати та віддавати його на

підкладку з протилежного боку. Тому поверхня, на якій поглинається енергія, стає холодною, а протилежна поверхня, де вивільняється енергія, стає гарячою.

## 1.2 Огляд та аналіз термоелектричних холодильних пристроїв

Термоелектричні холодильні пристрої - це пристрої, які використовують принцип термоелектричного ефекту для охолодження (рис. 1.2). Вони працюють на основі термоелектричного ефекту Пельтьє. Такі холодильні агрегати використовуються у різних галузях, таких як медичне обладнання, автомобільні холодильники, електроніка та інші сфери, де необхідне точне охолодження в обмеженому просторі.

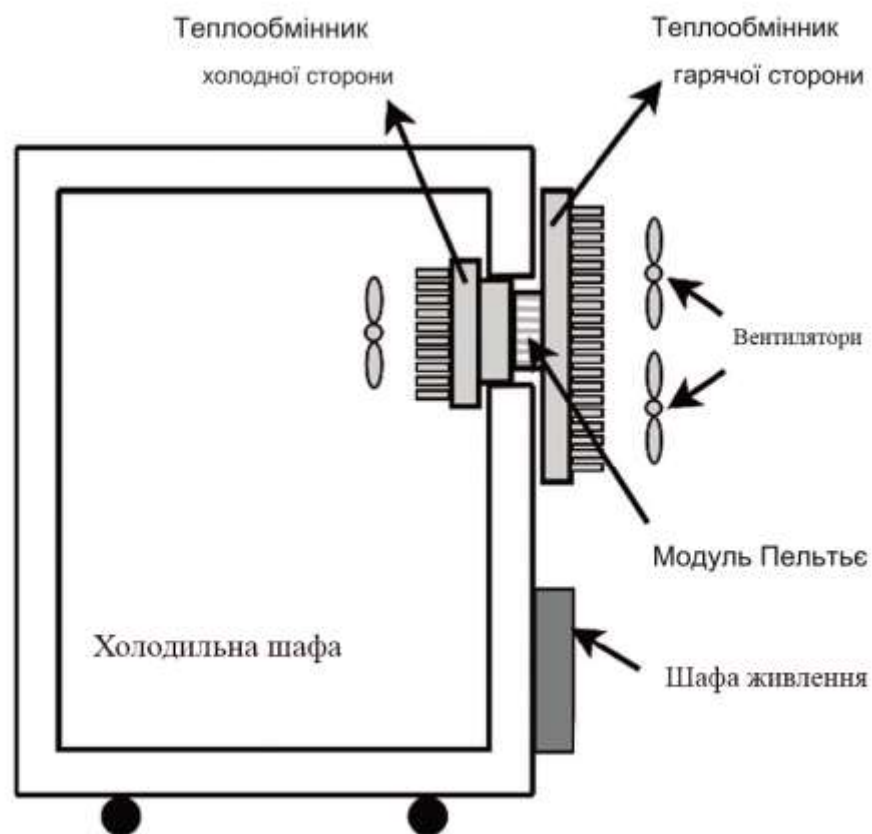


Рисунок 1.2 – Принципова схема термоелектричного холодильника

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

12

Термоелектричні системи охолодження, хоча і відстають від компресорних та абсорбційних моделей за продуктивністю, мають ряд значущих переваг, які роблять їх привабливими для використання в певних ситуаціях. Ці переваги включають:

- нескладність у будові;
- витривалість до вібрації;
- брак механічних частин (окрім вентилятора для охолодження радіатора);
- маленький рівень шуму;
- компактні розміри;
- можливість працювати в будь-якій позиції;
- довгий термін експлуатації.

Ці особливості ідеально підходять для виготовлення автомобільних холодильників (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Автомобільний холодильник

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		13





ни з рівномірною відстанню між ребрами. Тепло від радіатора відводиться за рахунок циркуляції повітря за допомогою вентилятора 5 [3].

Зовнішня поверхня корпусу холодильника виготовлена зі сталі та покрита синтетичною плівкою, внутрішня - з алюмінієвих листів. Проміжок між цими покриттями заповнений теплоізоляційним матеріалом 6.

Дверцята 7 відкриваються вниз і можуть використовуватися як стіл. Вони оснащені автоматичним замком і ущільнюються профільною гумою.

Температура всередині холодильної камери регулюється зміною напруги, яка подається на термоелектричні батареї за допомогою терморегулятора. Встановлення потрібної температури в камері відбувається протягом декількох годин після включення холодильника.

Для зниження температури напоїв у невеликих об'ємах використовується баночний міні-охолоджувач, який призначений для охолодження напоїв у металевих банках об'ємом від 0,35 до 0,5 л та у скляних і пластикових пляшках діаметром до 65 мм (рис. 1.6). У цьому пристрої застосовано передові технології термоелектричного охолодження, що дозволяє швидко охолоджувати напої з низьким енергоспоживанням. Його компактні розміри, легка вага і безшумна робота забезпечують зручне використання.



					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		16

## Рисунок 1.6 – Баночний міні-охолоджувач

Завдяки спеціальним адаптерам та ущільнювальним прокладкам, міні-охолоджувач можна надійно закріпити в підстаканнику або на рівній поверхні. Невеликі габарити дозволяють легко транспортувати пристрій, а низький рівень шуму робить його майже непомітним у використанні.

Пристрій забезпечує ефективне охолодження напоїв навіть в спекотну погоду, що робить його незамінним для любителів прохолодних напоїв у будь-яких умовах. Він здатний охолоджувати напої зі швидкістю до 2 °С за хвилину, а температура охолоджуючої поверхні може досягати -10 °С.

Нещодавно модулі цього типу почали використовувати в системах охолодження процесорів ПК. Однак, враховуючи низьку ефективність термоелементів, практичність таких конструкцій є сумнівною. Наприклад, для охолодження джерела тепла потужністю 100-170 Вт (що відповідає більшості сучасних моделей процесорів), потрібно буде спожити 400-680 Вт, що вимагає встановлення потужного блоку живлення.

Інший нюанс - при незавантаженому процесорі, який виділяє менше теплової енергії, модуль може охолодити його нижче точки роси. В результаті цього, може утворитися конденсат, який з великою ймовірністю може вивести електроніку з ладу.

Тим, хто вирішить самостійно створити таку систему, необхідно провести серію розрахунків для вибору потужності модуля для конкретної моделі процесора.

Враховуючи вищезазначене, використання цих модулів як системи охолодження процесора не є економічно виправданим, крім того, вони можуть спричинити вихід комп'ютерного обладнання з ладу. Ситуація змінюється, коли йдеться про гібридні пристрої, де термоелектричний модуль використовується разом з водяним або повітряним охолодженням (рис. 1.7).

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.7 – Гібридна система охолодження для комп'ютерного процесора

Гібридні системи охолодження дійсно виявилися ефективними, але їх висока вартість обмежує кількість користувачів, які можуть їх використовувати. Це стає великим бар'єром для більш широкого застосування цих систем.

Також існують кондиціонери, які використовують принцип термоелектричного ефекту для охолодження або нагріву повітря (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Термоелектричний кондиціонер

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		18

Так, конструктивно ці пристрої є значно простішими в порівнянні з класичними системами клімат-контролю, але основна проблема полягає в їх низькій продуктивності. Це одне діло - охолодити невеликий об'єм холодильної камери, і цілком інше - охолодити приміщення або салон автомобіля. Кондиціонери, що працюють на термоелектричних модулях, будуть споживати в 3-4 рази більше електроенергії, ніж обладнання, що працює на холодоагенті.

Щодо використання як системи клімат-контролю для автомобілів, потужність стандартного генератора буде недостатньою для роботи такого пристрою. Заміна його на більш продуктивне обладнання призведе до значних витрат палива, що не є економічно виправданим.

Термоелектричний елемент часто використовують як охолоджувач для водних кулерів (див. рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Кулер для води, який використовує термоелектричний елемент Пельтьє

Система складається з таких елементів: модуль для охолодження, контролюючий пристрій, термостат з можливістю регулювання та обігрівач. Цей варіант виконання є більш простим та економічним, ніж схема з компресором, а також він надійніший та легший у використанні.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		19

Проте, існують деякі недоліки:

- температура води не опускається нижче 10-12 ° С;
- процес охолодження займає більше часу, ніж у випадку з компресорним аналогом, тому такий кулер не буде оптимальним для офісу з великою кількістю співробітників;
- пристрій реагує на зміни зовнішньої температури, у теплій кімнаті вода не охолodиться до мінімальної температури;
- не рекомендується встановлювати в пилюватих приміщеннях, оскільки вентилятор може забитися, а модуль охолодження може вийти з ладу.

Термоелектричні холодильні агрегати мають ряд переваг та недоліків порівняно з компресійними системами. Основні переваги термоелектричних агрегатів включають відсутність рухомих частин, що зменшує знос і продовжує термін служби пристрою, а також забезпечує тиху роботу, оскільки відсутні компресори та вентилятори. Вони також є більш екологічно чистими, оскільки не використовують фреон або інші шкідливі охолоджуючі речовини. Крім того, термоелектричні системи мають простішу конструкцію, що полегшує їх виробництво та обслуговування, і дозволяють легко регулювати температуру шляхом зміни електричного струму.

Однак термоелектричні агрегати мають і недоліки. Вони менш ефективні з точки зору енергоспоживання порівняно з компресійними системами, що означає більші енергетичні витрати на одиницю охолодження. Термоелектричні системи менш потужні, що обмежує їх застосування у великих холодильниках або промислових умовах. Вартість термоелектричних модулів може бути вищою, що впливає на загальну ціну пристрою. Також ці системи потребують ефективного відведення тепла, що може вимагати додаткових компонентів, таких як радіатори або вентилятори, і може ускладнити конструкцію. Вони також мають обмежений температурний діапазон, що може бути недостатнім для деяких спеціалізованих застосувань.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		20

### 1.3 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено детальний аналіз термоелектричних явищ та устаткування, що використовується для отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту. Зокрема розглянуто теоретичні передумови, що лежать в основі функціонування термоелектричних холодильників. Було детально проаналізовано термоелектричні ефекти, такі як ефекти Пельтьє та Зеебека, які забезпечують можливість перетворення електричної енергії у різницю температур, що створює умови для охолодження.

Було здійснено огляд термоелектричних холодильних агрегатів. Проведений аналіз показав, що такі агрегати мають значні переваги, серед яких компактність, відсутність рухомих частин, низький рівень шуму та висока надійність. Водночас, було виявлено, що існують певні обмеження, пов'язані з ефективністю термоелектричних матеріалів та необхідністю оптимізації термоелектричних модулів для досягнення кращих показників продуктивності.

Загалом, проведений аналіз свідчить про перспективи у використанні термоелектричних технологій для створення холодильних систем, особливо в умовах, де важливі компактність і надійність. Однак, для ширшого впровадження цих технологій необхідні подальші дослідження та вдосконалення матеріалів і конструкцій термоелектричних модулів.

Використання каскадних модулів дозволяє досягти значного підвищення ефективності охолодження в порівнянні зі звичайними однокаскадними системами. Завдяки використанню кількох ступенів охолодження досягається набагато нижча температура та забезпечується ефективна робота навіть у вкрай вимогливих умовах.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		21

## 2 РОЗРОБКА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА З ПОЛІПШЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

### 2.1 Теоретичні основи розробки термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями

Основні параметри для проектування термоелектричних систем включають продуктивність охолодження та характеристики електроживлення, зокрема ампераж. Визначення необхідної продуктивності охолодження базується на калориметричному аналізі, об'ємі рефрижератора, бажаному ступені зниження температури та умовах експлуатації пристрою.

Процес проектування починається з вибору матеріалів і розмірів елементів, щоб досягти оптимальної продуктивності, конструктивної простоти та економічності. При заданій різниці температур між гарячими та холодними з'єднаннями встановлюється продуктивність одного елемента, а потім кількість елементів для досягнення максимальної ефективності системи. Далі відбувається розробка моделі та розрахунок компонентів електроживлення для забезпечення оптимальної роботи в заданих умовах.

Ефективність та коефіцієнти охолодження термопар залежать від співвідношення перетинів відгалужень, термоелектричної різниці напруг, провідності та теплопередачі напівпровідників. Термоелектричні системи, що використовують термопари, залежать від багатьох факторів, які впливають на їхню продуктивність. Основними параметрами, що визначають ефективність термопар, є:

- відношення площ перерізів віток, яке впливає на розподіл тепла та електричного струму;
- коефіцієнт термоЕРС ( $\alpha$ ), що визначає потенціал генерації електричної енергії від температурної різниці;

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		22

- електропровідність ( $\sigma$ ) та теплопровідність ( $\kappa$ ) напівпровідникових елементів, які визначають, наскільки ефективно матеріал може передавати електричний струм та тепло.

Для оптимізації цих параметрів, інженери прагнуть:

- максимізувати коефіцієнт термоЕРС та електропровідність, регулюючи концентрацію носіїв заряду (n-p типу);
- мінімізувати теплопровідність, вводячи нейтральні домішки, які перешкоджають передачі тепла через розсіювання теплових хвиль.

Вісмутовий телурид, селенід вісмуту та антимонід телуру є популярними матеріалами для термопар через їхні відмінні термоелектричні властивості. Вісмутовий телурид найбільше підходить для автомобільних холодильників, завдяки його оптимальному балансу між термоЕРС та теплопровідністю. Термоелектричні пристрої потребують стабільного джерела постійного струму для ефектвної роботи. Важливість коефіцієнта пульсації полягає в тому, що змінна складова струму може викликати додаткове тепловиділення через Джоулеве тепло, що знижує ефективність охолодження. Двопівперіодний випрямляч з нульовим виходом на вторинній обмотці трансформатора є оптимальним для живлення термоелементів, зазвичай використовуючи кремнієві або германієві діоди.

Енергоспоживання є критичним показником для побутових приладів. Незважаючи на численні переваги, такі як відсутність рухомих частин та низький рівень шуму, термоелектричні холодильники мають обмежене застосування через їхню порівняно низьку енергоефективність.

Форма та розміри термопари залежать від вибраного матеріалу, конструкції охолоджувальної поверхні та умов теплообміну. Оптимальне співвідношення перетинів гілок термоелемента зазвичай відрізняється від одиниці, що дозволяє досягти бажаної площі охолодження.

Розподіл термоелементів на поверхні охолодження має бути таким, щоб забезпечити оптимальний теплообмін між холодними та гарячими спаями. Це

може бути досягнуто за допомогою зовнішнього радіатора, який зменшує температурну різницю між спаями.

Щільність розсіювання термопар визначається співвідношенням загальної площі всіх секцій до площі теплообміну. Зменшення щільності пакування дозволяє знизити використання напівпровідникового матеріалу та підвищити ефективність системи. Конструкція термоелемента з висотою 2 мм дозволяє підвищити ККД без ускладнення конструкції холодильника (рис. 2.1). Для малих холодильників (5-7 л) оптимальна щільність пакування становить від 0,15 до 0,17.

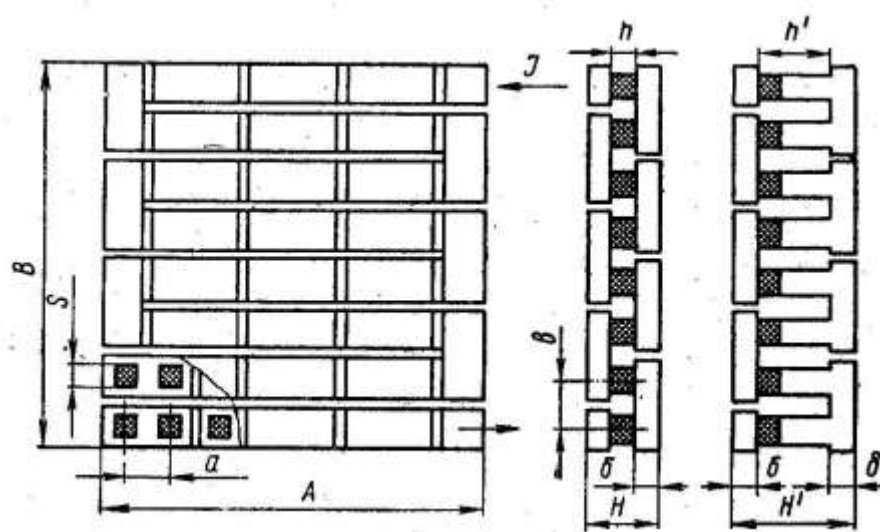


Рисунок 2.1 – Конструкція термобатарей елемент Пельтьє

Максимальне спрощення конструкції холодильника досягається без використання додаткової циркуляції повітря на гарячому спаю, що може відрізнитися для більших моделей. Термопари з'єднуються м'якою пайкою зі змінною пластиною, а гілки попередньо залужуються спеціальним припоєм з низькою температурою плавлення.

Для термобатарей, що працюють при великих температурних перепадах, встановлюється свинцевий демпфер, а поточна пластина виконана так, щоб не

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

перешкоджати термічній деформації, використовуючи гнучкі перемикаючі пластини або пластини з проміжками для зменшення температурних навантажень.

Зазвичай, для захисту комутуючих пластин термобатарей від теплових перехідних процесів використовують електричну ізоляцію. Це досягається за допомогою нанесення на зовнішню поверхню анода плівки, яка має електроізоляційні властивості. Для забезпечення оптимальної теплопередачі, ці поверхні обробляють спеціальним термокомпандом. Зазвичай, в якості ізоляційного середовища між тепловими елементами батареї використовують повітря, яке заповнює проміжки. Проте, можливе застосування штучної пластикової ізоляції, яка також потребує електроізоляції.

Один із способів підвищити ефективність термоелектричного охолодження - знизити температуру гарячого спаю за рахунок більш ефективного розсіювання тепла. Цього можна досягти, під'єднавши холодний спай іншої термоелектричної батареї до гарячого спаю [4].

Якщо різниця температур між гарячим і холодним спаями зменшується, коефіцієнт охолодження термоелектричного елемента збільшується. Отже, для підвищення ефективності термоелектричного охолодження можна знижувати температуру гарячого спаю шляхом ефективного розсіювання тепла. Також можна знизити температуру холодного спаю, підключивши його до іншого термоелементу.

Це забезпечує оптимальне співвідношення між потужністю охолодження та енергоспоживанням. Для досягнення максимальної ефективності, системи з великою потужністю часто використовують режими, які оптимізують коефіцієнт корисної дії (ККД), тоді як системи малої потужності можуть працювати при вищих струмах, навіть якщо це призводить до збільшення енергоспоживання.

Це призводить до утворення двоступеневої термоелектричної батареї (рис. 2.2). Другий ступінь батареї може бути використаний для підвищення ефективності першого ступеня термоелемента або для зниження температури холодного спаю, що збільшує ефективність охолодження першого ступеня. Крім того, мо-

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		25

жуть бути використані триступеневі або багатоступеневі термоелементи, де кожен наступний ступінь охолоджує термічний спай попереднього ступеня.

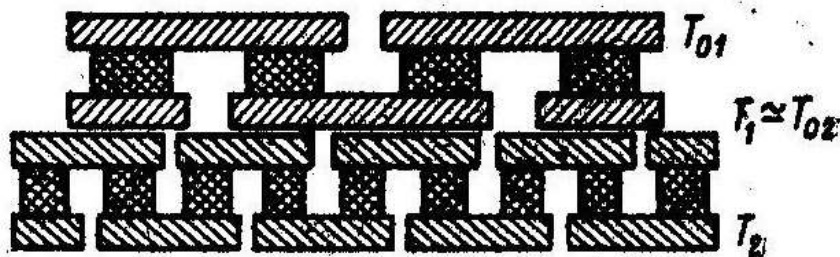


Рисунок 2.2 – Двоступенева термоелектрична батарея

У випадку, коли кожен з етапів термоелектричного акумулятора з трьох ступенів працює на оптимальному струмі ( $I_{opt}$ ) для максимального збереження енергії, орієнтовний коефіцієнт охолодження відображає залежність від температурного градієнту. Це стосується одноступеневих, ступеневих та триступеневих термоелементів при однаковому значенні  $Z$ , як показано на рис. 2.3.

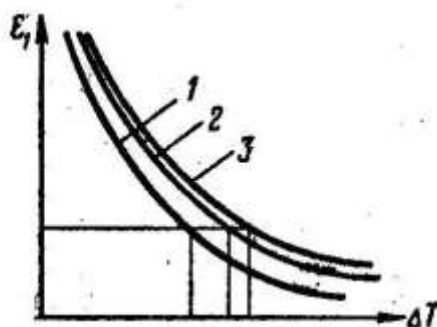


Рисунок 2.3 – Графік, що демонструє залежність холодильного коефіцієнта від різниці температур при: 1 – одноступеневій, 2 – двоступеневій, 3 - триступеневій термобатарей

Давайте розглянемо функціонування термоелемента, який містить дві напівпровідникові вітки з електронною та дірковою провідностями, а також мета-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ліві контактні мостики. Коли постійний струм протікає у вказаному напрямку, нижні мостики нагріваються, а верхні охолоджуються. В такому контексті, верхній місток відомий як холодний зварювальний шов (температура  $T_x$ ), а нижній - як гарячий зварювальний шов (температура  $T_r$ ).

Тепловий потік, який абсорбується (виділяється) на зварювальних швах термоелемента через ефект Пельтьє, визначається за допомогою наступного рівняння:

$$Q_p = \bar{a} \cdot T \cdot I, \#(2.1)$$

де:  $\bar{a}$  - коефіцієнт термоЕРС;

$T$  - температура контакту;

$I$  - величина струму, яка протікає через контакт.

У ідеальних умовах теплота, що виділяється гарячим спаєм, буде перевищувати ту кількість тепла, яку поглине холодний спай, на величину витрат електричної енергії:

$$Q_r = N + Q_0 \#(2.2)$$

Енергія  $N$  витрачається на роботу  $A$ , яка, відповідно до закону Зеєбека, переміщує заряд проти різниці потенціалів, створеної в ланцюзі різницею між температурами  $T_r$  і  $T_x$ .

$$A = Q_r - Q_0 = a \cdot (T_r - T_x) \cdot I \#(2.3)$$

Якщо робочим середовищем є електрогаз і немає незворотних втрат, включаючи теплоту Джоуля і теплопередачу, коефіцієнт ефективності охолодження зворотного циклу термопари дорівнює наступному рівнянню:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{A} = \frac{a \cdot T_{\Gamma} \cdot I}{a \cdot T_{\Gamma} - T_x \cdot I} = \frac{T_{\Gamma}}{T_{\Gamma} - T_x} \#(2.4)$$

Оскільки тепло відбирається при постійній температурі  $T_{\Gamma}$  і віддається гарячому джерелу тепла при постійній температурі  $T_x$ , значення  $\varepsilon$  відповідає коефіцієнту Карно, коефіцієнту охолодження зворотного циклу. На практиці робота термопари пов'язана з двома типами втрат: джоулеві втрати, зумовлені протіканням струму через провідник, і теплопередача від гарячої поверхні до холодної внаслідок теплопровідності провідників, що утворюють контур.

Джоулеві втрати на нагрівання визначаються за наступною формулою:

$$Q_J = I^2 \cdot R, \#(2.5)$$

де  $R$  - опір двох гілок термоелемента.

У розрахунках припускається, що половина джоулевої теплоти передається до гарячого спаю, а друга половина - до холодного спаю.

Тепло, що передається від гарячого спаю до холодного спаю теплопровідністю, визначається рівнянням:

$$Q_T = \frac{\lambda}{\delta} \cdot T_{\Gamma} - T_x \cdot F, \#(2.6)$$

де  $\delta$  - довжина контакту;

$\lambda$  - теплопровідність матеріалу;

$T_{\Gamma}, T_x$  - температури гарячої та холодної поверхонь термопари;

$F$  - поперечний переріз контакту.

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

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



матеріал, до таких властивостей входить: електропровідність  $\sigma$ , теплопровідність  $\lambda$  і коефіцієнт термоЕРС  $\alpha$ , які пов'язані формулою:

$$Z = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda} \quad \#(2.12)$$

Отже, для збільшення ефективності термоелектричних охолоджувачів необхідні матеріали з великим коефіцієнтом добротності  $Z$ . В даний час цей показник для найкращих проб термоелектричних матеріалів становить приблизно  $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , а комплексне значення при кімнатних температурах близько до одиниці.

При створенні термоелектричних модулів, вибір матеріалу є ключовим. Такі модулі зазвичай складаються з набору термопар, розташованих між парою теплопровідних переходів, які часто виготовляються з кераміки. Важливо, щоб матеріал для цих керамічних пластин був ефективним електроізолятором, мав достатню механічну міцність та високу теплопровідність, схожу з міддю (386 Вт/м·К). Розміри цих пластин задають геометричні характеристики всього модуля, оскільки площа блоку термоелементів становить приблизно 40% від загальної площі пластини.

Зазвичай для керамічних переходів використовують матеріал на основі оксиду алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) з теплопровідністю близько 25 Вт/м·К. Хоча оксид берилію має значно вищу теплопровідність - 250 Вт/м·К, його висока вартість і токсичність роблять його менш привабливим. Натомість нітрид алюмінію пропонує чудову теплопровідність - 180 Вт/м·К і стає все більш доступним завдяки масовому виробництву.

Модулі без керамічних переходів є компактними, оскільки елементи розділено лише тонким шаром електроізолятора товщиною приблизно 0.1 мм. У таких модулях потребуються додаткова електроізоляція між мідними контактами і теплообмінником, для чого зазвичай застосовують органічний ізолятор, на-

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		30

приклад, майлар або каптон. Ефективність модуля значною мірою залежить від якості напівпровідникового матеріалу і до меншого ступеня - від теплопровідності ізоляційного матеріалу.

Тепловий опір модульного інтерфейса є критичним для ефективності термобатарей. Найменший опір пропонують паяні інтерфейси. Сучасні виробники часто кріплять кераміку за допомогою “термосмоли”, яка представляє собою суміш порошку оксиду цинку і рідкого скла.

## 2.2 Розрахунок однокаскадних та багатокаскадних елементів Пельтьє

Підбір стандартного термоелектричного модуля для конкретного застосування ґрунтується як мінімум на трьох параметрах.

Це температури гарячої сторони  $T_r$  і холодної  $T_x$  модуля, а також теплове навантаження  $Q_o$ , яке слід зняти з холодної сторони.

Зі сторони, де при подачі постійного струму виникає тепловиділення, розташовуються теплообмінні пристрої. У разі застосування додаткового повітряного охолодження (чи то природного, чи примусового), можливо визначити температуру на цій “гарячій” поверхні, використовуючи наступну формулу:

$$T_r = T_{nc} + R_r \cdot Q_r, \#(2.13)$$

де  $T_{nc}$  означає температуру оточення,  $R_r$  представляє термічний опір на гарячій стороні теплообмінника, а  $Q_r$  вказує на кількість теплової енергії, яка вивільняється у гарячих точках переходу:

$$Q_r = P + Q_o \#(2.14)$$

Тут  $P$  позначає вхідну потужність у ватах. Через наявність термічного опору теплообмінника, температура на гарячій стороні перевищує температуру

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		31

оточення на деяку величину [5]. Якщо значення термічного опору невідоме, його можна апроксимувати для різних умов відведення тепла:

- для природної конвекції – між 20 та 40 °С;
- для примусової конвекції – між 10 та 15 °С;
- при використанні рідинного охолодження – між 2 та 5 °С (вище за температуру самого теплоносія).

Теплообмінник виступає як вирішальний елемент у такому пристрої. Недостатня площа поверхні теплообміну може призвести до неможливості досягнення потрібного рівня охолодження [5].

Холодна сторона термоелектричного модуля - це місце, де поглинається тепло під час проходження постійного струму через термопару. Температура холодної сторони  $T_x$  має бути нижчою за температуру охолоджуваного предмета  $T_{оп}$ , особливо коли останній не знаходиться у безпосередньому контакті з нею:

$$T_x = T_{оп} + R_x \cdot Q_0 \#(2.15)$$

Визначення теплового навантаження, яке має бути видалене з холодної сторони модуля для пониження температури охолоджуваного елемента на задану величину, є досить складним завданням, оскільки потрібно врахувати всі можливі джерела теплових навантажень. Серед цих навантажень варто виділити:

– тепло, яке потрібно вивести з охолоджуваного об'єкта для зниження його температури на задане значення:

$$Q = i \cdot G, \#(2.16)$$

де  $i$  позначає ентальпію охолоджуваного матеріалу, а  $G$  - його масовий потік у кілограмах за секунду;

- тепловий потік з гарячої сторони модуля, що передається через теплопровідність;

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		32

– тепло, яке генерується у провідниках внаслідок проходження через них електричного струму (прийнято вважати, що половина джоулевого тепла  $I^2 \cdot R$  спрямовується до холодної сторони, а інша половина - до гарячої);

– надходження тепла через шар теплоізоляції:

$$Q_{\text{прит}} = \lambda \cdot \Delta T \cdot \frac{S}{\delta} \quad \#(2.17)$$

У контексті теплоізоляції, коефіцієнт  $\lambda$  визначає здатність матеріалу проводити тепло, вимірюється у Ватах на метр на градус Кельвіна (Вт/м·К). Товщина ізоляційного шару, позначена як  $\delta$ , вимірюється в метрах і є критичним параметром для забезпечення ефективної ізоляції. Різниця температур  $\Delta T$  через шар вказує на температурний градієнт, що існує у системі, і вимірюється в Кельвінах [6].

Площа поверхні, що ізолюється, обозначена як  $S$ , в метрах квадратних, визначає розмір області, через яку може відбуватися теплова передача. Останній термін у рівнянні стосується “холодних” витрат, пов’язаних з охолодженням конструкційних матеріалів, таких як теплообмінники та підводящі трубопроводи.

### 2.3 Розрахунок термоелектричного елемента в режимі холодопродуктивності та максимального холодильного коефіцієнта

Термоелектричний охолоджувач може функціонувати в декількох режимах, серед яких найважливішими є режими з максимальним коефіцієнтом охолодження  $\varepsilon_{\text{max}}$  та максимальною холодопродуктивністю  $Q_{\text{max}}$ .

У ситуації з максимальною холодопродуктивністю коефіцієнт охолодження можна визначити за наступною формулою:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		33

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{T_r} \left( T_x - \frac{2T_r - T_x}{ZT_x} \right) \#(2.18)$$

Режим, близький до умови максимального коефіцієнта охолодження  $\varepsilon_{max}$ , в основному використовується для обладнання великої потужності. Режими, близькі до максимальної потужності охолодження, використовуються для систем малої потужності, де енергозбереження не є суттєвим фактором. У практичному використанні термоелектричні холодильні агрегати зазвичай працюють на 25 - 80% від  $I_{max}$  [6].

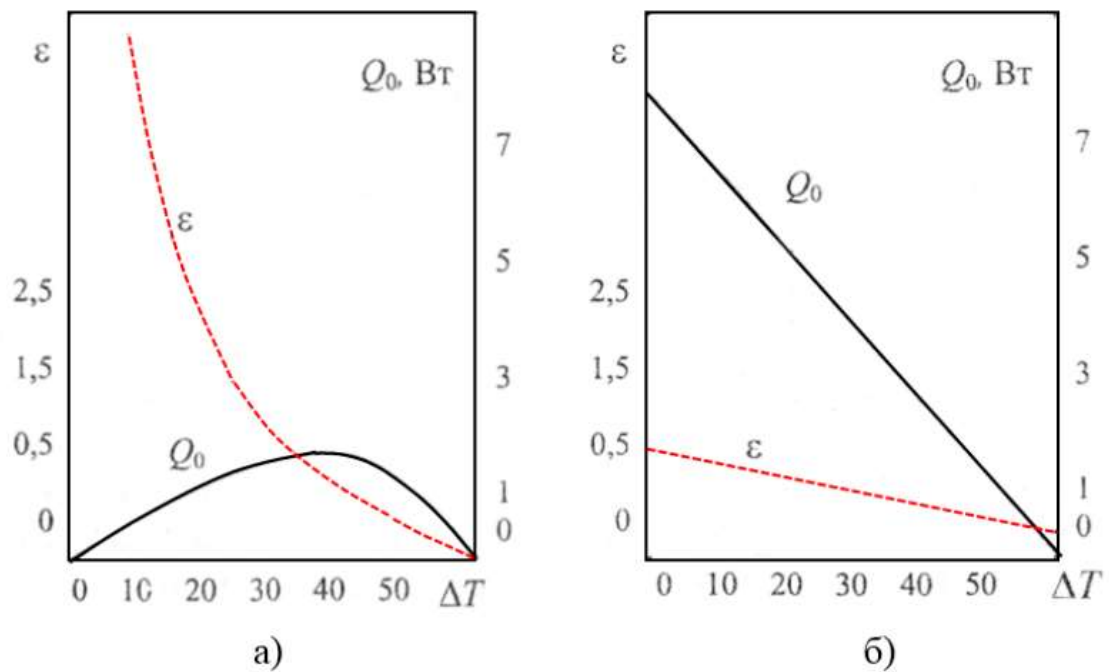
Це забезпечує оптимальне співвідношення між потужністю охолодження та енергоспоживанням. Для досягнення максимальної ефективності, системи з великою потужністю часто використовують режими, які оптимізують коефіцієнт корисної дії (ККД), тоді як системи малої потужності можуть працювати при вищих струмах, навіть якщо це призводить до збільшення енергоспоживання. Важливо враховувати, що ефективність термоелектричного охолодження також залежить від температурної різниці між гарячою та холодною сторонами модуля, а також від якості матеріалу, з якого виготовлено термоелектричний елемент. Вибір матеріалу повинен базуватися на його термоелектричних характеристиках, таких як коефіцієнт Зеєбека, електричний опір та теплопровідність [6].

Коефіцієнт Зеєбека визначає ефективність перетворення теплової енергії в електричну енергію в термоелектричних матеріалах.. Чим вищий коефіцієнт Зеєбека, тим краще матеріал виконує функцію перетворення теплової енергії. Електричний опір матеріалу також важливий. Матеріали з низьким електричним опором дозволяють ефективніше передавати згенерований електричний струм.

Теплопровідність матеріалу впливає на розподіл тепла між гарячою та холодною сторонами термоелектричного елемента. Матеріали з високою теплопровідністю допомагають ефективно виводити тепло, забезпечуючи оптимальну роботу системи охолодження.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		34

Для термоелектричних охолоджувачів легко змінити режим роботи з  $\epsilon_{\max}$  на  $Q_{\max}$  або виконувати роботу в якомусь проміжному режимі, змінюючи напругу на термопарі (струм через термопару). Тому система термопарного регулювання холодильної установки має просте і надійне пристрій.  $Q_{\max}$  відповідає найбільшому можливому робочому струмові термопарі. Характеристика режиму  $\epsilon_{\max}$  полягає в тому, що робочий струм змінюється з різницею температур переходу. На рисунку 2.4 показано типове графічне співвідношення коефіцієнта охолодження та охолоджувальної здатності до різниці температур термопарі при максимальному охолоджувальному коефіцієнті та максимальній охолоджувальній здатності.



- а) Режим з найвищим коефіцієнтом охолодження;
- б) Режим з найбільшою продуктивністю охолодження.

Рисунок 2.4 - Відношення між коефіцієнтом охолодження та продуктивністю охолодження в залежності від температурної різниці на з'єднаннях термоелемента.

Діаграма на рисунку 2.5 описує залежність між потужністю теплового насоса на осі y та струмом на осі x для різних значень різниці температур між гарячою та холодною стороною ( $dT = T_r - T_x$ ) у разі охолодження.

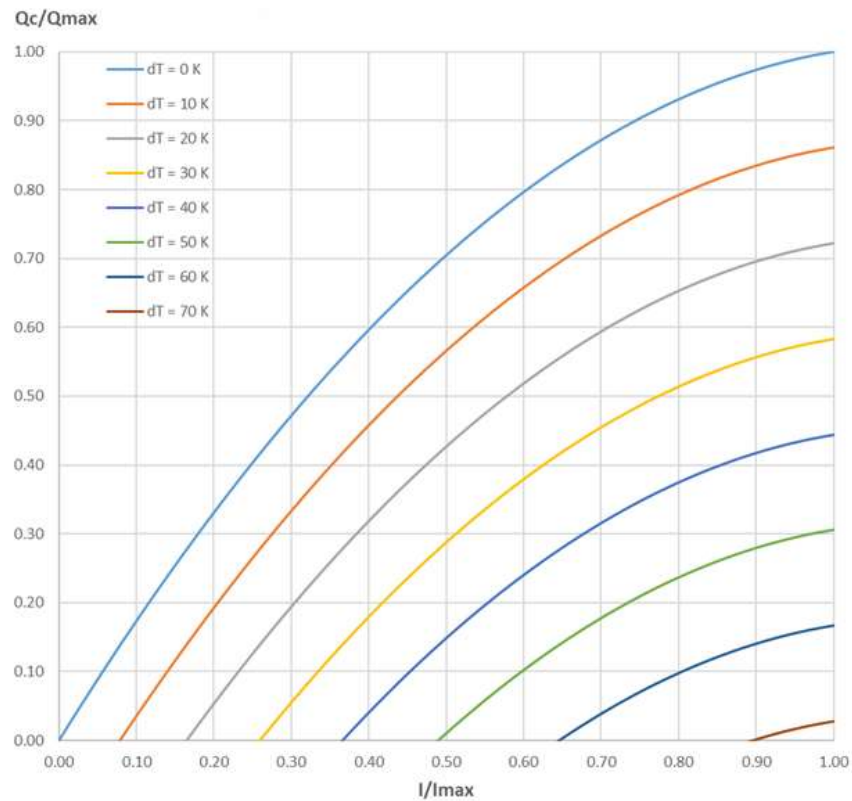


Рисунок 2.5 - Залежність між потужністю та струмом на осі x для різних значень різниці температур між гарячою та холодною стороною [7]

Лише при відносно невеликій різниці температур  $dT$  може передаватися значна кількість тепла. Багатоступеневі елементи Пельтьє використовуються, коли необхідні більші перепади температур.

Нагнітане тепло  $Q_x$  і різниця температур  $dT$  обернено пропорційні один одному, оскільки тепло подається на холодну сторону, різниця температур пригнічується.

Зазвичай пропускний струм для елемента Пельтьє має становити від 0 до 0,7 разів  $I_{max}$ .

На наступній діаграмі (рис. 2.6) показано залежність продуктивності (COP) від коефіцієнта струму  $I/I_{max}$ , значення на цій діаграмі відносні та нормалізовані.

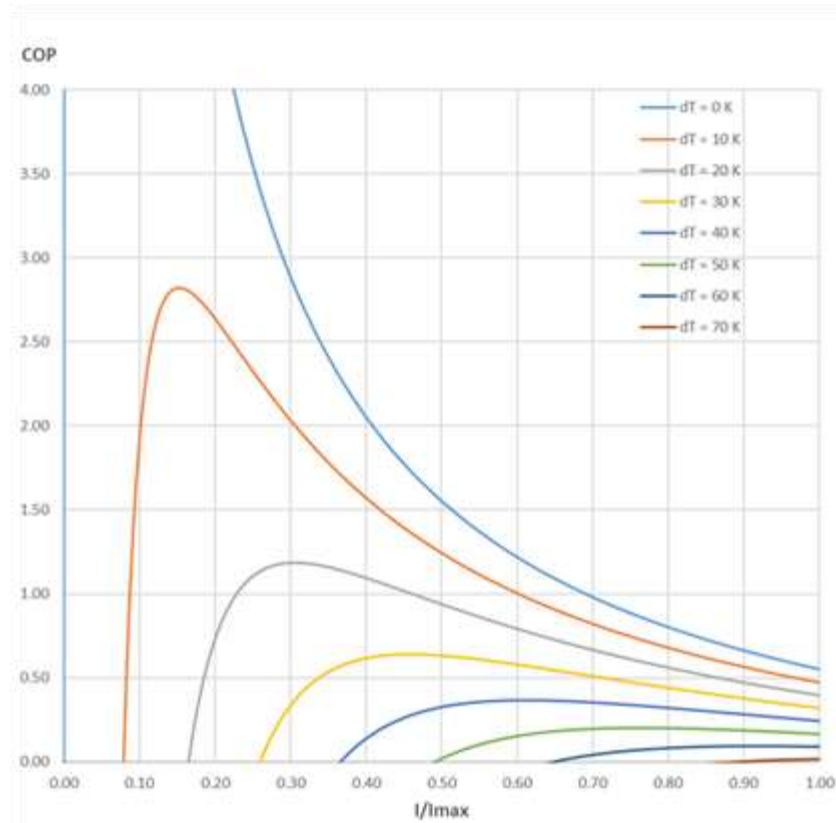


Рисунок 2.6 - Залежність продуктивності від коефіцієнта струму [7]

З лівого боку ми бачимо, що продуктивність максимальна при найменшій різниці температур. Таким чином, ми отримуємо велику кількість тепла, що перекачується на одиницю електроенергії. Як ми бачимо, залежно від  $dT$  відповідний максимум COP знаходиться на різних рівнях струму - при вищому  $dT$  він зміщується вправо. Якщо ми прослідкуємо за кривою праворуч, ми виявимо, що ми повинні вкласти багато електроенергії в систему, щоб отримати лише невелику кількість тепла, що відповідає низькому значенню COP. Ми також можемо

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



стороні  $Q_h$  може бути настільки великою, тому що теплота від ефекту Пельтьє  $Q_p$  і теплота опору втрат  $Q_{RB}$  повинні бути розсіяні.  $Q_r = Q_p + Q_{RB}$  застосовується [5].

На наступній діаграмі (рис. 2.8) показано співвідношення між  $Q_r$  і  $Q_c$  для різних  $dT$  у разі охолодження. Співвідношення  $Q_r/Q_c$  є фактором того, скільки більше тепла має бути розсіяно на гарячій стороні, ніж на холодній стороні.

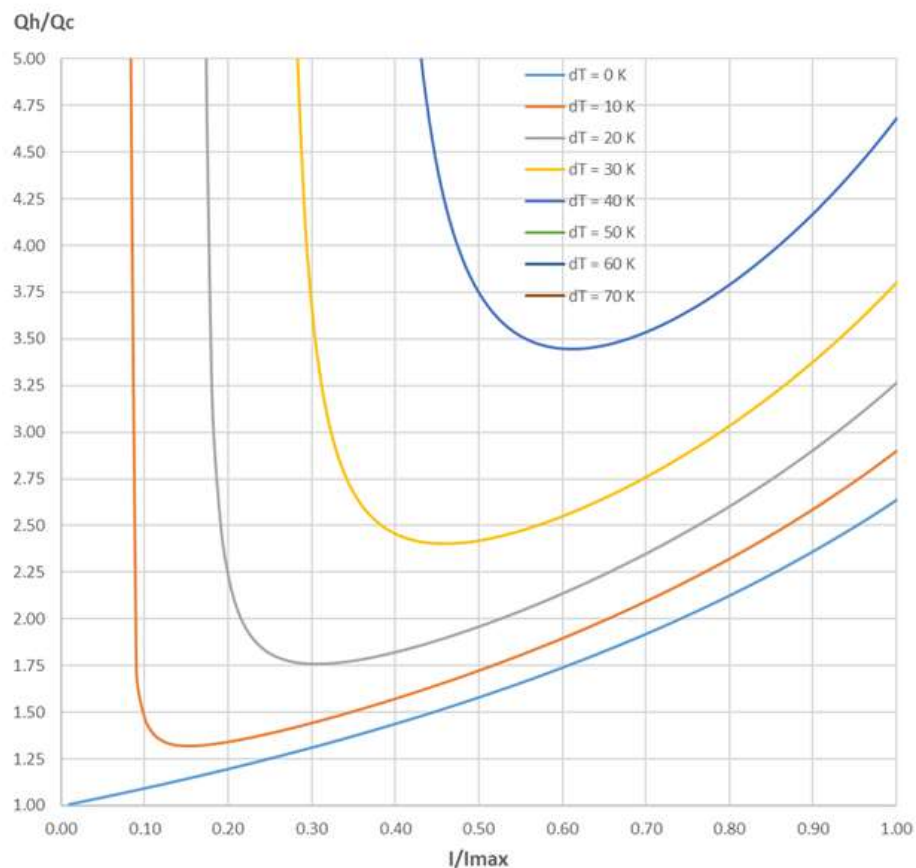


Рисунок 2.8 - Залежність відведеної теплоти від  $dT$  [7]

Це означає, що для великого  $dT$  велика кількість тепла розсіюється радіатором для порівняно низької кількості тепла, що поглинається на холодній стороні елемента Пельтьє.

При охолодженні 1 Вт на холодній стороні  $Q_c = 1$  Вт, це призводить до тепла 1,75 Вт на гарячій стороні  $Q_r = 1,75$  Вт, якщо  $dt = 20$ . При  $dT = 40$  це приблизно 3,5 Вт на гарячій стороні  $Q_r = 3,5$  Вт.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Діаграма на рисунку 2.9 описує залежність між напругою на осі y та струмом на осі x для різних значень різниці температур між гарячою та холодною стороною ( $dT = T_r - T_x$ ) у разі охолодження.

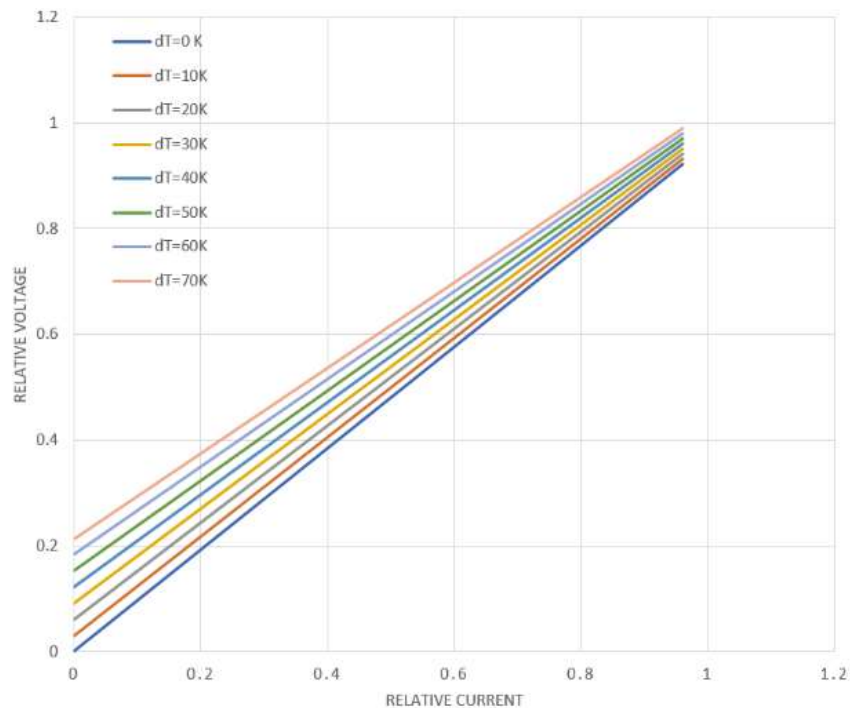


Рисунок 2.9 - Залежність між напругою на осі y та струмом на осі x для різних значень різниці температур між гарячою та холодною стороною [7]

Як показано на рисунку, крива є лінійною, поведінка елемента Пельтьє така ж, як і резистора з джерелом напруги. Нахил кривої зменшується зі збільшенням  $dT$ , зміщення по осі ординат пов'язане з ефектом Зеебека.

При проведенні досліджень було визначено такі параметри трьох-каскадного елемента Пельтьє (рис. 2.10):

- максимальна температура гарячої сторони ( $T_{r.max}$ ) – 50 °C

- максимальна температура холодної сторони ( $T_{x,max}$ ) –  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- максимальна сила струму  $I_{max}$  при максимальній різниці температур  $dT_{max}$  –  $5,4\text{ A}$
- максимальна напруга  $V_{max}$  при максимальній різниці температур  $dT_{max} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $Q_{max}$ ) –  $11\text{ В}$
- максимальна холодопродуктивність ( $Q_{max}$ ) при максимальній різниці температур  $dT_{max}$  –  $75,4\text{ Вт}$
- максимальна різниця температур  $dT_{max}$  при максимальній холодопродуктивності  $Q_{max}$ ) –  $73,1\text{ C}$
- опір термопари,  $R$  –  $170,3\text{ Ом}$
- температура розплавлення –  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

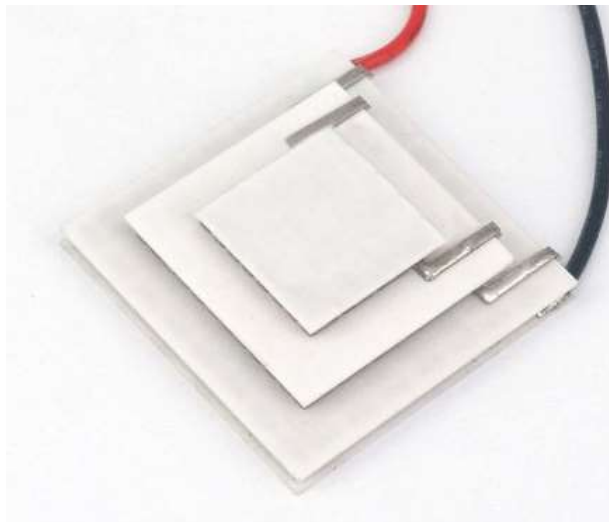


Рисунок 2.10 – трьохкаскадний елемент Пельтьє

Результати вимірювань свідчать про те, що трьохкаскадний елемент Пельтьє має вищу продуктивність на відміну від однокаскадних, що робить його придатним для широкого спектру застосувань в системах охолодження.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		41

## 2.4 Висновки до розділу

Розглянуто теоретичні передумови та проведено розрахунки для розробки термоелектричного холодильника використовуючи каскадний елемент Пельтьє. Визначено, що використання каскадних модулів дозволяє значно підвищити ефективність системи за рахунок оптимізації теплових потоків та підвищення холодопродуктивності.

За допомогою розробленої методики та наявних даних для запропонованого термоелектричного модуля було проведено дослідження та визначено режими його роботи, що забезпечують максимальну холодопродуктивність і найвищий коефіцієнт корисної дії. Побудовано графіки залежностей роботи пристрою в умовах максимальної холодопродуктивності та найвищого холодильного коефіцієнта. Визначено робочі криві залежності  $\Delta T$  від холодопродуктивності  $Q_0$  при різних значеннях сили струму, а також залежності  $\Delta T$  від напруги  $U$  за різних значень сили струму  $I$ .

Розрахунки однокаскадних та багатокаскадних модулів Пельтьє показали, що при правильному виборі матеріалів та оптимізації параметрів, можливо досягти максимального холодильного коефіцієнта, що робить технологію конкурентоспроможною порівняно з традиційними методами охолодження. Таким чином, термоелектричні холодильники на основі каскадного елемента Пельтьє є перспективним напрямком у сфері сучасних холодильних технологій.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		42

## 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА З ПОЛІПШЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

### 3.1 Розробка структурної схеми термоелектричного холодильника

На рисунку 3.1 зображена структурна схема термоелектричного холодильника, яка включає всі необхідні елементи для ефективної роботи холодильника та простоти конструкції і обслуговування.

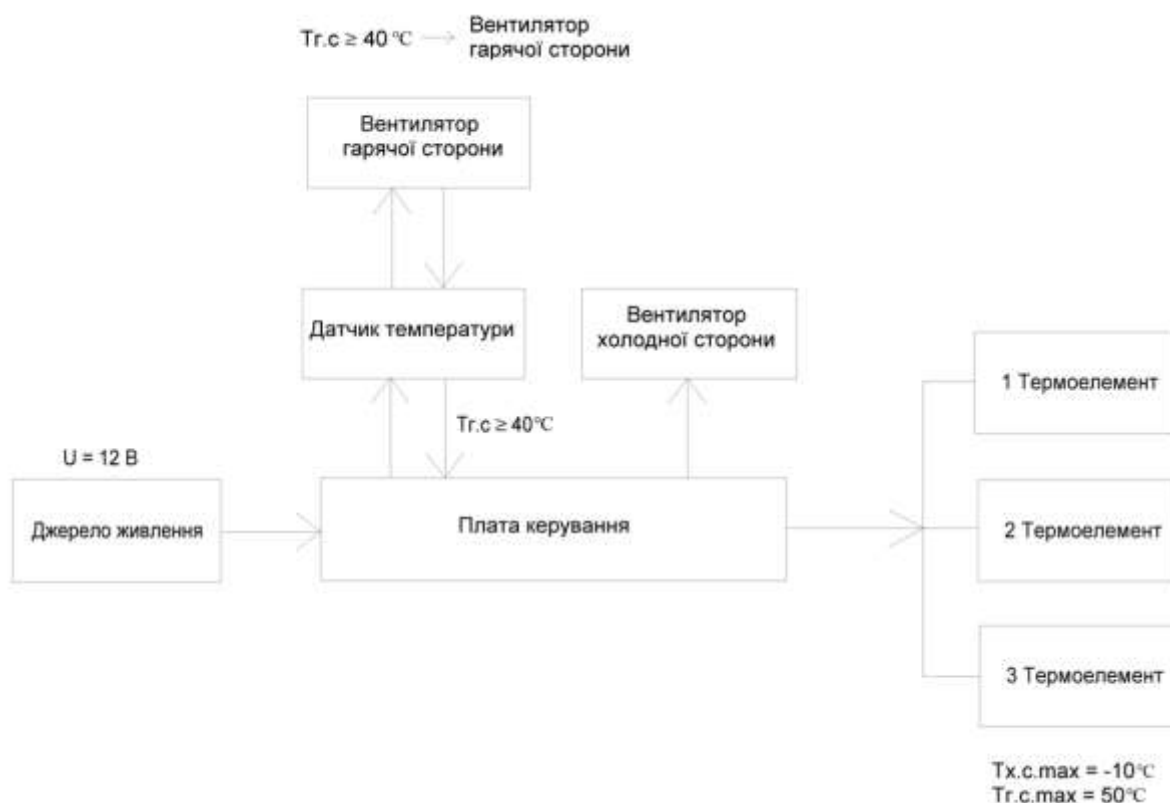


Рисунок 3.1 – Структурна схема термоелектричного холодильника

Схема включає в себе декілька основних компонентів, кожен з яких виконує свою важливу функцію для забезпечення охолодження. Нижче наведено детальний опис кожного компонента та їх взаємозв'язок у загальній структурній схемі термоелектричного холодильника.

Джерело живлення постійного струму (рис. 3.2) має напругу 12 В і струм 10 А та забезпечує електричною енергією всі компоненти термоелектричного холодильника. Основне завдання джерела живлення - стабільно подавати необхідну напругу та струм на термоелемент і інші компоненти системи.



Рисунок 3.2 – Джерело живлення постійного струму

Плата керування відіграє ключову роль у функціонуванні термоелектричного холодильника. Вона приймає сигнали від датчика температури та регулює роботу термоелемента та вентиляторів. Плата керування контролює напругу та струм, що подаються на термоелемент, а також швидкість обертання вентиляторів, щоб досягти оптимального рівня охолодження і зберегти енергоефективність.

Датчик температури DS18B20 (рис. 3.3) вимірює температуру в холодильній камері. Отримані дані він передає на плату керування. Плата керування

використовує ці дані для регулювання роботи термоелемента і вентиляторів, забезпечуючи підтримку необхідної температури. Датчик температури зазвичай розміщується в місці, де важливо контролювати температуру з максимальною точністю.



Рисунок 3.3 – Датчик температури DS18B20

Каскадний термоелемент є ключовим компонентом термоелектричного холодильника. Він складається з трьох елементів Пельтьє, через які протікає електричний струм, що викликає тепловий ефект Пельтьє. Одна сторона термоелемента охолоджується, а інша нагрівається. Термоелемент підключений до джерела живлення через плату керування, яка регулює його роботу.

Вентилятор гарячої сторони (рис. 3.4) розміщений на стороні термоелемента, яка нагрівається, він має розміри 90x90 мм і потужність 5 Вт. Його завданням є ефективно відведення тепла від гарячої сторони термоелемента в навколишнє середовище. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу термоелемента і запобігає його перегріванню.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		45



Рисунок 3.4 – Вентилятор гарячої сторони

Вентилятор холодної сторони (рис. 3.5) встановлюється на охолоджуваній стороні термоелемента, його розміри 40x40мм, потужність складає 0,96 Вт . Його основна функція - забезпечити ефективне охолодження простору або об'єкта, для якого використовується термоелектричний холодильник. Цей вентилятор допомагає збільшити ефективність охолодження, створюючи більш інтенсивний потік холодного повітря або іншого охолоджувального середовища.



Рисунок 3.5 – Вентилятор холодної сторони

Щоб досягти такої температури на холодній стороні (-10°C) при відносно невисокій температурі гарячої сторони (50°C), система повинна мати дуже ефективний теплообмін та якісну теплоізоляцію. Це підкреслює важливість правиль-

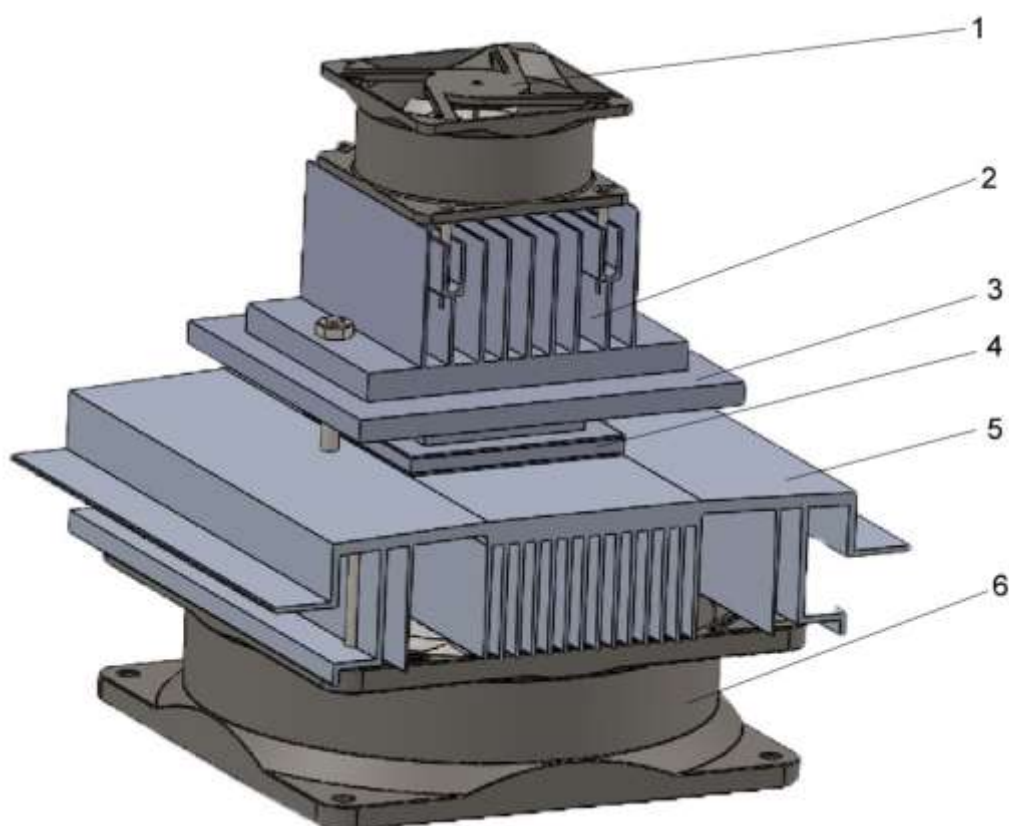
					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		46

ного підбору та розташування вентиляторів, а також використання якісних термоізоляційних матеріалів у конструкції холодильника.

Всі ці компоненти працюють в тісній взаємодії для забезпечення ефективного охолодження. Джерело живлення подає енергію на термоелемент, робота якого регулюється платою керування відповідно до показників датчика температури. Вентилятори допомагають підтримувати оптимальні температурні умови, відводячи тепло від гарячої сторони та забезпечуючи охолодження холодної сторони термоелемента.

### 3.2 Розробка конструкції термоохолоджуючого пристрою з покращеними властивостями

Термоохолоджуючий пристрій з покращеними властивостями охолодження показаний на рис. 3.6.



Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

47

### Рисунок 3.6 – Термоохолоджуючий пристрій термоелектричного холодильника

Конструкція термоохолоджуючого пристрою термоелектричного холодильника складається з шести основних компонентів, які працюють узгоджено для забезпечення ефективного охолодження. Ці компоненти включають каскадний елемент Пельтьє 4, радіатор гарячої сторони 5, радіатор холодної сторони 2, вентилятор гарячої сторони 6, вентилятор холодної сторони 1 та термопрокладку 3.

Каскадний елемент Пельтьє є основним елементом системи охолодження. Він складається з декількох шарів напівпровідникових матеріалів, які створюють температурний градієнт при проходженні електричного струму. Каскадна конструкція дозволяє досягти нижчих температур порівняно з одиночним елементом, що робить її ефективнішою для використання в холодильних системах.

Радіатор гарячої сторони відіграє основну роль у відведенні тепла, що виділяється елементом Пельтьє. Він має розвинену поверхню теплообміну та виготовляється з матеріалів з високою теплопровідністю, таких як алюміній або мідь. Ефективність цього радіатора безпосередньо впливає на загальну продуктивність системи охолодження.

Радіатор холодної сторони призначений для поглинання тепла з охолоджуваного простору. Його конструкція оптимізована для максимального теплообміну з повітрям у холодильній камері. Ефективність цього радіатора визначає, наскільки низьку температуру можна досягти всередині холодильника.

Термопрокладка розташована між елементом Пельтьє та радіатором холодної сторони. Вона відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного теплового контакту між цими компонентами. Термопрокладка заповнює мікроскопічні нерівності на поверхнях, покращуючи теплопередачу та мінімізуючи термічний опір. Це сприяє більш ефективному охолодженню та підвищує загальну продуктивність системи.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		48

Вентилятор гарячої сторони забезпечує примусову конвекцію повітря через радіатор гарячої сторони. Це значно підвищує ефективність відведення тепла і запобігає перегріву системи. Правильний вибір потужності та розміру вентилятора є critical для оптимальної роботи всієї системи.

Вентилятор холодної сторони створює циркуляцію повітря всередині холодильної камери. Це сприяє рівномірному розподілу холоду та запобігає утворенню зон застою теплого повітря. Крім того, він покращує теплообмін між охолоджуваними продуктами та радіатором холодної сторони, підвищуючи загальну ефективність охолодження.

Правильний підбір та оптимізація кожного з цих компонентів є ключовими для досягнення максимальної продуктивності пристрою при мінімальному енергоспоживанні. Взаємодія між цими елементами забезпечує ефективне функціонування термоелектричного холодильника, створюючи надійну та енергоефективну систему охолодження.

### 3.3 Розробка електричної схеми термоелектричного холодильника

Зазвичай, термоелектрична батарея здатна до ефективної роботи, коли її живлення здійснюється виключно за допомогою постійного струму з необхідними характеристиками. Таким чином, для генерації постійного струму з однофазної мережі АС у конструкції термоелектричного охолоджувача було інтегровано спеціалізований випрямляч [8].

У пристроях для випрямлення, що використовуються в домашніх термоелектричних холодильниках, широко застосовуються напівпровідникові вентиля на основі германію та кремнію у формі діодів. Вони вирізняються своєю високою надійністю та тривалим терміном служби, компактними розмірами і легкою вагою, а також є більш економічними порівняно з ламповими (електронними та іонними) вентилями. Випрямляючий коефіцієнт вентилів показує співвідношення між прямим і зворотним струмами[8].

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		49

При виборі конкретної схеми для випрямляча береться до уваги допустимий рівень пульсацій постійного струму. Як правило, якість схеми оцінюється за допомогою коефіцієнта пульсацій, який визначає співвідношення максимальної амплітуди до середнього значення напруги. Для оптимального живлення термоелектричних акумуляторів потребується схема з максимально низьким коефіцієнтом пульсацій. Саме тому у випрямлячах для термоелектричних холодильних систем застосовують двонапівперіодну схему з фільтрами для згладжування. Схематичне зображення двонапівперіодного випрямляча з точкою позначення середини на вторинній обмотці трансформатора і фільтрами для згладжування, можна побачити на рисунку 3.7.

Така двонапівперіодна схема забезпечує більш стабільне і якісне живлення, що є критично важливим для надійності термоелектричних систем. Використання фільтрів на основі дроселя  $L_{\phi}$  і конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$ , що згладжують, дозволяє мінімізувати пульсації напруги, що сприяє підвищенню ефективності роботи термоелектричних батарей. Це, в свою чергу, веде до зниження енергоспоживання та покращення загальної продуктивності холодильного обладнання.

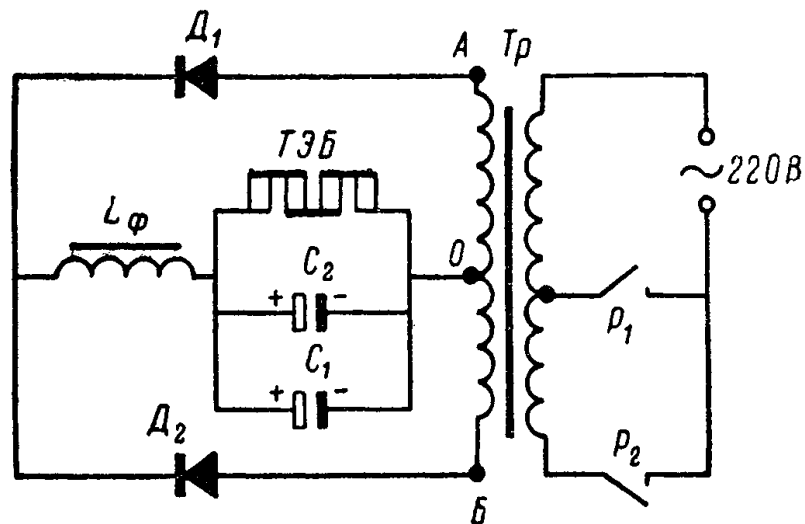


Рисунок 3.7 - Електрична схема термоелектричного холодильника

Два діоди  $D_1$  і  $D_2$  забезпечують прохід струму через термоелектричну батарею протягом кожного півперіоду. Коли вторинна обмотка трансформатора  $T_p$  генерує змінний струм від точки А до точки О, термобатарея отримує випрямлений струм через перший діод  $D_1$ . Другий діод  $D_2$  блокується, оскільки його анод має негативний потенціал по відношенню до катода. За допомогою перемикачів  $p_1$  і  $p_2$  задається необхідний струм .

В іншому півперіоді, коли струм тече від Б до О, термобатарея живиться через другий діод  $D_2$ , а перший діод  $D_1$  перебуває під зворотною напругою. Пульсація напруги все ще залишається значною і становить близько 0,7 В. Для зменшення пульсацій використовують комбіновані фільтри, які складаються з індуктивних (дроселя  $L_\phi$ ) і ємнісних елементів (конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$ ).

У наведеному фільтрі індуктивний компонент (дросель  $L_\phi$ ) модифікує форму і тривалість імпульсів струму для згладжування кривої, тоді як ємнісний компонент (конденсатор  $C_1$  і  $C_2$ ) розряджається на термобатарею між піками амплітуди пульсуючого струму.

Трансформатор у схемах випрямлення розраховують таким чином, щоб забезпечити оптимальну напругу для термоелектричної батареї.

При цьому спершу визначають режим роботи батареї (безперервний чи циклічний). Оскільки час досягнення стаціонарного температурного режиму для термоелектричних холодильників є значним (1-5 годин), можливий вибір режиму часткової циклічності для економії електроенергії, подібно до абсорбційних холодильників. У такому разі первинна обмотка трансформатора поділяється на два сегменти: один для живлення батареї при оптимальному напрузі для максимальної холодопродуктивності, інший - для максимальної економічності. Автоматичне переключення на режим максимальної холодопродуктивності включається при підвищенні температури у холодильнику вище заданого терморегулятором рівня. Перехід на режим максимальної економічності відбувається коли камера досягає необхідної температури охолодження [9].

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		51

Для домашніх стаціонарних умов можна використовувати спрощені ви-  
прямлячі з однонапівперіодною схемою для живлення невеликих термоелектри-  
чних холодильників. Пересувні термоелектричні холодильники, такі як автомо-  
більні, ефективно працюють від батарей постійного струму з номіналами 6, 12  
або 24 В.

Система терморегулювання термоелектричних холодильників, як і абсор-  
бційних, може бути автоматичною і не автоматичною. В останньому випадку  
необхідна глибина охолодження встановлюється ручним перемикачем потужно-  
сті живлення термобатарей.

При цьому може бути передбачена можливість перемикання холодильника  
з режиму охолодження на режим нагрівання (у зимових умовах) шляхом зміни  
напрямку, що протікає через термобатарею струму [9].

Автоматична система терморегулювання застосовується при циклічній  
роботі холодильника і складається з терморегулятора, що забезпечує вмикання і  
вимикання однієї із секцій первинної обмотки трансформатора. При цьому мо-  
жуть бути використані ті ж терморегулятори сільфонного типу, що застосову-  
ються в компресійних і абсорбційних холодильниках.

Для автоматичного захисту термоелектричних батарей від аварійного пе-  
регріву застосовують біметалічні терморегулятори захисту, що встановлюють  
звичайно на радіаторі гарячих спаїв. При підвищенні температури радіатора до  
визначеного небезпечного рівня контакти захисного реле розмикаються, відк-  
лючаючи холодильник від мережі [10].

Періодичне відтавання сніжного покриву, що утвориться на стінці камери,  
пов'язаною з холодними спаями термобатарей, у термоелектричних холодильни-  
ках здійснюється за допомогою ручного або автоматичного перемикання режи-  
му роботи термобатарей з охолодження на нагрівання. При цьому з успіхом мо-  
жуть бути використані всі командні прилади, що знаходять застосування в ком-  
пресійних і абсорбційних холодильниках.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		52

### 3.4 Розробка системи охолодження термобатарей

Загальна теплова потужність, яку потрібно відвести від гарячої сторони елемента Пельтьє, включає електричну потужність і потужність, що переноситься через елемент.

Загальна теплова потужність на гарячій стороні елемента Пельтьє:

$$Q_h = Q_c + P, \#(3.1)$$

де  $Q_h$  - загальна теплова потужність на гарячій стороні (Вт),  $Q_c$  - потужність, що переноситься через елемент (Вт),  $P$  - споживана електрична потужність (Вт).

Потужність, що переноситься через елемент, можна приблизно визначити як:

$$Q_c = \frac{\Delta T}{R} \#(3.2)$$

Де  $\Delta T$  - різниця температур між гарячою і холодною сторонами елемента Пельтьє ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R$  — термічний опір елемента Пельтьє ( $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ) [11].

Розрахунок теплової потужності.

При проведенні дослідів, було встановлено, що різниця температур між гарячою і холодною сторонами  $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$ , а термічний опір елемента Пельтьє  $R = 0.6^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , тоді:

$$Q_c = \frac{60^{\circ}\text{C}}{0,6^{\circ}\text{C}/\text{Вт}} = 100 \text{ Вт} \#(3.3)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		53

Отже, загальна теплова потужність:

$$Q_h = 100 \text{ Вт} + 60 \text{ Вт} = 160 \text{ Вт} , \#(3.4)$$

Розрахунок термічного опору радіатора.

Термічний опір радіатора визначається як:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta T}{Q_h} , \#(3.5)$$

Різниця температур між радіатором і навколишнім середовищем  $\Delta T$  складає  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , тоді [12]:

$$R_{\text{тр}} = \frac{30 \text{ }^\circ\text{C}}{160 \text{ Вт}} = 0.191 \text{ }^\circ\text{C/Вт} \#(3.6)$$

Розрахунок площі радіатора.

Площа поверхні радіатора визначається за формулою:

$$S_p = \frac{Q_h}{h \cdot \Delta T} , \#(3.7)$$

де  $S_p$  - площа поверхні радіатора ( $\text{м}^2$ ),  $h$  - коефіцієнт тепловіддачі.

Для алюмінієвих радіаторів коефіцієнт тепловіддачі зазвичай становить близько десяти [13].

Підставимо значення:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		54

$$S_p = \frac{160 \text{ Вт}}{10 \text{ Вт} \cdot 30 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.120 \text{ м}^2 \# (3.8)$$

Вибір радіатора.

Для ефективного охолодження термобатарей потужністю 60 Вт, необхідно використовувати радіатор з термічним опором до 0.191 °C/Вт та площею поверхні близько 0.120 м<sup>2</sup>

3.5 Розрахунок теплоізоляції термоелектричного пристрою та підбір оптимальної товщини теплоізоляційного шару

Оцінка утеплення охолоджувача термоелектричного типу зводиться до встановлення оптимальної товщі ізолюючого прошарку, котрий гарантує належний тепловий захист від проникнення зовнішнього тепла. Опір теплопередачі, як відомо, обернено пропорційний загальному коефіцієнту теплопроникності обраної конструкції.

На рис. 3.9 зображена схема обчислення повної вартості теплоізоляції і спожитої електроенергії холодильника

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		55

Структура розрахунку загальної вартості  
теплоізоляції холодильника та спожитої електроенергії

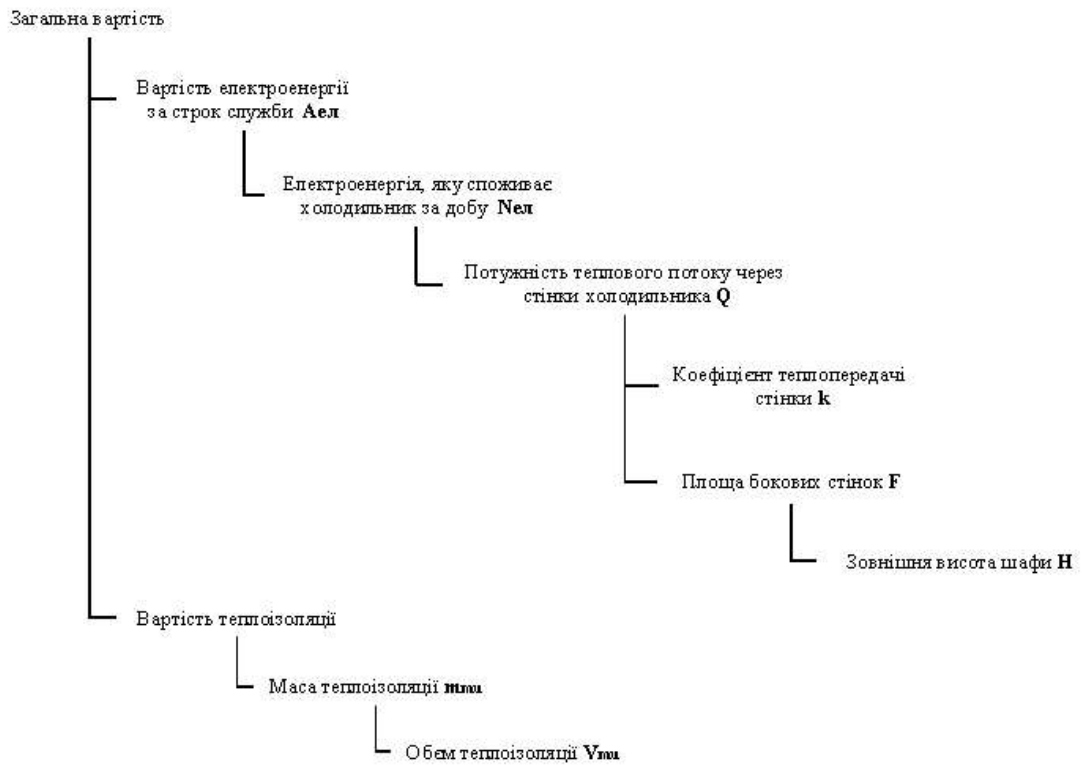


Рисунок 3.8 – Схема обчислення повної вартості теплоізоляції і спожитої електроенергії холодильника

Вартість електроенергії за період служби:

$$A_{EL} = N_{EL} \cdot T_{II} \cdot q_{EL} \#(3.9)$$

де  $N_{EL}$  - електроенергія, що споживається за добу,  $T_{II}$  - період служби (до-ба),  $q_{EL}$  - вартість електроенергії,  $q_{EL} = 0,4$  грн/кВт\*год.

Строк служби за добу:

$$T_C = T_I \cdot 365, \#(3.10)$$

де  $T_G$  - строк служби в роках,  $T_G = 10$  років,  $T_C = 3650$ .

Електроенергія, яка споживається за добу:

$$N_{EL} = \frac{Q \cdot t_c}{\varepsilon \cdot 1000 \cdot 3600}, \#(3.11)$$

де  $Q$  - потужність теплового потоку через стінки, Вт,  $t_c$  - кількість секунд в добі (86400),  $\varepsilon$  - холодильний коефіцієнт холодильника,  $\varepsilon = 0,95$   $N_{EL} = 1,5$  кВт\*год/доба [14].

Потужність теплового потоку через стінки холодильника:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \cdot 1,16, \#(3.12)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі через стінку холодильника,  $F$  - площа бічних стінок холодильника,  $m^2$ ,  $\Delta t$  - перепад температури зовні та в середині холодильника.

Коефіцієнт теплопередачі стінки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \#(3.13)$$

де  $\alpha_1 = 0,3$  і  $\alpha_2 = 0,5$  - коефіцієнти теплопередачі поверхні стінки холодильника,  $\delta$  - товщина теплоізоляції, 10 мм,  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу,  $\lambda = 0,02$ ,  $k = 0,003$  [14].

Площа бічних стінок холодильника:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		57

$$F = (a \cdot H + b \cdot H + a \cdot b) \cdot 2, \#(3.14)$$

де  $a$  - Ширина холодильника  $a = 0,29$  м,  $b$  - Глибина холодильника  $b = 0,250$  м,  $H$  - висота холодильника, м.

Висота шафи:

$$H = \frac{V}{((a - 2 \cdot \delta) \cdot (b - 2 \cdot \delta)) + 2 \cdot \delta} \#(3.15)$$

де  $V$  - внутрішній об'єм шафи,  $V = 0,3$  м<sup>3</sup>. Для розрахунків ми змінювали об'єм камери від 0,3 м<sup>3</sup> до 0,7 м<sup>3</sup> і визначали оптимальні характеристики витрат на ізоляцію. Визначалися конструктивні характеристики термоелектричного холодильника [14].

Вартість шафи знаходиться по формулі:

$$A_{ш} = q_{mi} \cdot m_{mi} \#(3.16)$$

де  $q_{mi}$  - вартість за 1 кг матеріалу теплоізоляції (150 грн за 1 кг),  $m_{mi}$  - маса теплоізоляційного матеріалу.

Маса теплоізоляції, кг:

$$m_{mi} = \rho_{mi} \cdot V_{mi} \#(3.17)$$

де  $\rho_{mi}$  - щільність матеріалу теплоізоляції  $\rho_{mi} = 30$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_{mi}$  - об'єм теплоізоляції [15].

Об'єм теплоізоляції, м<sup>3</sup>:

$$V_{mi} = \delta \cdot F \#(3.18)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		58

В процесі розрахунку теплоізоляції для шафи термоелектричного пристрою було визначено оптимальну товщину теплоізоляційного шару. Підбір оптимальної товщини теплоізоляційного шару дозволяє знизити енергоспоживання термоелектричного пристрою, що позитивно впливає на його економічну ефективність.

Результати оброблені в Microsoft Excel та представлені в додатках.

### 3.6 Висновки до розділу

У даному розділі було проведено детальну розробку конструкції термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями.

Було створено структурну схему термоелектричного холодильника, яка відображає основні компоненти та їх взаємозв'язки. На основі структурної схеми було детально опрацьовано конструкцію термоохолоджуючого пристрою, включаючи вибір матеріалів та компонування елементів.

Розроблена електрична схема термоелектричного холодильника дозволяє ефективно управляти процесом охолодження за допомогою термоелектричних

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		59

модулів. Схема включає в себе всі необхідні компоненти для забезпечення стабільної роботи системи.

Проведено розрахунки охолодження термоелектричного пристрою, що дало можливість оцінити його продуктивність та енергоефективність.

Виконано розрахунки теплоізоляції термоелектричного пристрою та підбір оптимальної товщини теплоізоляційного шару. Це дозволило мінімізувати теплові втрати та підвищити загальну ефективність холодильника.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено термоелектричні явища та їх застосування для отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту, розроблено термоелектричний холодильник з поліпшеними властивостями на базі каскадного елемента Пельтьє та розглянуто конструкцію даного пристрою.

Проведено аналіз термоелектричних явищ та їх використання для отримання холоду. Розглянуто основи термоелектричного ефекту та проведено огляд термоелектричних холодильних агрегатів. Зроблено висновок про можливість і доцільність застосування термоелектричних ефектів у холодильних установках.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		60

Були виконані всі необхідні розрахунки та розроблена структурна та електрична схема термоелектричного холодильника. Підтверджено, що розроблена конструкція є технічно доцільною і може бути використана в промислових і побутових умовах.

Таким чином, розробка термоелектричного холодильника з поліпшеними властивостями підтвердила свою ефективність та доцільність впровадження. Дана технологія має великий потенціал для використання у різних галузях, зокрема в побутовій техніці, автомобільній промисловості. Результати дослідження відкривають нові можливості для подальших наукових розробок та вдосконалення термоелектричних пристроїв.

#### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Термоелектричний ефект [Електронний ресурс]. [https://hmn.wiki/uk/Peltier\\_effect](https://hmn.wiki/uk/Peltier_effect) – Назва з екрана.
2. Thermoelectric Refrigeration Principles [Електронний ресурс] <https://www.intechopen.com/chapters/60039> – Назва з екрана.
3. Термоелектричний ефект Пельтьє [Електронний ресурс] <https://helpiks.org/3-16930.html> – Назва з екрана.
4. Анатичук Л.І. Термоелектричний побутовий холодильник. Патент України № 81979. МПК F25B 21/02. А.С. 200604211. Опубл. 25.02.2008.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		61

5. Mathematical Modeling of Thermoelectric Cooling Modules [Електронний ресурс] <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref11/> – Назва з екрана.

6. A Simple Method to Estimate the Physical Characteristics of a Thermoelectric Cooler [Електронний ресурс] <https://www.electronic-cooling.com/2008/08/a-simple-method-to-estimate-the-physical-characteristics-of-a-thermoelectric-cooler-from-vendor-datasheets/> – Назва з екрана.

7. Peltier Elements [Електронний ресурс] [https://www.meerstetter.ch/custo-ercenter/compendium/70peltierelements?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwg8qzBhAoEiwA-agLrGkJM3Jak4ChxUmgY8ZJIprCeONNDDQPrvHXgsgmw1oRqMAUbmeSOBoCSC4QAvD\\_BwE](https://www.meerstetter.ch/custo-ercenter/compendium/70peltierelements?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwg8qzBhAoEiwA-agLrGkJM3Jak4ChxUmgY8ZJIprCeONNDDQPrvHXgsgmw1oRqMAUbmeSOBoCSC4QAvD_BwE) – Назва з екрана.

8. Анатичук Л. І., Лусте О. Я., Демчук Б. М. Термоелектрична батарея. Патент України № 67369. МПК Н01L 35/00. Опубл. 15.06.2004.

9. Thermoelectric cooling using effect peltier [Електронний ресурс] <https://www.thermoelectricity.eu/thermoelectrics/thermoelectric-cooling-peltier/> – Назва з екрана.

10. Термоелектричні явища. ефекти зеєбека та пельтьє [Електронний ресурс] <https://www.inforum.in.ua/conferences/24/78/575> – Назва з екрана.

11. Термоелектричний охолоджувач Пельтьє Напівпровідникова система охолодження [Електронний ресурс] <https://greenchip.com.ua/18-0-1902-1.html> – Назва з екрана.

12. Heating capacity of a radiator formula and calculator [Електронний ресурс] [https://www.engineersedge.com/calculators/heating\\_capacity\\_of\\_a\\_radiator\\_15679.htm](https://www.engineersedge.com/calculators/heating_capacity_of_a_radiator_15679.htm) – Назва з екрана.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

13. Правильний розрахунок радіатора охолодження [Електронний ресурс]  
<https://radiki.com.ua/uk/blog/al-rad/kak-rasschitat-kolichestvo-sekciy.html> – Назва з екрана.

14. Теплообмін в прикладах і задачах [Електронний ресурс]  
[https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fbteg/cherurnij\\_teplomasoob/7.html](https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fbteg/cherurnij_teplomasoob/7.html) – Назва з екрана.

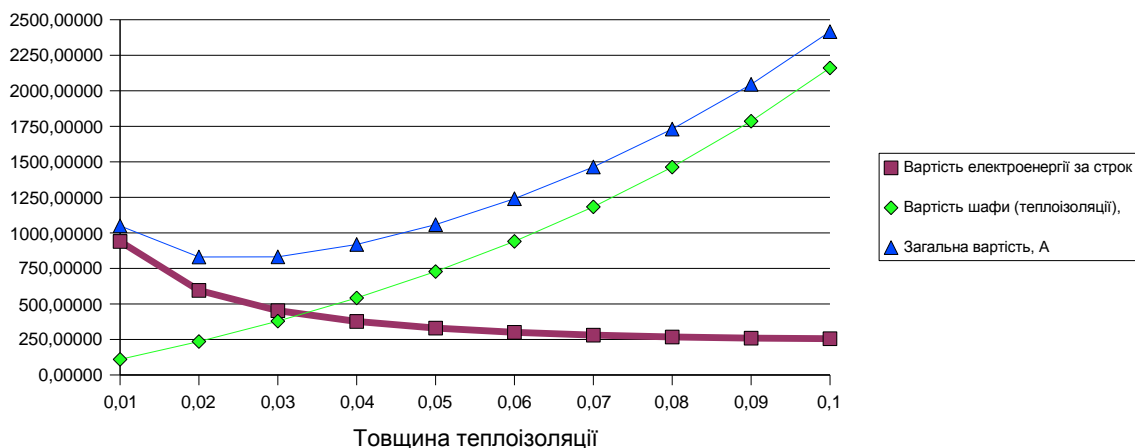
15. Розрахунок товщини теплоізоляції [Електронний ресурс]  
<https://ppu.biz.ua/index.php/nashi-tsiny/k2-categories/sport/itemlist/category/89-rozrakhunok-tovshchynu-uteplivacha> – Назва з екрана.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		63

ДОДАТКИ

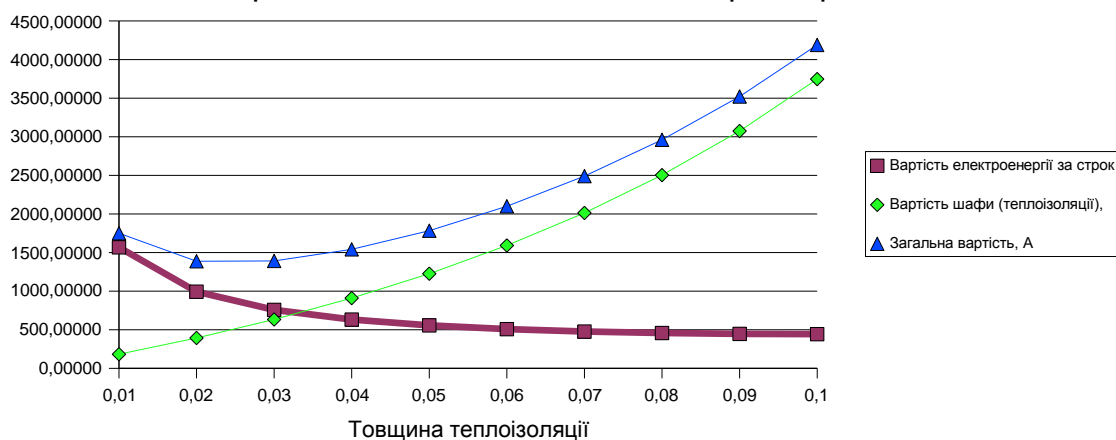
					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



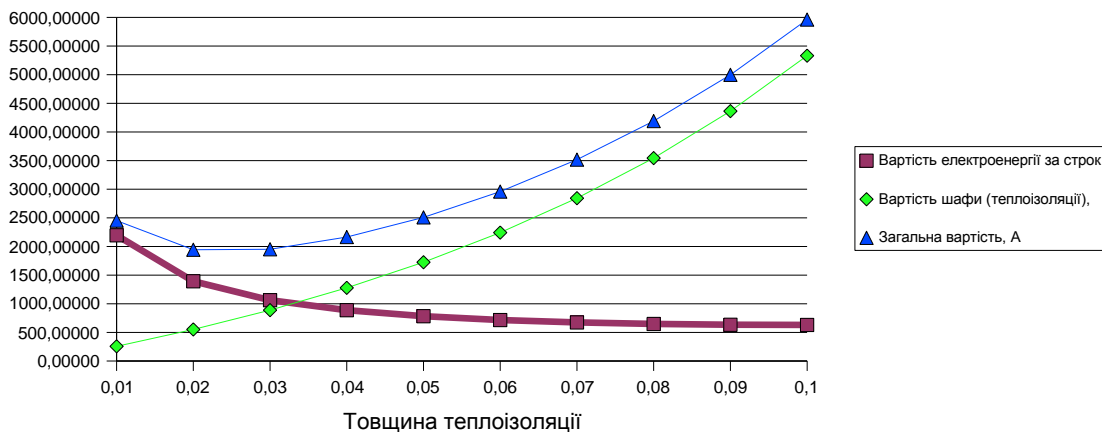
а)

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



б)

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



в)

Графіки залежності вартості експлуатації холодильника від товщини теплоізоляції: а - об'єм холодильника 0,2 куб.м б - 0,4 куб.м; в - 0,6 куб.м

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------