

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
(повна назва)

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Енергоефективна система опалення на основі ефекту Пельтье

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. ІТМРТм-19-1  
Гайдук Д.А.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
освітньої програми Інтелектуальні технології  
мікросистемної радіоелектронної техніки

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Косенко В. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.  
(прізвище, ініціали)

2020 р

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Гайдуку Денису Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Енергоефективна система опалення на основі ефекту Пельтьє

затверджена наказом по університету від 02.11. 2021 р. № 1508 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії .12. 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Схема електрична принципова \_\_\_\_\_

напруга живлення 5 – 10 В;

напрацювання на відмову не менш 15000 год

габарити пристрою не більш 100x150x25 мм;

маса пристрою не більш 0,6 кг;

програма випуску - 200 штук на рік.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Фізико технологічні

основи ефекту Пельтьє

4.2 Розробка випробувального стенду

4.3 Технологічні розрахунки

4.4 Оцінка надійності по раптовим експлуатаційним відмовам

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення об'єкту дослідження	02.09–27.09.2020 р.	виконано
2	Фізико хімічні основи Пельтье	28.09 –25.10.2020 р.	виконано
3	Розробка випробувального стенду	26.10 – 08.11.2020 р.	виконано
4	Технологічні розрахунки	09.11– 22.11.2020 р.	виконано
5	Експериментальне підтвердження	23.11 –29.11.2020 р.	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	30.11 – 06.12.2020 р.	виконано
7	Подання до ЕК	17.12.2020 р.	виконано

Дата видачі завдання 01.09.2020

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Гайдук Д.А  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Косенко В.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 77 с., 29 рис., 10 табл., 1 додатки, 9 джерел за переліком посилань.

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ ЕЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЄ, ЕКОНОМІЧНА СКЛАДОВА

Об'єкт дослідження – елемент Пельтьє.

Предмет дослідження – термоелектричний ефект.

Мета роботи – визначення можливостей елемента Пельтьє.

Методи дослідження – наукова література і експерименти.

Основна ідея роботи полягає в дослідженні можливостей термоелектричного ефекту елементів Пельтьє і доцільність їх використання в якості генератора електроенергії.

На базі проведеного дослідження дослідницьким шляхом було виявлено за яких умов ефект Зеебека виробляє достатню кількість електроенергії для середньо споживчих потреб сучасного споживача, а також економічна доцільність використання елементів Пельтьє в будинках споживачів.

## ABSTRACT

Explanatory note 77 p., 29 fig., 10 tables., 1 applications , 9 sources for the list of links.

### INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF THE THERMOELECTRIC EFFECT OF THE PELTIER ELEMENT, ECONOMIC COMPONENT

The object of research is the Peltier element.

The subject of research is thermoelectric effect.

The purpose of the master's certification work is to determine the capabilities of the Peltier element.

Research methods are scientific literature and experiments.

The main idea of robotics in the advancement of the possibilities of thermoelectric power elements in the Peltya.

On the basis of a pre-meeting held by the preschooler, the power of Zebek has been shown for some minds, there is a sufficient number of electric power for the average-living needs of a day-to-day resident, as well as economical efficiency of the day.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	7
Вступ.....	8
1 Елемент пельтьє як вид альтернативного джерела енергії.....	11
1.1 Фізико технологічні основи механізму ефекту Пельтьє.....	12
1.1.1 Ефект Зеєбека .....	15
1.1.2 Ефект Пельтьє.....	23
1.2 Висновки до розділу .....	29
2 Застосування ефекту Пельтьє .....	30
2.1 Особливості експлуатації модулів Пельтьє.....	33
2.2 Переваги і недоліки.....	24
2.3 Елементи Пельтьє як термогенератор .....	37
2.4 Використання в виробничих приміщеннях .....	38
2.5 Види елементів Пельтьє .....	40
2.6 Сфери використання .....	44
2.7 Висновки до розділу .....	46
3 Розробка випробувального стенду та проведення експериментальних досліджень .....	46
3.1 Конструкція елемента Пельтьє .....	46
3.2 Розробка конструкції дослідного макету.....	49
3.3 Висновки до розділу .....	52
4 Технологічні розрахунки.....	53
4.1 Розробка друкованої плати пристрою.....	53
4.1.1 Аналіз конструкції друкованої плати.....	53
4.1.2 Визначення мінімальних розмірів друкованої плати .....	54
4.2 Розрахунок параметрів рисунку з урахуванням технологічних похибок його отримання.....	54
4.3 Оцінка надійності по раптовим експлуатаційним відмовам .....	59

	7
4.4 Висновки до розділу .....	63
5 Аналіз досліджених даних експериментального навчального стенду.....	64
5.1 Експериментальне підтвердження результатів.....	64
5.2 Висновки до розділу .....	74
Висновки .....	76
Перелік джерел та посилань.....	78
Додаток А Демонстраційний графічний матеріал.....	79

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВНЗ – вищі навчальні заклади;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЕП – елемент Пельтьє

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НВП – науково виробниче підприємство;

НДДКР – Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи.

RS – recommended standard;

## ВСТУП

На сьогодні важливим питанням в сучасній електроніці є питання розробки альтернативних джерел енергії, тому що традиційні джерела енергії наносять шкідливий вплив, не лише на здоров'я людей, а й на навколишнє середовище.

Тому необхідним питанням є винахід нових та вдосконалення вже існуючих джерел альтернативної енергетики. Це життєво важливе питання, бо з кожним роком ситуація по забрудненню навколишнього середовища тільки погіршується. Основним винуватцем є вугільна та нафтопромисловість що все ще виробляє найбільшу частину електроенергії для споживачів. Відмовитись від топливно вугільних електростанцій можливо тільки розвитком відновлювальних джерел електроенергії.

Види альтернативних джерел енергії:

- геліоенергетика;
- енергетика вторинного використання;
- геотермоенергетика;
- космічна енергетика;
- гідроенергетика;
- вітроенергетика;
- біоенергетика;
- змішана енергетика .

Основною метою дипломної роботи є, вивчення та дослідження термоелектричних властивостей елементів Пельтьє. Які планується використовувати як доповнення до вже існуючих джерел відновлювальної енергії.

Ефекти Пельтьє і Зеєбека на даному етапі становлення альтернативної енергетики зацікавили вчених як можливий перспективний метод отримання електрики. Єдиною складністю, що гальмує промислове використання подібних елементів, є їх низький ККД .

Елементи Пельтьє широко використовують з метою охолодження приладів малих габаритів. До основної сфери застосування даного ефекту можна віднести дрібну електроніку, портативні авто-холодильники і кондиціонери. Незаперечною перевагою елементів Пельтьє серед інших є їхня економічність у питаннях споживання електроенергії. Відомо також, що елементи здатні не тільки охолоджувати або нагрівати предмети, поглинаючи енергію, але й функціонувати у зворотному напрямку. Саме вироблення струму за допомогою нагрівання або охолодження найбільше цікавить вчених.

Але мабуть важливішим елементом буде мабуть не сам термоелектричний перетворювач, а сам контролер. Оскільки такі джерела є непередбачувані, тобто може спостерігатися різкі перепади напруги і струмів, тому контролер є необхідним елементом, для нормального застосування, термоелектричного перетворювача без шкідливого впливу на інші прилади. Така конструкція може використовуватися в поході для підзарядки дрібних гаджетів, роботи радіо або горіння лампочки, або відновлення заряду акумулятора.

# 1 ЕЛЕМЕНТ ПЕЛЬТЬЄ ЯК ВИД АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

## 1.1 Фізико технологічні основи механізму ефекту Пельтьє

Оскільки робота елемента Пельтьє ґрунтується на різниці температур, то одним з передбачуваних місць для застосування будуть місця з холодним кліматом. Для комфортної життєдіяльності на цих місцевостях, як правило, є система опалення приміщень, а, отже завдяки цьому, створюється необхідна різниця температур для життя людей. Поза приміщення температура може опускатися імовірно нижче 20 градусів за Цельсієм, але в приміщення температура повинна залишатися комфортною для життєдіяльності людини. Завдяки перерахованого вище можна отримати вигоду, розмістивши на стику різниці температур елементи Пельтьє. Завдяки цьому можна значно знизити енерговитрати в при низькій температурі (в холодні пори року), отримуючи і при необхідності запасуючи електроенергію.

Ще одним варіантом установки автономного генератора на основі елемента Пельтьє, можуть бути місця з жарким або теплим кліматом, де одна сторона елемента Пельтьє буде повернута безпосередньо до джерела тепла, наприклад, до Сонця, а друга сторін буде знаходитися в землі, з низькою температурою, яку в деяких випадках необхідно примусово охолодити для отримання потрібних результатів. Наприклад, для такого розташування я запропонував би використовувати льох. Також ці елемент Пельтьє дуже зручно використовувати під час походів, так як завдяки йому можна зарядити свій телефон на енергії багаття або жити ліхтарик за допомогою тепла організму.



Рисунок 1.1 – Універсальний термоелектричний генератор Б4М від виробника ТОВ "Кріотерм"

Універсальний генератор Б4М (рис. 1.1) дозволяє отримувати напругу живлення 12В, при його установці на гарячу поверхню вертикального типу з температурою приблизно 250 градусів за Цельсієм. Також генератор має свою вбудовану тепловий захист, завдяки захисту запобігає вихід з ладу генератора при нагріванні настановної поверхні більш ніж 290 – 300 градусів за Цельсієм. З перерахованого вище виникає питання впровадження автономних генераторів електричної енергії в основі яких буде присутній елемент Пельтьє, який буде точково впроваджений в вигідні сфери застосування. Але зараз їх виробництво не сильно розвинене через те, що люди не сильно захоплені споживанням даного продукту, і виходячи з усього цього елемент Пельтьє має таку велику вартість. Приблизна ціна за 1 осередок, самого використовуваного розміру 40x40 мм, ця вартість становить близько 60 гривень. Але як тільки цим генератором зацікавиться люди в тому числі і світове співтовариство, наприклад вигодо набувачі в якості інвесторів, тоді виробництво почне йти в хороше русло, розвиватися, і завдяки цьому ціна імовірно повинна стати менше, і незабаром повинні з'явитися різноманітні розміри осередків.

На даний момент вигідно і піддається реалізації використовувати даний елемент в якості маленьких, переносних і компактних генераторів досить малої потужності. Прикладом візьмемо телефони, засновані на елементах Пельтьє. А саме – зарядний пристрій для телефону та інших мобільних пристроїв. Чим більше зміна температур між навколишнім середовищем і тілом людини, тим більше буде ефективність елемента Пельтьє і менша потреба в елементах.

Але для максимально ККД потрібен перепад температур в 100 градусів за Цельсієм, а одна стандартна елемент-осередок при даних умовах виробляє 5 В і 2 Вт потужності на холостому ході, але при використанні навантаження, його потужність і напруга скорочуються вдвічі, через низький ККД. Завдяки тому, що елементи Пельтьє компактні, їх можна помістити в нерухомі області взуття, штанів і куртки. Завдяки цьому одна сторона буде охолоджуватися від навколишнього середовища, інша нагріватися від тепла, що виробляється людиною. Для зарядки смартфона необхідно не менше 12 В, це близько шести елементів Пельтьє. Середня ціна на елемент Пельтьє становить 60 гривень, підсумкова вартість складе 360 гривень, це вийде дешевше стандартних, переносних зарядних пристроїв, які ще необхідно зарядити перед застосуванням.

Наступний приклад, який буде нескладно реалізувати, є установка для джерела енергії в поході, як влітку, так і взимку, від якої можна зарядити необхідні малопотужні споживачі, такі як ліхтарики, холодильники на елементі Пельтьє, а також зберігати електроенергію в акумулятори. Якщо виробляти енергію влітку, то найефективнішим часовим проміжком буде нічний час доби, так як температура вночі опускається до 10-15 градусів, від цього буде харчуватися сторона з меншою температурою, а інша сторона буде нагріватися від багаття, який потрібен для обігріву експедиції. Ще один, і більш ефективний варіант використання даного генератора в зимовий період, тому що можлива різниця температур буде помітно більше. Одна частина буде злився з багаттям, а інша з ємністю для снігу, до якої будуть прикріплені

радіатори з вентиляторами. Щоб отримати потужність в 24 Вт, необхідно близько 12 ЕП, 2 алюмінієвих радіатора, кулер на 5,4 Вт, термопаста, підвищувач напруги, якщо буде необхідно живити споживачі з великою напругою, і безпосередньо сама піч з нержавіючої сталі. З економічного боку розрахунок показує вигідність даного пристрою, 12 елементів Пельтьє за 700 гривень (при оптовій закупівлі буде дешевше), кулер – 100 гривень, термопаста 50 гривень, 2 алюмінієвих радіатора по 100 гривень, а для помножувача напруги необхідно 4 конденсатора і 4 діода загальною вартістю 100 гривень. Разом 1050 гривень за похідне автономне джерело електроенергії на елементах Пельтьє (рис. 1.2) .

Він не великий і тому займає небагато місця, завдяки цьому він дуже зручний в експедиціях і походах.

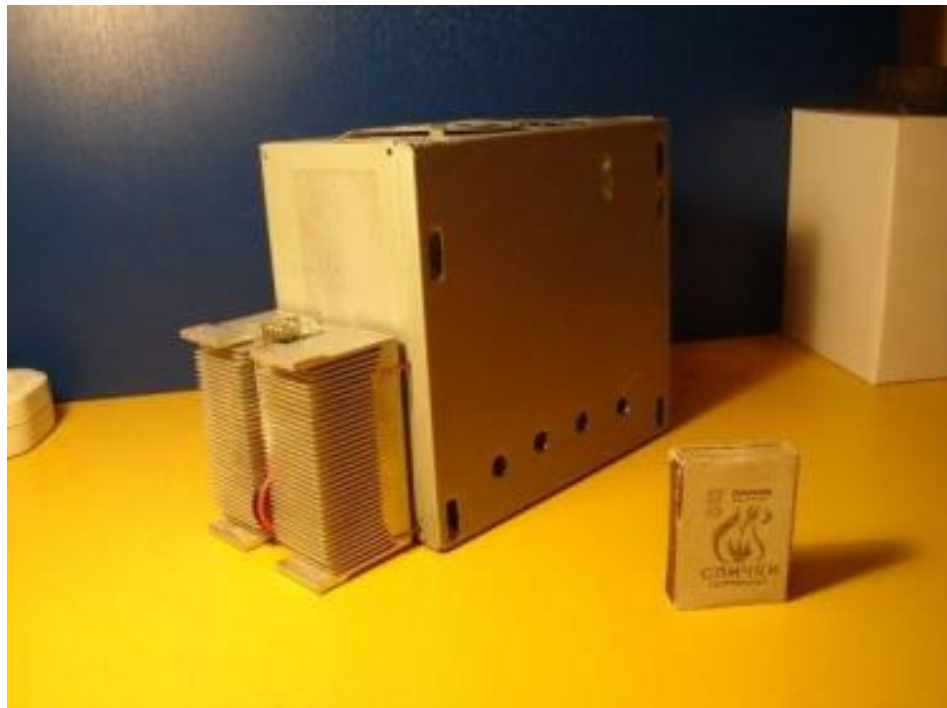


Рисунок 1.2 – Похідне автономне джерело електроенергії на елементах Пельтьє

Якщо одного генератора буде мало, є два шляхи вирішення: – поліпшити схему помножувача напруги за допомогою додавання конденсаторів і діодів; – додати ще один генератор.

При вивченні роботи термопари необхідно розглянути чотири основних механізми:

- теплопровідність. Тепло може передаватися або при русі носіїв, або при коливанні кристалічної решітки. Теплопровідність «відповідальна» за погіршення коефіцієнта перетворення термопари;

- джоулеві втрати. При протіканні струму відбувається виділення тепла, пов'язане з наявністю електричного опору. Цим явищем обумовлений другий механізм втрат в термопарі. Джоулеві втрати виникають в результаті розсіювання носіїв заряду через недосконалість кристалічної решітки, що обумовлено тепловими вібраціями, наявністю домішок, дислокацій і т.п.;

- ефект Зеєбека. Ефект проявляється в тому, що в провіднику виникає електрична напруга, обумовлене наявністю поздовжнього градієнта температур. Різниця потенціалів є наслідком того, що в холодній частині провідника підвищується концентрація носіїв заряду;

- ефект Пельтьє. Ефект проявляється в поглинанні або виділення тепла в місцях контакту різних провідників і обумовлений зміною теплоємності носіїв при їх переході з одного матеріалу в інший. Існує наявність зв'язку між ефектами Зеєбека і Пельтьє;

- ефект Томсона, зумовлений теплової конвекцією при дрейфовому русі носіїв.

## 1.2 Ефект Зеєбека

Ефект Зеєбека полягає в тому, що в замкнутому колі із двох різних напівпровідників (або металів), місця з'єднання, їх ще називають спаї, які знаходяться при різних температурах, виникає електричний струм, котрий називається термоелектричним. На кінцях такого розімкненого кола виникає різниця потенціалів  $U_T$ , яка має назву термоЕРС. Величина різниці потенціалів визначається за формулою:

$$U_T = a \cdot \Delta T . \quad (1.1)$$

де  $\Delta T$  – різниця температур спаїв;

$\alpha$  – питома термоЕРС, яка залежить від видів матеріалів і інтервалів температур, при яких термопара застосовується.

Механізм утворення термоЕРС полягає в наступному. Нехай один із кінців однорідного напівпровідника нагрітий більш чим другий кінець. Вільні носії заряду біля нагрітого кінця будуть мати більш високу енергію і швидкість, чим біля холодного. Крім того, при значній залежності концентрації вільних носіїв в напівпровіднику від температури біля нагрітого кінця, концентрація вільних носіїв заряду буде більша, чим біля холодного. Із-за цих причин потік вільних носіїв заряду від гарячого кінця до холодного буде більший, чим від холодного до гарячого.

Якщо концентрація вільних електронів і дірок в напівпровіднику (або їх рухливість) різні, то кінці напівпровідника будуть протилежно зарядженими. Стан рівноваги наступить при рівності потоку вільних носіїв заряду, яке обумовлене градієнтом температури, потоку, який був викликаний дією електричного поля, яке виникло в результаті розподілу зарядів.

В електронному напівпровіднику напрямку (рис. 1.3 а) основними носіями заряду є електрони. В напівпровіднику n-типу потік електронів від нагрітого кінця до холодного буде більший, чим від холодного до нагрітого. В результаті на холодному кінці накопичеться надлишковий від'ємний заряд, а на нагрітому залишиться некомпенсований позитивний заряд, утворений іонами донорної домішки. Утворене електричне поле буде викликати потік електронів від холодного кінця до нагрітого. Стаціонарний стан встановиться при рівності цих потоків.

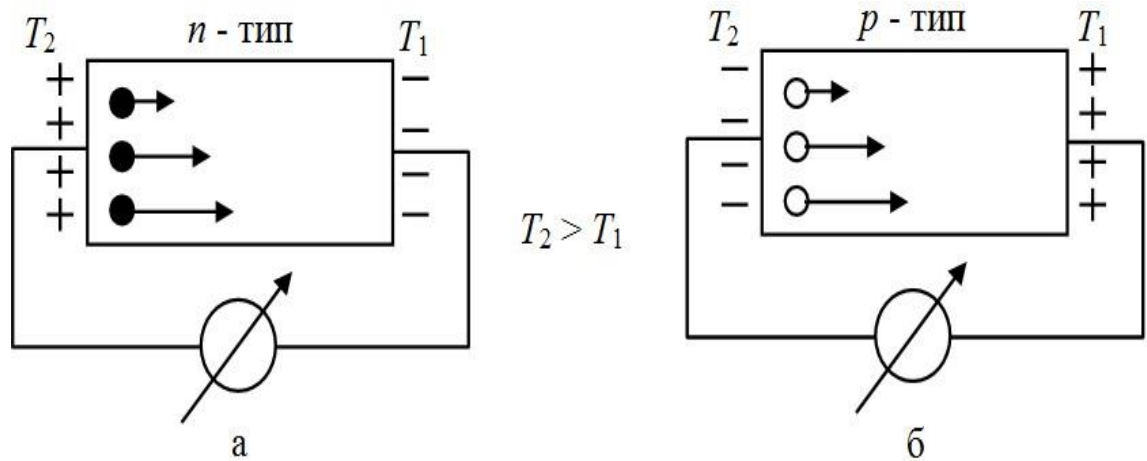


Рисунок 1.3 – Перерозподіл основних носіїв заряду в напівпровіднику n-типу (а), в напівпровіднику р-типу (б) при наявності градієнта температури вздовж напівпровідника ( $T_2 > T_1$ ).

В дірковому напівпровіднику (рис. 2.1 б) на холодному кінці виникає надлишковий позитивний заряд.

ТермоЕРС змінюється не пропорційно різниці температур спаїв  $\Delta T$ . Тому для характеристики термоелектричних властивостей будь-якої пари використовують диференційну термоЕРС, яка виникає при різниці температур спаїв в  $1\text{ }^\circ\text{C}$ :

При низьких температурах в чистих речовинах, при наявності градієнта температур, проявляється ефект збільшення електронів фононами, які рухаються від нагрітого кінця до холодного. Це призводить до утворення додаткової термоЕРС, яка значна при низьких температурах.

Поява ефекта Зеєбека обумовлена не тільки об'ємною різницею потенціалів а й контактною різницею потенціалів. Контактна різниця потенціалів викликана різницею енергій Фермі в різних провідників які між собою контактують. При створенні контакту хімічні потенціали електронів стають однаковими і виникає контактна різниця потенціалів.

На контакті існує електричне поле, яке локалізоване в тонкому приконтактному слої. Якщо скласти замкнуте коло з двох матеріалів то контактна різниця потенціалів виникає на обох контактах – від провідника з

більшою енергією Фермі до провідника з меншою енергією Фермі. Це означає, якщо зробити обхід по замкнутому контуру, то в одному контакті обхід буде відбуватися за напрямком поля, а в іншому – проти поля. Циркуляція вектора напруженості електричного поля буде дорівнювати нулю. Якщо температура одного з контактів зміниться на  $dT$ , то контактна різниця потенціалів зміниться також, оскільки енергія Фермі залежить від температури. Якщо змінилася внутрішня контактна різниця потенціалів, то змінилося електричне поле в одному з контактів і тому циркуляція вектора напруженості електричного поля буде відмінна від нуля, тобто з'являється ЕРС в замкнутому колі. Дана ЕРС називається контактна ЕРС. Якщо два контакти термоелемента знаходяться при одній і тій же температурі, то і контактна і об'ємна термо-ЕРС зникають.

Ефект Зеебека викликаний також фононним збільшенням. Якщо в твердому тілі існує градієнт температури, то і число фононів, які рухаються від гарячого кінця до холодного, буде більше, чим в оберненому напрямку. В результаті зіткнення з електронами фонони можуть захоплювати за собою ці електрони і на холодному кінці буде накопичуватися від'ємний заряд, а на гарячому – позитивний, до тих пір, поки утворена різниця потенціалів не зрівноважить ефект збільшення. Ця різниця потенціалів і представляє собою третю складову термо-ЕРС.

В магнетиках спостерігається додаткова складова термо-ЕРС, яка обумовлена ефектом збільшення електронів магнонами.

Підвівши результати, можна сказати, що ефект Зеебека досить не простий процес, який обумовлюється такими процесами як:

- об'ємна різниця потенціалів;
- контактна різниця потенціалів;
- фононне збільшення;
- магнонне збільшення.

Електрони провідності поведуться так само, як газ. При наявності температурного градієнта їх концентрація у холодного кінця провідника буде

вище, ніж у гарячого, і, отже, холодний кінець провідника по відношенню до гарячого буде заряджений негативно. Результиуюча різниця потенціалів називається напругою (ЕРС) Зеебека. Значення цієї напруги залежить як від різниці температур, так і від природи провідника. якщо носіями зарядів в провіднику є дірки, то холодніший кінець буде позитивно заряджений по відношенню до гарячого. З цієї причини полярність напруги Зеебека залежить від матеріалу провідника.

Для того щоб зняти напругу, що виникає в провіднику, необхідно зовнішнє з'єднання. Однак з'єднувальний провід матиме той же градієнт температури, що і основний провідник, а отже, в ньому виникне власна ЕРС Зеебека. Якщо зовнішній сполучний провід зроблений з того ж матеріалу, що і основний, то напруги обох провідників в точності компенсують одна одну. У разі, якщо з'єднані провідники з різних матеріалів, виникне якась результиуюча різниця потенціалів.

Термопара являє собою поєднання двох різних матеріалів, причому найчастіше з'єднують матеріали, що мають протилежну полярність ефекту Зеебека, що призводить до складання ЕРС Зеебека двох використовуваних матеріалів. оскільки зовнішні з'єднувальні дроти підключаються до вільних кінців термопари, які зазвичай мають однакову температуру, то додаткового напруження Зеебека за рахунок з'єднувальних проводів не виникає. Термопари володіють низьким повним опором (Невелика напруга і щодо великий струм) і в більшості додатків з'єднуються послідовно, формуючи термоелектричну батарею (рис. 1.4 і 1.5).

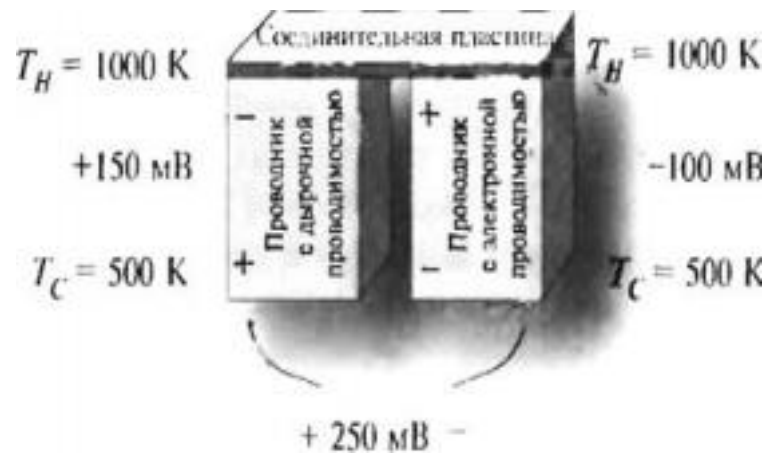


Рисунок 1.4 – Термопара з двох матеріалів з провідністю різного типу

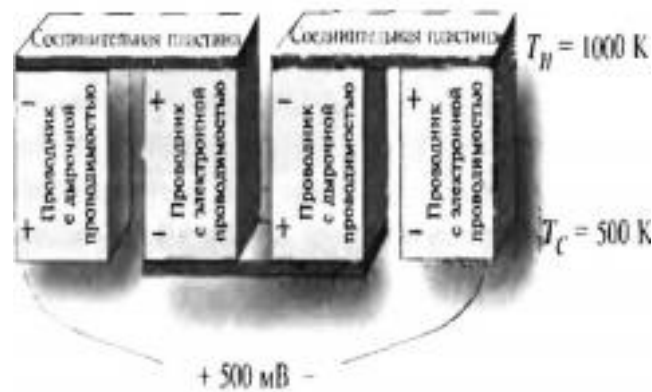


Рисунок 1.5 – Термопари, з'єднані послідовно в батарею

У термоелектричних батареях індивідуальні елементи (термопари) електрично з'єднані послідовно, а в тепловому відношенні – паралельно. У такому випадку, якщо теплопровідність одного елемента дорівнює  $\Lambda$ , то теплопровідність батареї, що складається з  $n$  елементів, дорівнює  $n\Lambda$ . Аналогічним чином електричний опір батареї одно  $n \cdot R$ , якщо  $R$  – опір одного осередку. Різниця потенціалів, що генерується при різниці температур в  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  (еквівалент  $\alpha$  для одного елемента), в даному випадку дорівнює  $n \cdot \alpha$ . Отже добротність батареї, що складається з однакових елементів,

$$Z = \frac{(na)^2}{n\Lambda \cdot nR} = \frac{a^2}{\Lambda R^2}. \quad (1.2)$$

т. е. збігається з добротністю одного елемента.

Представлене вище пояснення ефекту Зеєбека сильно спрощено. Її можна розглядати як перше наближення, яке сприяє розумінню принципу роботи термоелектричних пристроїв. Переміщення носіїв до холодного кінця провідника створює електричне поле, яке, впливаючи на електрони, змушує їх дрейфувати в зворотному напрямку, тобто до гарячого кінця провідника. Динамічна рівновага встановлюється тоді, коли число носіїв, що рухаються під дією градієнта тиску, буде в точності дорівнює числу носіїв, що рухаються під дією електричного поля, тобто у зворотньому напрямку. При динамічній рівновазі немає переносу заряду від одного кінця провідника до іншого – потік  $nv$  однаковий в обох напрямках. Однак носії, що переміщуються з області з більш високою в область з більш низькою температурою, мають більшу енергією  $i$ , отже, переносять більше тепла, ніж носії, що рухаються в протилежному напрямку. Таким чином, навіть при відсутності потоку частинок в матеріалі існує тепловий потік. Цим пояснюється теплопровідність металів.

З цієї найпростішої моделі слід, що в провідниках з електронною провідністю термоелектрична ЕРС негативна, а коефіцієнт Зеєбека менше нуля (відповідно до згаданої вище домовленості). У той же час напівпровідники р типу, в яких носіями заряду є дірки, повинні мати позитивний коефіцієнт Зеєбека. Така модель не зовсім адекватна дійсності. Незважаючи на той факт, що більшість металів мають негативний коефіцієнт Зеєбека, для деяких з них, зокрема для міді, коефіцієнт Зеєбека позитивний. Для поліпшення розглянутої вище моделі спробуємо врахувати розсіювання електронів в процесі їх руху в провіднику. Якщо перетин розсіювання не залежить від температури, то зроблені вище висновки залишаються в силі, оскільки обидва потоку (по температурному градієнту і проти нього) обурені однаково. Однак якщо існує якийсь механізм, в результаті дії якого більше «гарячі» електрони відчувають сильніший розсіювання, то це призведе до зниження потоку «гарячих» електронів  $i$ , отже, до зменшення значення

негативної термоЕРС або навіть зміні її знака. З іншою боку, якщо розсіювання сильніше для «холодних» електронів, то значення негативної термоЕРС зростає.

Для деяких матеріалів спостерігається посилення ефекту Зеебека при зниженні температури. Така поведінка матеріалів є наслідком електронфононої взаємодії. У матеріалах з жорсткою кристалічною решіткою наявність температурного градієнта приводить до виникнення хвиль коливань решітки, які відповідальні за теплоперенос.

Такі хвилі можуть інтерпретуватися як потік квазічастинок, званих фононами.

Тут ми знову стикаємося з принципом дуалізму щодо понять хвиля і частинка. Фонони можуть взаємодіяти з іншими фононами і електронами. При високих температурах фононфононна взаємодія є домінуючим, тоді як при низьких температурах має місце електронфононна взаємодія. В останньому випадку потік фононів, рухомих від гарячого кінця до холодного, захоплює електрони, змушуючи їх переміщатися в тому ж напрямку, що призводить до зростання негативного заряду на холодному кінці провідника і відповідного зростання значення негативної термоЕРС. Якщо ж матеріал є напівпровідником р-типу, то захоплюються дірки, що викликає збільшення позитивної термоЕРС.

Для деяких матеріалів спостерігається посилення ефекту Зеебека при зниженні температури. Така поведінка матеріалів є наслідком електронфононного взаємодії. У матеріалах з жорсткою кристалічною решіткою наявність температурного градієнта приводить до виникнення хвиль коливань решітки, які відповідальні за теплоперенос.

Такі хвилі можуть інтерпретуватися як потік квазічастинок, званих фононами.

Тут ми знову стикаємося з принципом дуалізму щодо понять хвиля і частинка. Фонони можуть взаємодіяти з іншими фононами і електронами. При високих температурах фононфононна взаємодія є домінуючим, тоді як при

низьких температурах має місце електронфоновна взаємодія. В останньому випадку потік фононів, рухомих від гарячого кінця до холодного, захоплює електрони, змушуючи їх переміщатися в тому ж напрямку, що призводить до зростання негативного заряду на холодному кінці провідника і відповідного зростання значення негативної термоЕРС. Якщо ж матеріал є напівпровідником р-типу, то захоплюються дірки, що викликає збільшення позитивної термоЕРС.

### 1.1.2 Ефект Пельтьє

Ефект Пельтьє був відкритий французом Жаном-Шарлем Пельтьє в 1834 році. При проведенні одного з експериментів він пропускав електричний струм через смужку вісмуту з підключеними до ній мідними провідниками (рис. 1.6). В ході експерименту він виявив, що одне з'єднання вісмут-мідь нагрівається, інше – остигає.

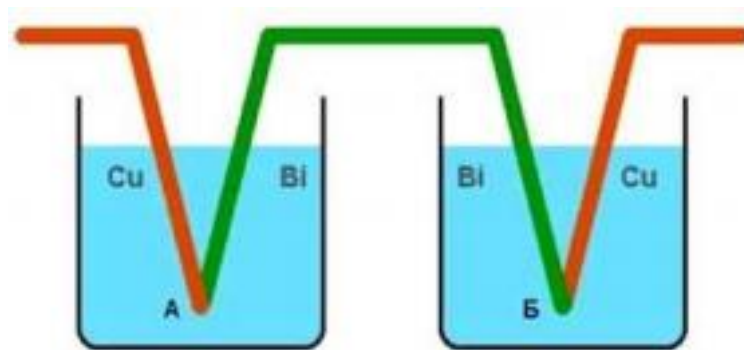


Рисунок 1.6 – Схема досвіду для вимірювання тепла Пельтьє

Сам Пельтьє не розумів в повній мірі сутність відкритого їм явища. Справжній сенс явища був пізніше пояснений в 1838 р. Ленцем. У своєму досвіді Ленц експериментував з краплею води, вміщеною на стику двох провідників (вісмуту і сурми). При пропущенні струму в одному напрямі крапля води замерзала, а при зміні напрямку струму – танула. Тим самим було встановлено, що при проходженні струму через контакт двох провідників в одному напрямку тепло виділяється, в іншому – поглинається. Дане явище

було названо ефектом Пельтьє.

Тепло Пельтьє пропорційне силі струму і може бути виражено формулою  $Q_{\text{п}} = \Pi \cdot q$ , де  $q$  – заряд, що пройшов через контакт;  $\Pi$  – так званий коефіцієнт Пельтьє, який залежить від природи контактуючих матеріалів і їх температури. Коефіцієнт Пельтьє може бути виражений через коефіцієнт Томпсона,  $\Pi = \alpha T$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт Томпсона,  $T$  – абсолютна температура.

Необхідно відзначити, що коефіцієнт Пельтьє знаходиться в істотній залежності від температури. Деякі значення коефіцієнта Пельтьє для різних пар металів представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнта Пельтьє для різних пар металів

Залізо-константан		Мідь-нікель		Свинець-константан	
T, К	$\Pi$ , мВ	T, К	$\Pi$ , мВ	T, К	$\Pi$ , мВ
273	13,0	292	8,0	293	8,7
299	15,0	328	9,0	383	11,8
403	19,0	478	10,3	508	16,0
513	26,0	563	8,6	578	18,7
593	34,0	613	8,0	633	20,6

Величина тепла, що виділяється Пельтьє і його знак залежать від виду контактують речовин, сили струму і часу його проходження, тому  $Q_{\text{п}}$  може бути виражено ще однією формулою,  $dQ_{\text{п}} = \Pi_{12} I dt$ .

Тут  $\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2$  – коефіцієнт Пельтьє для даного контакту, пов'язаний з абсолютними коефіцієнтами Пельтьє  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  контактуючих матеріалів. При цьому вважається, що струм йде від першого зразка до другого. При виділенні тепла Пельтьє маємо:  $Q_{\text{п}} > 0$ ,  $\Pi_{12} > 0$ ,  $\Pi_1 > \Pi_2$ .

При поглинанні тепла Пельтьє воно вважається негативним і відповідно:  $Q_{\text{п}} < 0$ ,  $\Pi_{12} < 0$ ,  $\Pi_1 < \Pi_2$ . Очевидно, що  $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$ .

Розмірність коефіцієнта Пельтьє [П]  $CI = \text{Дж} / \text{Кл} = \text{В}$ .

Класична теорія пояснює явище Пельтьє тим, що при перенесенні електронів струмом з одного металу в інший вони прискорюються або сповільнюються внутрішньою контактною різницею потенціалів між металами. У разі прискорення кінетична енергія електронів збільшується, а потім виділяється у вигляді тепла. У зворотному випадку кінетична енергія зменшується і енергія поповнюється за рахунок енергії теплових коливань атомів другого провідника. Таким чином, він починає охолоджуватися. При більш повному розгляді враховується зміна не тільки потенційної, а й повної енергії.

На (рис. 1.7 і 1.8) зображена замкнута ланцюг, складена з двох різних напівпровідників ПП1 і ПП2 з контактами А і В.

Так у ланцюг прийнято називати термоелементом, а її гілки – термоелектроди. Через ланцюг тече струм  $I$ , створений зовнішнім джерелом  $\varepsilon$ . (рис 1.7) ілюструє ситуацію, коли на контакті А (Струм тече від ПП<sub>1</sub> до ПП<sub>2</sub>) відбувається виділення тепла Пельтьє  $Q_P(A) > 0$ , а на контакті В (струм направлений від ПП<sub>2</sub> до ПП<sub>1</sub>) його поглинання:  $Q_P(B) < 0$ . У результаті відбувається зміна температур спаев:  $T_A > T_B$ .

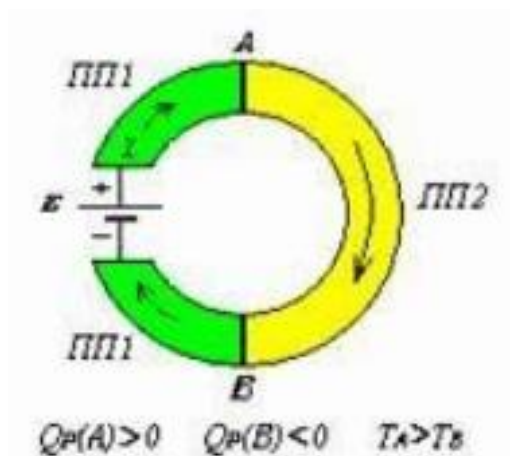


Рисунок 1.7 – Виділення тепла Пельтьє (контакт А)

На рис. 1.8 зміна знака джерела змінює напрямок струму на протилежне:

від ПП<sub>2</sub> до ПП<sub>1</sub> на контакті А і від ПП<sub>1</sub> до ПП<sub>2</sub> на контакті В. Відповідно змінюється знак тепла Пельтьє і співвідношення між температурами контактів:  $Q_{\text{п}}(A) < 0$ ,  $T_A < T_B$ .

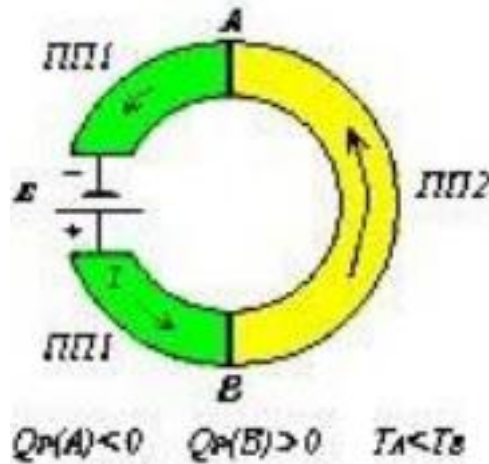


Рисунок 1.8 – Поглинання тепла Пельтьє (контакт А)

Причина виникнення ефекту Пельтьє на контакті напівпровідників з однаковим видом носіїв струму (два напівпровідника n-типу або два напівпровідника p-типу) така ж, як і в разі контакту двох металевих провідників. Носії струму (електрони або дірки) по різні боки спаю мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох причин: енергетичного спектру, концентрації, механізму розсіяння носіїв заряду. Якщо носії, пройшовши через спай, потрапляють в область з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній решітці, в результаті чого поблизу контакту відбувається виділення теплоти Пельтьє ( $Q_{\text{п}} > 0$ ) і температура контакту підвищується. При цьому на іншому спає носії, переходячи в область з більшою енергією, запозичують відсутню енергію від решітки, відбувається поглинання теплоти Пельтьє ( $Q_{\text{п}} < 0$ ) і зниження температури.

Ефект Пельтьє, як і всі термоелектричні явища, виражений особливо сильно в ланцюгах, складених з електронних (n-тип) і доручених (p-тип) напівпровідників (рис. 1.9).

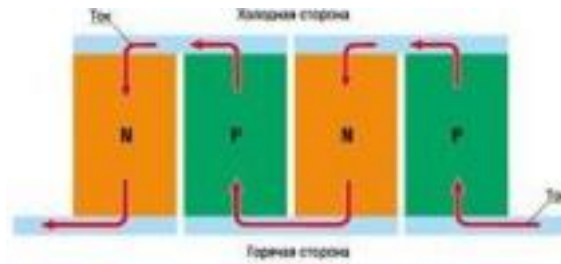


Рисунок 1.9 – Використання напівпровідникових структур в термоелектричних модулях

В цьому випадку ефект Пельтьє має інше пояснення. Розглянемо ситуацію, коли струм в контакті йде від діркового напівпровідника до електронного (р-n). При цьому електрони і дірки рухаються назустріч один одному і, зустрівшись, рекомбінують. В результаті рекомбінації звільняється енергія, яка виділяється у вигляді тепла. Ця ситуація розглянута на (рис. 1.9), де зображені енергетичні зони ( $\epsilon_c$  – зона провідності,  $\epsilon_v$  – валентна зона) для напівпровідників з дірковою і електронною провідністю.

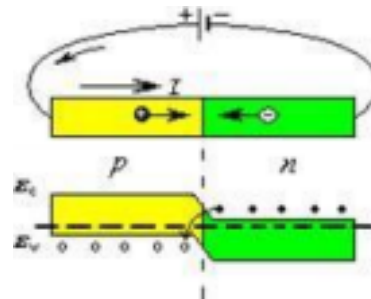


Рисунок 1.10 – Виділення тепла Пельтьє на контакті напівпровідників р- і n-типу

Тут електрони в електронному та дірки в дірковому напівпровідниках рухаються в протилежні сторони, йдучи від кордону розділу. Спад носіїв струму в прикордонній області заповнюється за рахунок попарного народження електронів і дірок. На освіту таких пар потрібна енергія, яка поставляється тепловими коливаннями атомів решітки. Утворені електрони і дірки захоплюються в протилежні сторони електричним полем. Тому поки через контакт йде струм, безперервно відбувається народження

нових пар. В результаті в контактї тепло буде поглинатися.

На (рис. 1.11) ( $\epsilon_c$  – зона провідності,  $\epsilon_v$  – валентна зона) ілюструється поглинання тепла Пельтьє для випадку, коли струм йде від *n* до *p* напівпровідника (*n* – *p*).

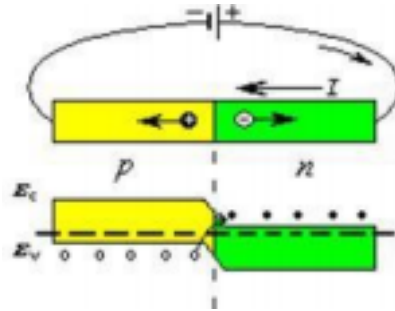


Рисунок 1.11 – Поглинання тепла Пельтьє на контактї напівпровідників *p*- і *n*-типу

Розглянемо два різних провідника *a* й *b* з однаковою площею поперечного перерізу *A*, які з'єднані, як це показано на (рис. 1.12). Поверхня *S* є контактною поверхнею провідників. Обидва провідники мають однакову температуру *T* і через них протікає електричний струм *I*. Нехай теплоємність електронів в провіднику *a* дорівнює  $c_a$  в провіднику *b* –  $c_b$ . Тоді теплова енергія, якою володіє електрон, в кожному провіднику дорівнює  $c_a T$  и  $c_b T$  відповідно.



Рисунок 1.12 – Перенесення тепла за допомогою електричного струму

Електричний струм, що протікає через контактну поверхню *S*, в кожному напрямку

$$I=qnvA. \quad (1.3)$$

У провіднику а разом з електричним струмом в напрямку контактної поверхні переноситься потік теплової енергії,

$$Pa=nvAc_aT, \quad (1.4)$$

а в провіднику b від контактної поверхні несеться потік теплової енергії.

$$Pb=nvAc_bT. \quad (1.5)$$

Якщо електрони мають максвелловское розподіл за швидкостями, то в рамках викладеної моделі коефіцієнт Пельтьє  $\pi$  буде дорівнює нулю, оскільки в цьому випадку  $c_a = c_b$ .

Однак, ґрунтуючись на факті існування ефекту Пельтьє, слід зробити висновок, що в матеріалах, використуваних для виготовлення термопар, електронний газ не підкоряється розподілу Максвелла. Цей висновок узгоджується з загальноприйнятим положенням про немаксвелловський розподілі електронів в металах. Однак в слабо легованих напівпровідниках електронна провідність описується на основі максвеллівський розподілу. Тому потрібне додаткове удосконалення моделі, щоб пояснити наявність ефекту Пельтьє в таких матеріалах.

## 1.2 Висновки до розділу

У цьому розділу було розглянуто завдяки чьому при подані струму у електронному напівпровіднику виникає ефект Пелтьє, завдяки якій створюється різниця температур. Та зворотній процес названий ефектом Зеебека котрий дозволяє використувати елементи Пельє як термогенератор створюючи різницю температур на протилежних частинах елемента.

## 2 ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ

Об'єднання великої кількості пар напівпровідників р- і n-типу дозволяє створювати охолоджуючі елементи – модулі Пельтьє порівняно великої потужності. Структура напівпровідникового термоелектричного модуля Пельтьє представлена на (рис. 2.1).

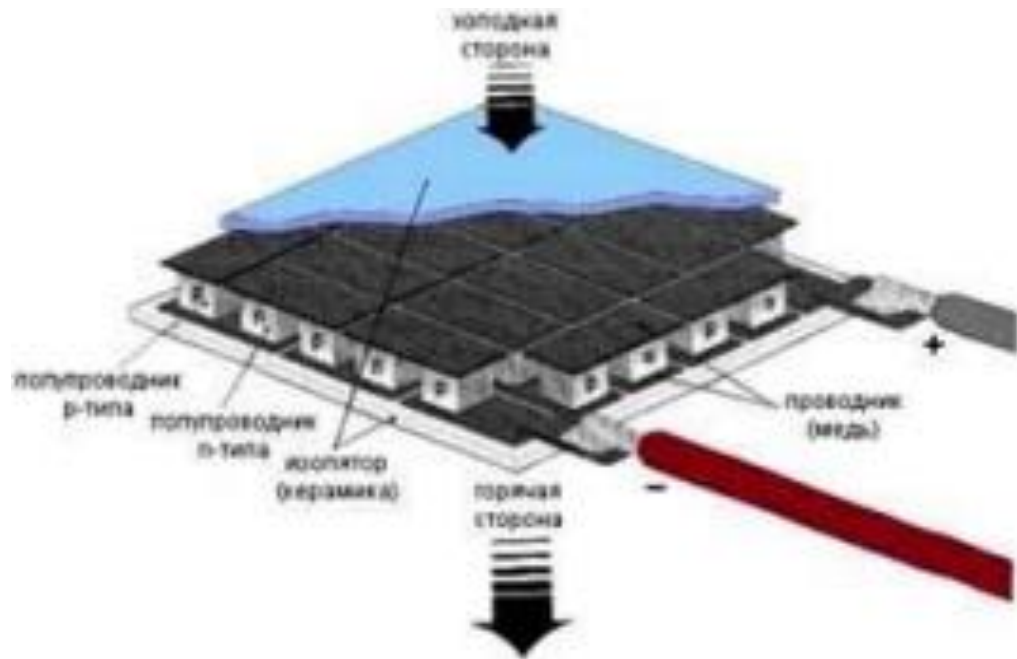


Рисунок 2.1 – Структура модуля Пельтьє

Модуль Пельтьє є термоелектричний холодильник, що складається з послідовно з'єднаних напівпровідників р- і n-типу, що утворюють р-n- і n-p переходи. Кожен з таких переходів має тепловий контакт з одним з двох радіаторів.

В результаті проходження електричного струму певної полярності утворюється перепад температур між радіаторами модуля Пельтьє: один радіатор працює як холодильник, інший радіатор нагрівається і служить для відводу тепла. На (рис. 2.2) представлений зовнішній вигляд типового модуля Пельтьє.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд модуля Пельтьє

Типовий модуль забезпечує значний температурний перепад, який становить кілька десятків градусів. При відповідному примусовому охолодженні нагрівається радіатора другий радіатор – холодильник дозволяє досягти від’ємних значень температур. Для збільшення різниці температур можливе каскадне включення термоелектричних модулів Пельтьє при забезпеченні їх адекватного охолодження. Це дозволяє порівняно простими засобами отримати значний перепад температур і забезпечити ефективне охолодження елементів, що захищаються. На (рис. 2.3) представлений приклад каскадного включення типових модулів Пельтьє.

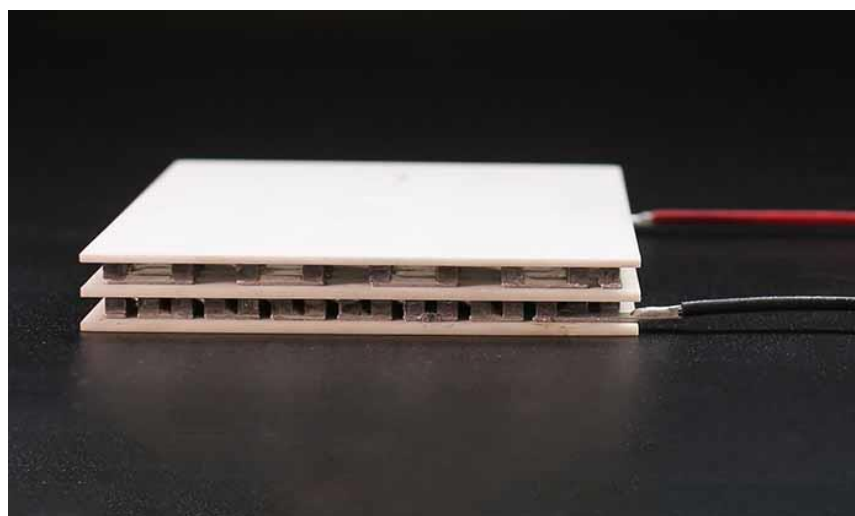


Рисунок 2.3 – Приклад каскадного включення модулів Пельтьє

Облаштування охолодження на основі модулів Пельтьє часто називають

активними холодильниками Пельтьє або просто кулерами Пельтьє (рис.2.4).

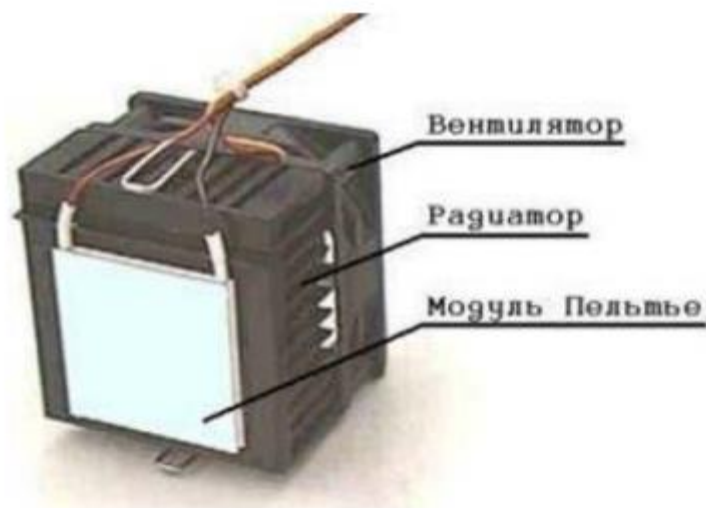


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд кулера з модулем Пельтьє

Головна характеристика термоелектричного охлажуючого пристрою це ефективність охолодження:

$$Z = \alpha^2 / (rl)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС,  $r$  – питомий опір,  $l$  – питома теплопровідність напівпровідника.

Параметр  $Z$  – функція температури і концентрації носіїв заряду, причому для кожної заданої температури існує оптимальне значення концентрації, при якій величина  $Z$  максимальна. Введення в напівпровідник тих чи інших домішок – основне доступний засіб змінювати його показники ( $\alpha$ ,  $r$ ,  $l$ ) в бажану сторону. Використання модулів Пельтьє в активних кулерах робить їх істотно більш ефективними в порівнянні зі стандартними типами кулерів на основі традиційних радіаторів і вентиляторів. Однак в процесі конструювання та використання кулерів з модулями Пельтьє необхідно враховувати ряд специфічних особливостей, що впливають з конструкції модулів, їх принципу роботи, архітектури сучасних апаратних засобів комп'ютерів і функціональних можливостей системного та прикладного програмного забезпечення.

## 2.1 Особливості експлуатації модулів Пельтьє

Пельтьє, що застосовуються в складі засобів охолодження електронних елементів, відрізняються порівняно високою надійністю і, в відміню від холодильників, створених за традиційною технологією, не мають рухомих частин. І, як це зазначалося вище, для збільшення ефективності своєї роботи вони допускають каскадне використання, що дозволяє довести температуру корпусів захищаються електронних елементів до негативних значень навіть при їх значній потужності розсіювання. Також модуль є оборотним, тобто при зміні полярності постійного струму гаряча і холодна пластини міняються місцями.

Однак крім очевидних переваг модулі Пельтьє володіють і рядом специфічних властивостей і характеристик, які необхідно враховувати при їх використанні в складі охолоджуючих коштів. Деякі з них були вже відзначені, але для коректного застосування модулі Пельтьє вимагають більш детального розгляду.

До найважливіших характеристик відносяться наступні особливості експлуатації:

- модулі Пельтьє, що виділяють в процесі своєї роботи велику кількість тепла, вимагають наявності в складі кулера відповідних радіаторів і вентиляторів, здатних ефективно відводити надмірне тепло від охолоджуючих модулів;

- термоелектричні модулі відрізняються відносно низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) і, виконуючи функції теплового насоса, самі є потужними джерелами тепла. Використання даних модулів у складі засобів охолодження електронних комплектуючих комп'ютера викликає значне зростання температури всередині системного блоку, що нерідко вимагає додаткових заходів і засобів для зниження температури усередині корпусу комп'ютера. В іншому випадку підвищена температура всередині корпусу

створює труднощі для роботи не тільки захищається елементів і їх систем охолодження, але і інших компонентів комп'ютера;

– модулі Пельтьє є порівняно потужної додатковим навантаженням для блока живлення. Споживаний ними струм перевищує 6А. Занадто тонкі дроти живлення можуть не витримати такої сили струму. З урахуванням значення струму споживання модулів Пельтьє величина потужності блоку живлення комп'ютера повинна бути не менше 250 Вт;

– модуль Пельтьє, в разі виходу його з ладу, ізолює охолоджуваний елемент від радіатора кулера. Це призводить до дуже швидкого порушення теплового режиму захищається елемента і швидкого виходу його з ладу від подальшого перегріву;

– термоелектричні модулі відповідають технічним даними протягом двох років з дати виготовлення при дотриманні споживачем умов зберігання і експлуатації. Термін зберігання і експлуатації – 15 років з моменту прийняття. З досвіду відомо, що якщо модуль не нагріватиметься до температури плавлення олова, він прослужить дуже довго;

– подається на модуль напруга визначається кількістю пар гілок в модулі. Найбільш поширеними є 127-парні модулі, величина максимальної напруги для яких становить приблизно 16 В. На ці модулі зазвичай подається напруга живлення 12 В. Такий вибір напруги живлення в більшості випадків є оптимальним і дозволяє забезпечити, з одного боку, достатню потужність охолодження, а з іншого боку – достатню економічність. При підвищенні напруги живлення понад 12 В збільшення холодильної потужності буде слабким, а споживана потужність буде різко збільшуватися. При зниженні напруги живлення економічність буде рости, холодильна потужність буде зменшуватися, але лінійно, що дуже зручно для організації плавного регулювання температури. Для модулів з числом пар гілок, відмінним від 127, необхідно враховувати особливості конкретного пристрою, перш за все – умови тепловідведення з гарячою боку, і можливості джерел живлення.

## 2.2 Переваги і недоліки

Перевагою елемента Пельтьє є невеликі розміри, відсутність будь-яких рухомих частин, а також газів і рідин. При зверненні напрямку струму можливо як охолодження, так і нагрівання – це дає можливість термостатирования при температурі навколишнього середовища як вище, так і нижче температури термостатирования. Також перевагою є відсутність механічних частин і шуму. Недоліком елемента Пельтьє є більш низький коефіцієнт корисної дії, ніж у компресорних холодильних установок на фреоні, що веде до великої споживаної потужності для досягнення помітної різниці температур. Незважаючи на це, ведуться розробки по підвищенню теплового ККД, а елементи Пельтьє знайшли широке застосування в техніці, так як без будь-яких додаткових пристроїв можна реалізувати температури нижче 0°C. Основною проблемою в побудові елементів Пельтьє з високим ККД є те, що вільні електрони в речовині є одночасно переносниками та електричного струму, і тепла. Матеріал для елемента Пельтьє повинен одночасно володіти двома взаємовиключними властивостями – добре проводити електричний ток, але погано проводити тепло.

У батарей елементів Пельтьє можливе досягнення теоретично дуже великої різниці температур, в зв'язку з цим краще використовувати імпульсний метод регулювання температури, завдяки якому можна знизити також споживання енергії. При цьому бажано згладжувати пульсації струму для продовження терміну служби елемента Пельтьє.

Застосування ефекту Пельтьє. Елементи Пельтьє застосовуються в ситуаціях, коли необхідно охолодження з невеликою різницею температур або енергетична ефективність охолоджувача не важлива. Наприклад, елементи Пельтьє застосовуються в маленьких автомобільних холодильниках, так як застосування компресора в цьому випадку неможливо через обмежені розмірів і, крім того, необхідна потужність охолодження невелика.

Крім того, елементи Пельтьє застосовуються для охолодження

пристроїв із зарядним зв'язком в цифрових фотокамерах. За рахунок цього досягається помітне зменшення теплового шуму при тривалих експозиціях (наприклад в астрофотографії). Багатоступінчасті елементи Пельтьє застосовуються для охолодження приймачів випромінювання в інфрачервоних сенсорах.

Також елементи Пельтьє часто застосовуються:

- для охолодження і термостатування діодних лазерів, щоб стабілізувати довжину хвилі випромінювання;
- в комп'ютерній техніці;
- радіоелектричних пристроях;
- медичному і фармацевтичному обладнанні;
- побутової техніки;
- кліматичному обладнанні;
- термостатах;
- оптичної апаратури;
- для управління процесом кристалізації;
- як підігрів з метою опалення;
- в лабораторних і наукових приладах;
- льодогенератором;
- кондиціонерах;
- для отримання електроенергії;
- в електронних лічильниках витрати води.

Звичайно, охолоджуючі пристрої Пельтьє навряд чи підходять для масового використання. Вони досить дорогі і вимагають правильного режиму експлуатації. Сьогодні це, скоріше, інструмент для любителів розгону процесорів. Однак в разі потреби сильного охолодження процесорів кулери Пельтьє є найбільш ефективними пристроями.

З'явилися повідомлення про експерименти з вбудовування мініатюрних модулів Пельтьє безпосередньо в мікросхеми процесорів для охолодження їх найбільш критичних структур. Таке рішення сприяє кращому охолодженню за

рахунок зниження теплового опору і дозволяє значно підвищити робочу частоту і продуктивність процесорів.

Роботи в напрямку вдосконалення систем забезпечення оптимальних температурних режимів електронних елементів ведуться багатьма дослідницькими лабораторіями. І системи охолодження, що передбачають використання термоелектричних модулів Пельтьє, вважаються надзвичайно перспективними

### 2.3 Елементи Пельтьє як термогенератор

Для термоелектрогенераторів використовують напівпровідникові термоелектричні матеріали, що забезпечують найбільш високий коефіцієнт перетворення тепла в електрику. Список речовини, що мають термоелектричні властивості, досить великий (тисячі сполук і з'єднань), але лише деякі з них можуть використовуватися для перетворення теплової енергії. Сучасна наука постійно вшукує нові і нові напівпровідникові композиції і прогрес в цій області забезпечується не стільки теорією, скільки практикою, зважаючи на складність фізичних процесів, що відбуваються в термоелектричних матеріалах.

Безумовно можна сказати, що на сьогоднішній день не існує термоелектричного матеріалу, який в повній мірі задовольняє промисловість своїми властивостями, і головним інструментом у створенні такого матеріалу є експеримент. Найважливіші властивостями напівпровідникового матеріалу для термоелектрогенераторів є:

- ККД: Бажано якомога вищий ККД;
- технологічність: Можливість будь-яких видів обробки;
- вартість: бажано відсутність у складі рідкісних елементів або їх менше кількість, достатньо сировинна база (для розширення сфер асіміляції і доступності);
- коефіцієнт термо-ЕРС: бажаний якомога вищий коефіцієнт термо ЕРС

(для спрощення конструкції);

– токсичність, Бажано відсутність або малий вміст токсичних елементів (наприклад: свинець, вісмут, телур, селен) або їх інертний стан (в складі сплавів);

– робочі температури: Бажаний якомога ширший температурний діапазон для використання високо потенційного тепла і, отже, збільшення теплової потужності.

## **2.4 Використання в виробничих приміщеннях**

Так як робота елемента Пельтьє ґрунтується на різниці температур, то одним з перспективних місць для застосування будуть регіони з холодним кліматом а, отже, створюється необхідна різниця температур. Зовні температура може опускатися нижче 20 градусів за Цельсієм, але в приміщення вона повинна залишатися комфортною для людини. З цього положення можна отримати вигоду, помістивши на стику різниці температур елементи Пельтьє. За рахунок цього можна значно знизити енерговитрати в холодну пору року, отримуючи і при необхідності запасуюча електроенергію .

Але елемент Пельтьє не обов'язково використовувати в зонах з холодним кліматом, його так само можна застосувати в областях з гідротермальних джерелами, де стик температур буде з'являтися від гарячої води з одного боку і охолоджуючим радіатором, з іншого боку. За рахунок цієї різниці можна отримати непоганий запас потужності, яку можна використовувати, наприклад, для живлення устаткування, що експлуатується для вивчення цих самих джерел.

Одним із прикладів хотілося б привести на мою думку найефективніше використання елементів Пельтьє.

Одним з таких прикладом є вимушені охолоджувальні установки, завдання якої полягає в підтримці низької температури в приміщеннях для зберігання продуктів харчування (рис. 2.5).

Справа в тому, що раположені в стінах такого приміщення елlementи Пельтьє так, щоб одна сторона виходила радіатором в саме приміщення а інша в навколишнє середовище або ж за стіною цього приміщення є інший склад в якому необхідно підтримання комфортної для людини температури. У такому випадку вся стіна приміщення буде працювати як пасивний термогенератор. Виробляючи без будь-яких доданих усілілій або ресурсів із зовні – електроенергію що може піти на потреби підприємства.



Рисунок 2.5 – Виробниче приміщення примусового холоду.

Або ж зворотна сторона, коли всередині приміщення тепло а температура окружающей середовища нижче нуля, все за тим же принципом можна використовувати різницю температур в якості термогенератора.

Багато галузь де можна використовувати карисні властивості елементів Пельтьє, але для цього необхідно вносити корективи на стадії будівництва.

## 2.5 Види елементів Пельтьє

У сучасних інтернет-магазинах можна знайти найрізноманітніші термоелектричні модулі Пельтьє. Відрізняються один від одного вони будуть – електричними параметрами, розміром, температурними характеристиками, і кількістю термопар, які встановлені всередині модуля.

На (рис. 2.6) зображений звичайний одношаровий термоелектричний модуль Пельтьє. Можна побачити дві керамічні пластини (з оксиду алюмінію) товщиною менше 1 мм знаходяться у верхній і в нижній частині модуля. Вони, як друкована плата, служать каркасом для всього модуля опорою для внутрішніх термопар.

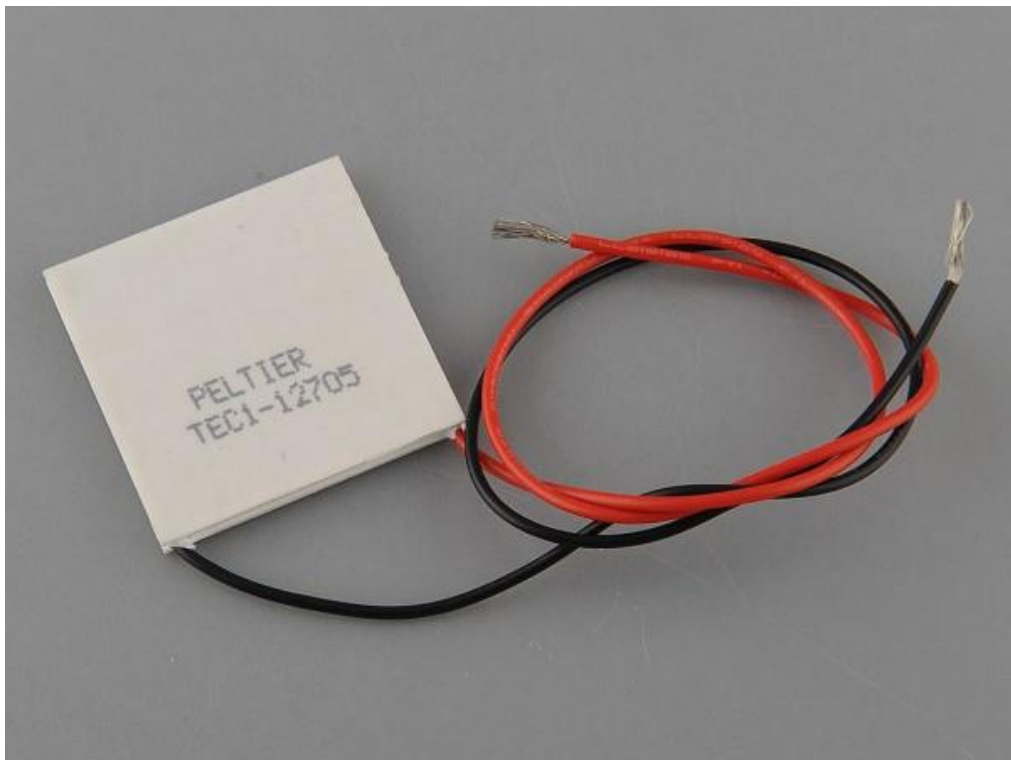


Рисунок 2.6 – Одношаровий термоелектричний модуль Пельтьє

У керамічній пластині зазвичай висока теплопровідність, відрізняються вони вогнестійкістю міцністю. До пластин прикріплені мідні підкладки, припаяні напівпровідникові термопари, які з'єднані послідовно.

Пайка напівпровідникових термопар, при промисловому виробництві

модулів Пельтьє, відбувається легкоплавким припоєм на спеціальному обладнанні при температурі приблизно 145 °С, так як напівпровідникові елементи не допускають перегріву. З перерахованого вище випливає, що модулі виходять нерозбірними, а на краю зазвичай наноситься силіконовий герметик.

Якщо заради цікавості розібрати такий модуль, то можна побачити кубики різнорідних напівпровідників (р-типу n-типу), які припаяні до мідних підкладок, а також з'єднані один з одним в послідовний ланцюг змійкою. Можна помітити, що відразу на мідні підкладки було завдано легкоплавкий припій, а тільки потім встановлені складові частини термопар.

Якщо зробити все в такому виконанні як на наведеному фото (рис. 2.7), то вийде 127 рn- і 127 пр-переходів, причому всі пр-переходи (для напрямку струму від плюса до мінуса) знаходяться з одного боку модуля, а все рn-переходи – на іншій його стороні.

На мідних шинах, де струм пересувається в напрямку n-р-переходу, тепло поглинається (відбувається швидке охолодження даної боку модуля), а там, де струм пересувається в напрямку р-n-переходу – ця ж (теоретично) тепло виділяється. Даним чином модуль Пельтьє переносить тепло з одного керамічної пластини – на іншу.

Один з найбільш популярних одношарових модулів TEC1-12705, вартістю близько 60 гривень, користується особливим попитом на сайті Аліекспрес. Розміри модуля 40 на 40 мм, товщина 3,8 мм. 127 з'єднаних послідовно термопар при температурі навколишнього середовища в 25°C дають внутрішній опір модуля від 2,5 до 2,8 Ом.

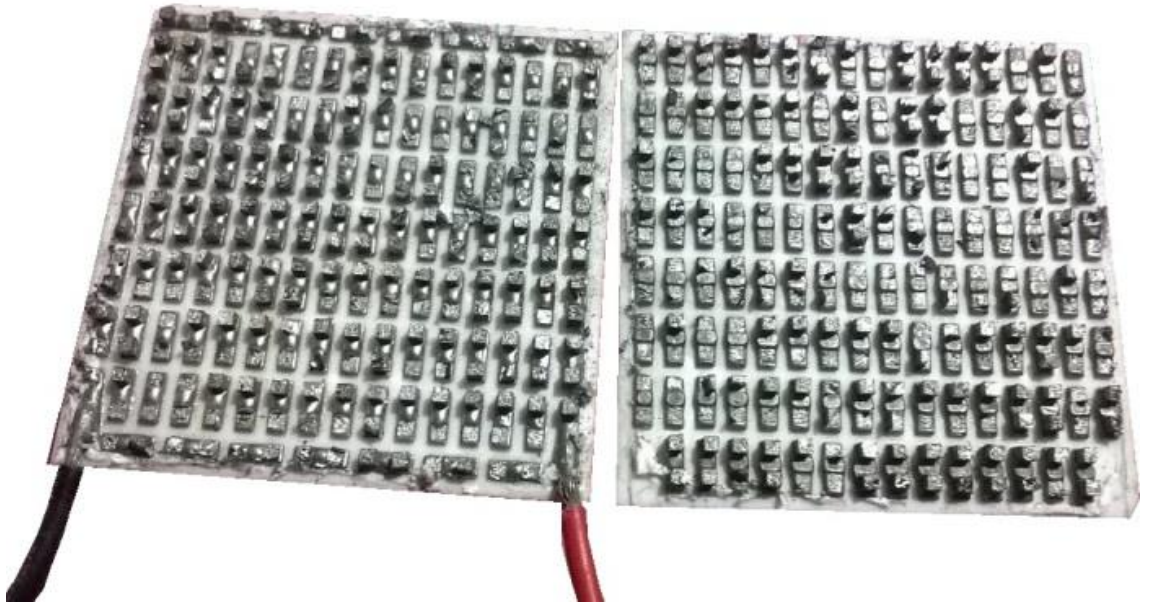


Рисунок 2.7 – Елемент Пельтье в розібраному стані

Робочий струм пристрою приблизно 4,3 – 4,6 А при харчуванні номінальною напругою 12 вольт. Максимальна напруга становить 15,4 вольт при критичному струмі в 5,8 А. Гранична різниця температур становить 65 °С, а найбільша холодильна потужність 42 Вт. Діапазон робочих температур модуля – від -55 до 85 °С.

На рисунку (рис. 2.8) ми бачимо двошаровий модуль TEC2-25408, що складається, з двох модулів TEC1-12704, з'єднаних паралельно, але розміри становлять 40 x 40 мм, а товщина 8 мм. Даний двошаровий охолоджувач здатний видати до 70 Вт холодильної потужності при використанні 96 Вт електричної потужності.

Його внутрішній опір в знеструмленому стані становить приблизно 1,5 Ом. Гранично допустима різниця температур в робочому режимі 65 °С. З цього можна зрозуміти, що при однаковій граничній різниці температур з модулем TEC1-12705, двошаровий модуль TEC2-25408 буде охолоджувати (перекачувати тепло) набагато швидше (приблизно в півтора рази).



Рисунок 2.8 – Двошаровий модуль елементів Пельтьє

На (рис. 2.9) представлений чотирьохшаровий модуль TEC4-24603 шириною 40 мм, товщиною 13,6 мм, розрахований на напругу 14,6 вольт і номінальний струм в 3 А. При споживаній електричній потужності в 44 Вт, модуль здатний забезпечити холодильну потужність 6,8 Вт і різницю температур до 107 °С.

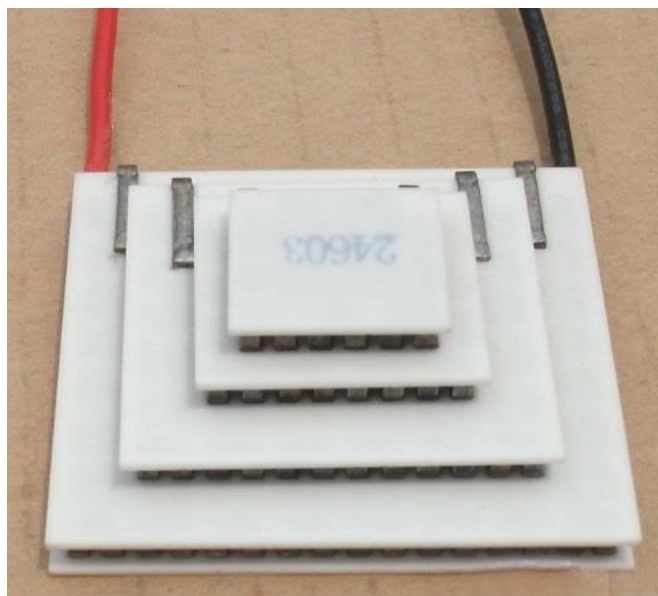


Рисунок 2.9 – Чотирьохшаровий модуль елемента Пельтьє

Основні елементи включені тут послідовно. Як і будь-який з модулів Пельтьє, дана чотиришарова модель не дозволяє застосування без радіатора на час більше однієї секунди.

На даному етапі ми бачимо шестишаровий модуль Пельтьє TEC6-60506 (рис. 2.10), який розрахований на номінальну напругу 30 вольт і струм 6 А. При товщині в 23 мм і ширині в 62 мм, даний модуль електричною потужністю 180 Вт може забезпечити різницю температур до  $100^{\circ}\text{C}$ , а з холодильною потужністю в 10 Вт. Модуль такого типу можна застосовувати в установках, які призначені для глибокої заморозки.



Рисунок 2.10 – Шестишаровий модуль елементів Пельтьє

## 2.6 Сфери використання

Щоб застосовувати елемент Пельтьє на практиці, вчені провели кілька дослідів, які показали, що підвищення відведення тепла виходить при

збільшенні числа з'єднань 2-х матеріалів. Чим більше число спаїв матеріалів, тим вище ефект. Набагато частіше в житті такий елемент служить для охолодження пристроїв електронного типу і для зменшення температури в мікросхемах.

Ось деякі області їх використання:

- пристрій нічного бачення;
- цифрова камера;
- прилад зв'язку;
- мікросхеми які потребують якісного охолодження;
- телескоп з охолодженням;
- кондиціонер;
- точні годинники, система охолодження кварцового електричного генератора;
- холодильник;
- кулер для води;
- автомобільний холодильник;
- відеокарта.

Елементи Пельтьє досить часто можна побачити в системах охолодження, кондиціонування. Можна досягти досить низьких температур, що дозволяє відкрити можливість застосування для охолодження обладнання з підвищеним нагріванням.

Зараз фахівці використовують елементи Пельтьє в акустичних системах, що виконують роль кулера. Елементи Пельтьє не створюють ніяких звуків, тому безшумність відноситься до одних з їхніх достоїнств. Дана технологія стала популярною через сильну віддачу тепла. Елементи, які були виготовлені за сучасною технологією, мають компактні розміри, радіатори охолодження підтримують потрібну температуру довгий час.

Ще однією перевагою елементів є тривалий термін служби, так як елементи зроблені у вигляді монолітного корпусу, несправності дуже малоймовірні. Ця конструкція звичайного і широко застосовується виду

проста. Вона складається з двох мідних проводів з проводами і клемми, і ізоляцією з кераміки.

На даний момент конструкція не має великий перелік застосування. Він розширюється за рахунок пристроїв побутового призначення, автомобілів, комп'ютерів. Але можна помітити, що елемент Пельтьє використовується в охолодженні мікропроцесорів з високою продуктивністю. Раніше в мікропроцесори встановлювалися тільки вентилятори. Тепер, при установці модуля з елементами Пельтьє значно знизився шум в роботі пристроїв.

Якщо задуматися над питанням, чи будуть змінюватися схеми охолодження в звичайних холодильниках на схеми з використанням ефекту Пельтьє? На сьогоднішній день навряд чи це можливо, через те, що елементи мають низький ККД. Так як вартість схем з використанням ефекту Пельтьє досить висока, їх не зможуть використовувати в холодильниках.

## **2.7 Висновки до розділу**

У цьому розділі були розглянуті сфери використання елементів Пельтьє, їх різновид та технологічна значимість для функціонування у обмежених рамках корпусу комп'ютерах, носимих пристроях, холодильниках. Також методи відновлювання електроенергії за допомогою ефекту Зеєбека.

Передбачається використовувати автономні радіатори опалення з вбудованими елементами Пельтьє, одночасно з іншими джерелами альтернативної енергії, а не окремо.

Саме такий підхід дозволить кожному з поновлюваних джерел енергії виключити недоліки один одного, максимально ефективно.

Поки відбувається опалення будинку, елементи Пельтьє зможуть повертати частину використаної теплової енергії в електричну відразу в мережу або акумулюючи її. Незалежно від того чи є на вулиці вітер для вітрогенераторів або сонячне світло для панелей.

## 3 РОЗРОБКА ВИПРОБУВАЛЬНОГО СТЕНДУ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Конструкція елемента Пельтьє

В реальному перетворювачі Пельтьє, між двома керамічними підкладками встановлені декілька паралелепіпедів із телуриду вісмуту і твердого розчину кремнія і германія, з'єднаних між собою послідовно (рис 3.1). Ці пари напівпровідників n- і р-типу з'єднані за допомогою провідних перемичок, котрі контактують з керамічними підкладками.

Кожна пара маленьких напівпровідникових паралелепіпедів утворює контакт для проходження струму від напівпровідника n-типу до напівпровідника р-типу з одного боку перетворювача Пельтьє і від напівпровідника р-типу до напівпровідника n-типу з іншого боку перетворювача. Опір звичайного елемента Пельтьє знаходиться в районі декількох Ом.

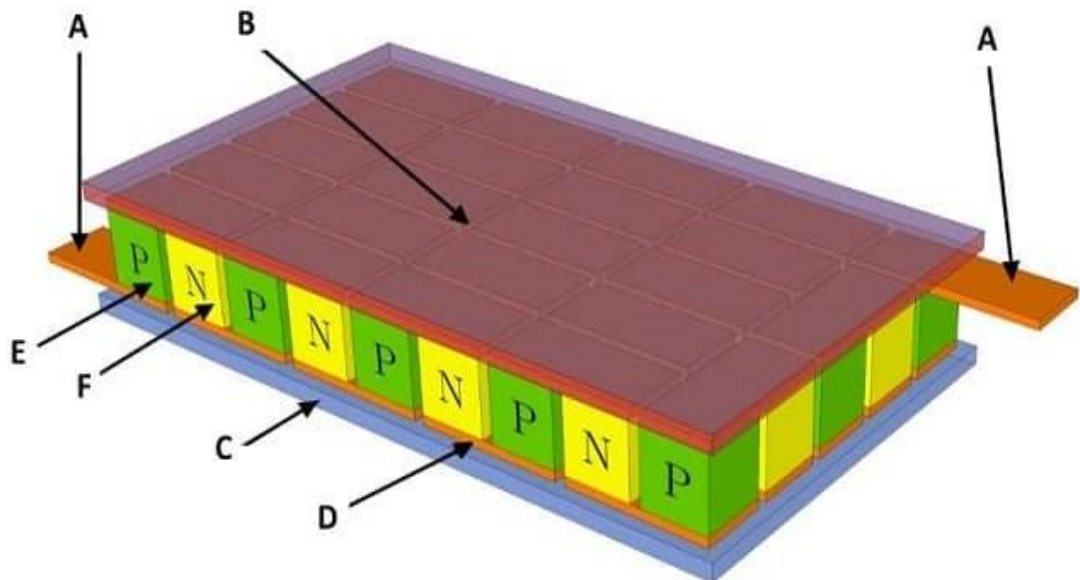


Рисунок 3.1 – Пристрій модульного елемента Пельтьє

Позначення на (рис 3.1): А – контакти для підключення до джерела живлення; В – гаряча поверхня елемента; С – холодний бік елемента; D – мідні провідники; E – напівпровідники на основі р – переходу; F – напівпровідники на основі р – переходу.

Переваги елемента Пельтьє:

- малі розміри;
- відсутність рухомих частин;
- відсутність газів і рідин;
- відсутність шуму;
- можливе як охолодження так і нагрівання;
- простота конструкції;
- стійка до вібрацій.

Недоліки елемента Пельтьє:

- мала ККД;
- обмежена температура нагріву (менша температури плавлення припою);
- складна система відведення тепла від гарячої поверхні.

Матеріал для елемента Пельтьє повинен одночасно володіти двома взаємо виключеними властивостями – добре проводити електричний струм, але погано проводити тепло, оскільки вільні електрони в речовині переносять не тільки електричний заряд, а й тепло.

Для серійного виготовлення термогенераторів використовують спеціальні модулі з тугоплавким припоєм, їх можна нагрівати до температури 300°C. В звичайних елементах, наприклад ТЕС1-12706, обмеження 150°C

В даному проекті в якості елемента Пельтьє будемо використовувати ТЕС1-12706, який має наступні характеристики (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1. Характеристики модуля TEC1-12706.

Температура гарячого боку (°C)	25°C	50°C
$Q_{max}$ (Ватт)	50	57
$\Delta T_{max}$ (°C)	66	75
$I_{max}$ (А)	6,4	6,4
$V_{max}$ (В)	14,4	16,4
Опір модуля (Ом)	1,98	2,30

Елемент Пельтьє знайшов застосування в даний час в створенні портативних холодильників. Обернений процес дає змогу виготовляти мікроелектростанції, для заряду акумуляторів електронних приладів .

На відміну від інших способів альтернативного отримання електроенергії, вони можуть працювати під час руху, якщо встановити каталітичний нагрівач.

Щоб збільшити ККД роботи елемента Пельтьє, доцільно прикріпити до однієї сторони охолоджувальну систему, яка складається з радіатора і кулера. Це забезпечить нам більшу різницю температур на пластинах. Щоб не перегріти нашій термоелектричний елемент, до сторони яку будемо нагрівати прикріпимо алюмінієву пластину, тобто будемо гріти сторону елемента Пельтьє опосередковано. Було б доцільніше вибрати мідь, оскільки вона має більшу теплопровідність ніж алюміній, але з огляду на економічну складову проекту, більш вигідніше використовувати алюміній. В кінчному вигляді модуль Пельтьє матиме наступний вигляд (рис. 3.2).

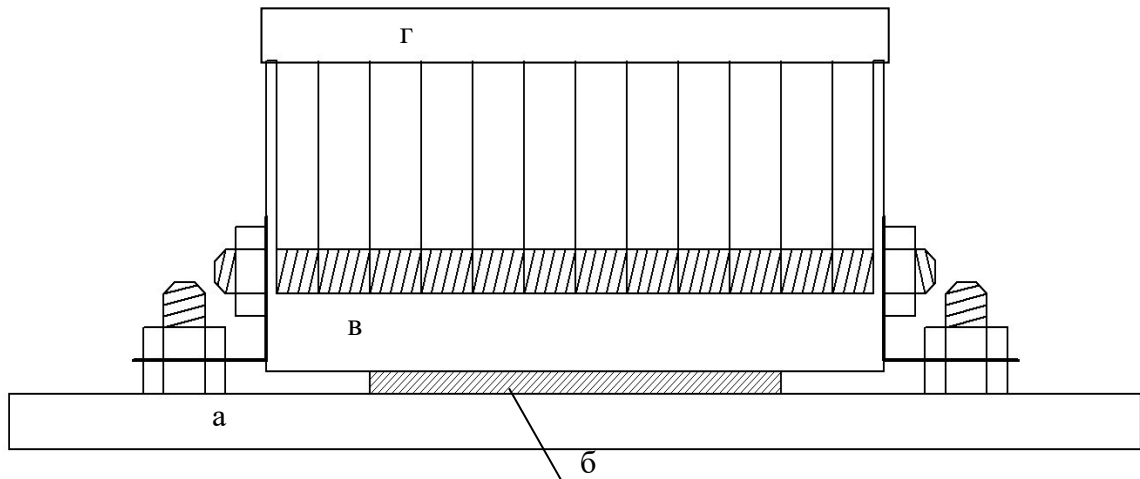


Рисунок 3.2 – Елемент Пельтьє (б) з охолоджуваною системою в виді радіатора (в) та кулера (г) і алюмінієвою пластиною (а)

### 3.2 Розробка конструкції дослідного макету

При побудові випробувального стенду було використано:

- два елементи Пельтьє 12706
- два комп'ютерних радіатора
- куллер
- два термометра
- вольтамперметр цифровий
- резистор номіналом 10 Ом

Оскільки випробування проводилися на одних з найбільш поширених і недорогих елементів необхідно було встановити, чи зможуть вони виробляти достатньо електроенергії в умовах невеликих перепадів температур. Як їх і передбачається використовувати.

Для отримання різниці температур використовувався фен від паяльної станції який був спрямований на одну сторону елементів Пельтьє, а радіатор примусового охолодження з куллером на протилежну (рис. 3.3). Елементи Пельтьє були скріплені між двома радіаторами і щільно притиснуті, а також змащені термопастой.

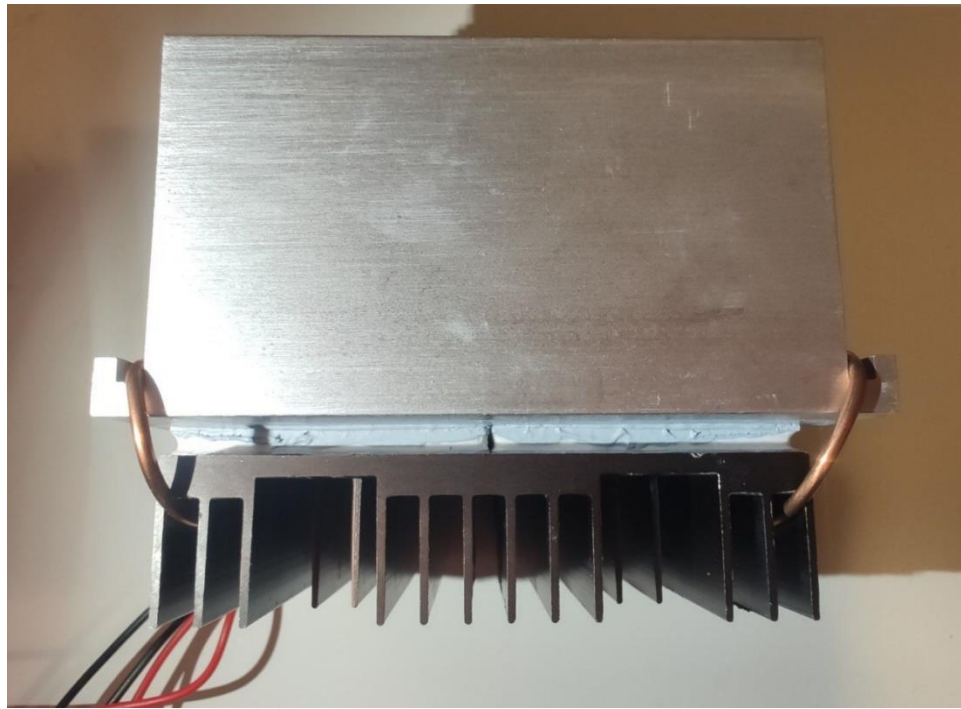


Рисунок 3.3 – Скріплені елементи Пельтьє між радіаторами

Була поставлена мета – домогтися різниці температур в 60 градусів Цельсія і зробити вимір виробленої потужності.

За результатами експерименту можна замінити явне зниження виділяється потужність після подолання порогу різниці температур в 30 градусів Цельсія. Але оскільки ми збираємося використовувати даний пристрій будинку, де середня температура повітря 20 градусів, а середня температура радіаторів опалення 45 градусів Цельсія.

За підсумком отримуємо різницю температур в 25 градусів Цельсія, що укладається в високопродуктивний пік при малих різницях температур необхідний для елементів Пельтьє.

Як виглядає стенд у зібраному стані (рис. 3.4).

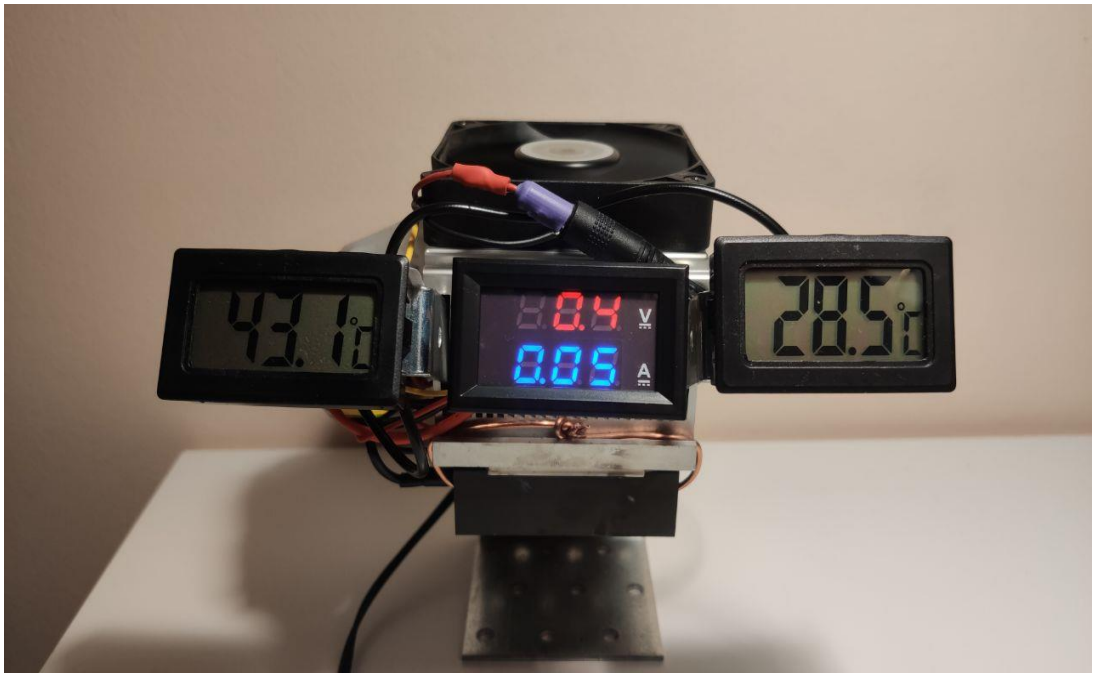


Рисунок 3.4 – Стенд у зібраному стані

### 3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі були розглянуті етапи розробки навчального стенду для проведення експерименту. Для фіксування параметрів вольтамперметра та двох термометрів стенду, весь процесі роботи був заснятий на відео.

Була поставлена мета створити таблицю залежності різниці температур та виділяємої потужності. Для цього поступово створювали різницю температур за допомогою термостанції зі сторони гарячої поверхні радіатора, та охолоджували за допомогою активного обдуву кулером зі сторони холодного радіатора.

## 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

### 4.1 Розробка друкованої плати пристрої

На друкованій платі кріпляться всі необхідні елементи і деталі, що з'єднуються між собою друкованими провідниками.

В даному підрозділі ми проведемо аналіз конструкції друкованої плати і визначимо її мінімальні розміри. На (рис.4.1) наведемо рисунок друкованої плати модуля контролю та передачі даних.

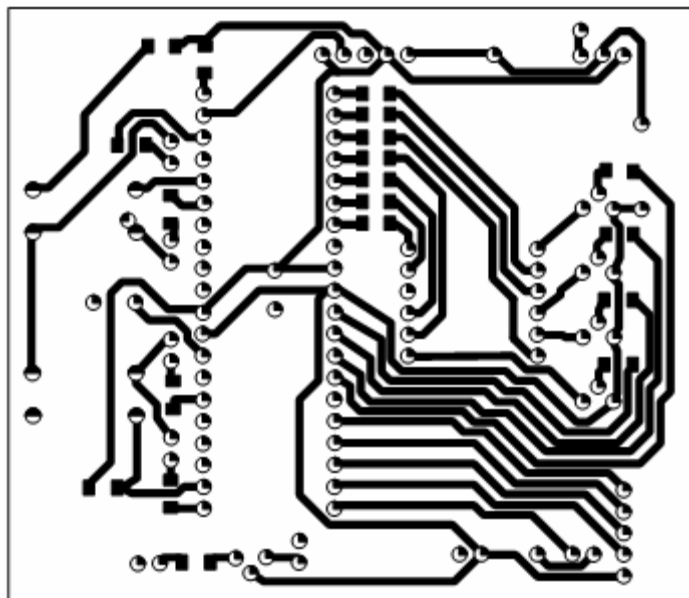


Рисунок 4.1 – Друкована плата модуля контролю та передачі даних

#### 4.1.1 Аналіз конструкції друкованої плати

При конструюванні друкованої плати визначаються її конфігурація і габаритні розміри, здійснюються раціональне розміщення елементів і трасування з'єднань між ними, розробляється конструкторська документація.

Вибір форми та розрахунок габаритних розмірів друкованої плати. Розміри кожного боку друкованої плати повинні бути кратними: 2.5 – при довжині до 100 мм; 5.0 – при довжині до 350мм; 10 – при довжині понад 350

мм. Максимальний розмір будь-якої зі сторін має бути не більше 470 мм. Співвідношення лінійних розмірів сторін друкованої плати повинне бути не більше 3: 1.

#### 4.1.2 Визначення мінімальних розмірів друкованої плати

Зробимо визначення мінімальних розмірів друкованої плати модуля управління по формулі (4.1):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{K_3}, \quad (4.1)$$

де  $\sum S_i$  – повна площа, яку займає ЕРЕ модуля (табл. 4.1);

$K_3$  – коефіцієнт заповнення, що залежить від типу елементної бази та функціонального призначення апаратури (для стаціонарної наземної РЕА приймаємо рівним 0,5).

Для визначення мінімальних розмірів друкованої плати необхідно розрахувати площу, займану електрорадіоелементами (ЕРЕ) модуля. Наведемо таблицю площі і маси ЕРЕ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Площа ЕРЕ модуля

Перелік елементів	Кол, шт.	Площа одного елемента, мм <sup>2</sup>	Площа всіх елементів, мм <sup>2</sup>
Резистор	27	13,2	356,4
Конденсатор	6	40	240
ADM483EANZ	1	26	26
MAX232	1	50	50
Світлодіод	4	2,5	10

Продовження таблиці 4.1

Транзистор	4	3,75	15
BQ-N516RD R	1	750	750
Кнопка	2	100	200
PIС16F877А	1	600	600
РС 817	3	20	60
RR4-433	1	60	60
RT5-433	1	250	250
Кварцовий резонатор	1	40	40
Разом	53		2457,4

$$S_{\text{пл}} = 2457,4 / 0,5 = 4914,8 (\text{мм}^2)$$

Виходячи з попередньої компоновки пристрою, виконаної при його макетування приймаємо  $a = 80\text{мм}$  и  $b = 65\text{мм}$ .

#### **4.2 Розрахунок параметрів рисунку з урахуванням технологічних похибок його отримання**

Вихідними даними для розробки конструкції модуля з друкованим монтажем є:

- схема електрична принципова;
- перелік ЕРЕ;
- геометричні розміри друкованої плати.

При виборі матеріалу для виготовлення друкованої плати слід враховувати:

- метод отримання друкованих провідників;
- надійність контактних з'єднань друкованих провідників з основою;
- товщину друкованих провідників;
- вимоги до теплостійкості;
- хімічної стійкості;
- до вологопоглинання;
- діелектричної проникності;
- до тангенсу кута діелектричних втрат;
- тип підстави;
- допустима кількість шарів;
- допустима кількість перепайок;
- вартість матеріалів і т.д.

З огляду на перелічені рекомендації та вимоги щодо розроблюваного модуля, в якості матеріалу найбільш підходить стеклотекстолит фольгований СФ-1-35, який і вибирається для виготовлення друкованої плати.

Друковану плату будемо виготовляти комбінованим методом. Суть методу полягає в наступному: проводиться хімічне осадження міді в отворах і захист провідного рисунка металом; виборче травлення незахищених ділянок фольги. Перевагою даного методу є те, що діелектрик, що захищається, в процесі виготовлення друкованої плати не піддається дії хімікатів.

Зробимо розробку друкованої плати.

Крок координатної сітки – постійна величина, яка визначає відстань між сусідніми лініями координатної сітки і кратність відстаней між монтажними отворами.

Початком координатної сітки вважаємо лівий нижній кут плати з осями, паралельними її сторонам. Крок координатної сітки розрахуємо за формулою (4.2):

$$\text{Ш} = t + d, \quad (4.2)$$

де  $t$  – ширина друкованого провідника в мм, що залежить від струму;

$d$  – відстань між друкованими провідниками.

З огляду на значення робочої напруги і струмів навантаження, конструкцію висновків електрорадіоелементів, прийнявши ширину друкованого провідника  $t = 0,25$  мм (що відповідає класу точності 3), відстань між друкованими провідниками дорівнюватиме  $d=0,25$  мм.

Тоді крок координатної сітки буде дорівнює:

$$\text{Ш} = 0,25 + 0,25 = 0,5 \text{ (мм)}$$

Отже, вибираємо стандартний крок координатної сітки 0,5 мм.

Номінальне значення діаметра монтажного отвору (для установки навісного елемента) розраховується за формулою (4.3):

$$d = d_{\text{э}} + r + |\Delta d_{\text{НО}}|, \quad (4.3)$$

де  $d_{\text{э}}$  – максимальне значення діаметра виведення навісного елемента (1мм);

$r$  – різницю між мінімальним значенням діаметра отвору і максимальним діаметром виводу встановлюваного елемента (0,25мм);

$\Delta d_{\text{НО}}$  – нижнє граничне відхилення номінального значення діаметра отвору (0,15мм).

Розрахуємо діаметр монтажного отвору по формулі 4.3:

$$d = 1 + 0,25 + 0,15 = 1,4 \text{ (мм)}.$$

Номінальне значення ширини провідника розраховуємо за формулою 4.4:

$$t = t_{\text{МД}} + |\Delta t_{\text{НО}}|, \quad (4.4)$$

де  $t_{MD}$  – мінімально допустима ширина провідника (0,25мм);

$\Delta t_{HO}$  – нижнє граничне відхилення ширини провідника (- 0,08мм).

$$t = 0,25 + 0,08 = 0,33(\text{мм}).$$

Номінальне значення відстані між елементами провідного рисунка розраховується за формулою 4.5:

$$S = S_{MD} + \Delta t_{BO}, \quad (4.5)$$

де  $S_{MD}$  – мінімально допустима відстань між елементами проводить рисунка (0,25мм);

$\Delta t_{BO}$  – верхнє граничне відхилення ширини провідника (0,1мм).

$$S = 0,25 + 0,1 = 0,26(\text{мм}).$$

Діаметральна значення позиційного допуску розташування центрів отворів щодо номінального положення вузла координатної сітки:

$$\delta_p = 0,08 (\text{мм}).$$

Діаметральна значення позиційного допуску розташування контактних площадок щодо їх номінального положення:

$$\delta_d = 0,2 (\text{мм}).$$

Діаметр контактної площадки розраховується за формулою 4.6:

$$D=(d+\Delta d_{B,O})+2b_H+\Delta t_{H,O}+2\Delta d_{TP}+(\delta d^2+\delta p^2+\delta t_{HO}^2)^{0,5}, \quad (4.6)$$

де  $\Delta d_{B,O}$  – граничне відхилення (0,05мм);

$b_H$  – ширина гарантованого паска (0,1мм);

$\Delta d_{TP}$  – глибина подравливання діелектрика (0).

$$D = (1,4+0,05)+2 \times 0,1 - 0,08+2 \times 0+(0,04+0,0064-1,4 \times 0,0064)^{0,5}=1,78(\text{мм})$$

Мінімальне значення діаметра монтажного отвору (для установки навісного елемента) зчитуємо по формулі 4.3:

$$d = 0,5 + 0,2 + 0,15 = 0,85(\text{мм}).$$

Наведемо таблицю діаметрів отворів в ПП (табл.4.2).

Таблиця 4.2 – Діаметри отворів в друкованій платі

Максимальний діаметр виведення навісного елемента, мм	Номінальний діаметр монтажного отвору, мм	
	Неметалізованого	Перехідного з урах. металізації
0,4-0,6	0,9	0,8
0,6-0,8	1,1	1,0
0,8-1,3	1,6	1,5

Діаметри отворів в друкованій платі рівні 0,6мм.

Зробимо розрахунок мінімального діаметра контактної площадки навколо монтажного отвору.

При  $d=0,6$  (мм):

$$D_{0,6} = (0,6+0,25+0,15)+0,05+2 \times 0,1+0,1+(0,2^2+0,08^2+0,08^2)^{0,5}=1,58(\text{мм}).$$

### 4.3 Оцінка надійності по раптовим експлуатаційним відмов

Надійність – це властивість виробу виконувати задані функції в певних умовах експлуатації при збереженні основних параметрів в заданих межах.

Надійність характеризується рядом розрахункових показників, найбільш важливими з яких є: інтенсивність відмов, середнє напрацювання на відмову, імовірність безвідмовної роботи.

Імовірність безвідмовної роботи вказує на те, яка частина виробів буде працювати безвідмовно протягом заданого часу  $t_p$ . Для більшості радіоелектронних пристроїв ймовірність безвідмовної роботи залежить, як від фізичних властивостей, так і від часу  $t_p$ , протягом якого пристрій повинен працювати безвідмовно:

$$P(t) = e^{-\lambda \times t_p} \quad (4.7)$$

Інтенсивністю відмов називають кількість відмов за одиницю часу, що припадає на один виріб, який продовжує працювати в даний момент часу:

$$\lambda = \frac{n}{N \times t_p} \quad (4.8)$$

Інтенсивність відмов апарата, який складається з  $N$  різних елементів, визначають за формулою:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_N = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (4.9)$$

Надалі проводимо Розрахунок надійності. Складаємо таблицю вихідних даних для розрахунку, визначаємо конструктивну характеристику

компонентів, кількість компонентів по групах, розраховуємо інтенсивність відмов  $\lambda_i$  для кожної з груп компонентів

$$\lambda_s = \lambda_i \times N \times \alpha_i, \quad (4.10)$$

де  $N$  – кількість компонентів в одній групі.

Вихідні дані для розрахунку надійності зводимо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Вихідні дані розрахунку надійності

№	Назви груп компонентів	$N$ , шт.	$\lambda_i$ $1/час.$	$\alpha_i$	$\lambda_s$ $1/час.$
1	Резистори постійні	27	0,4	0,42	4,536
2	Мікросхеми	2	0,01	0,85	0,017
3	Конденсатори електrolітичні	6	2,2	0,4	5,28
4	Транзистори	4	1,7	0,35	2,38
5	Індикатор	1	2,75	0,81	2,23
6	Кнопки	2	3,7	0,5	3,7
7	Мікросхема PIC16F877A	1	0,01	0,85	0,0085
8	Кварцовий резонатор	1	1,7	0,35	0,595
9	Світлодіод	4	0,7	0,44	1,232
Разом					19,9785

Для врахування умов експлуатації знаходимо поправочні коефіцієнти  $K_e$ ,  $K_m$ ,  $K_a$  і розраховуємо поправочний коефіцієнт  $K_\lambda$ . Приймаємо  $K_e = 1.0$ ,  $K_m = 1.0$ ,  $K_a = 1.0$ .

$$K_\lambda = K_e \times K_m \times K_a, \quad (4.11)$$

$$K_\lambda = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 1.0$$

Розрахунок інтенсивності відмов проводимо по формулі:

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_m) \times K_\lambda = K_\lambda \times \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (4.12)$$

$$\lambda = 19,9785 \times 10^{-6} \text{ (1/час)}.$$

Середню напрацювання на відмову розраховуємо за формулою:

$$T_{cp.} = \frac{1}{\lambda}, \quad (4.13)$$

$$T_{cp.} = \frac{1}{19,9785 \times 10^{-6}} = 50053 \text{ (час)}.$$

Проводимо розрахунок імовірності безвідмовної роботи пристрою за формулою (4.4):

$$P(t) = e^{-\lambda \times t_p}, \quad (4.14)$$

де  $e$  – основа натурального логарифму;

$\lambda$  – інтенсивність відмов;

$t_p$  – час випробування.

Результати розрахунків безвідмовної роботи пристрою 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку надійності

№	$t_p$	$-\lambda \times t_p$	$P_{(t_p)}$
1	0	0	1
2	$10^1$	-0,0000199785	0,9999
3	$10^2$	-0,000199785	0,999
4	$10^3$	-0,00199785	0,99
5	$10^4$	-0,0199785	0,98
6	$10^5$	-0,199785	0,82

#### **4.4 Висновки до розділу**

У цьому розділі був проведений аналіз конструкції друкованої плати і визначення її мінімальний розмір. При конструюванні друкованої плати були визначені її конфігурація і габаритні розміри, здійснене раціональне розміщення елементів і трасування з'єднань між ними.

Вихідними даними для розробки конструкції модуля з друкованим монтажем стали:

- схема електрична принципова;
- перелік ЕРЕ;
- геометричні розміри друкованої плати.

Проведені розрахунки оцінки надійності по раптовим експлуатаційним відмовам.

## 5 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНИХ ДАНИХ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ

### 5.1 Експериментальне підтвердження результатів

Для випробувань був створений стенд, що складається з нагрівальної алюмінієвої пластини з двома нагрівачами і охолоджуючого комп'ютерного кулера. Між ними елемент Пельтьє, підключений до активної навантаженні. Активне навантаження – це не просто резистор, струм через який змінюється від прикладеної напруги, це пристрій споживає стабільний заданий струм незалежно від прикладеної напруги. За допомогою вольтметра і амперметра можна виміряти параметри електричного струму, що виробляється елементом Пельтьє, в тому числі і видається потужність.

Температуру вимірювали за допомогою термопар, підключених до мультиметра. Для цього в підставі радіатора і в нагрівальній пластині були просвердлені по одному поздовжньому отвору, діаметром 2 мм і глибиною близько 10 ... 15 мм. Отвори заповнювалися термопастой КПТ-8, а за тим в них містилися термопари.

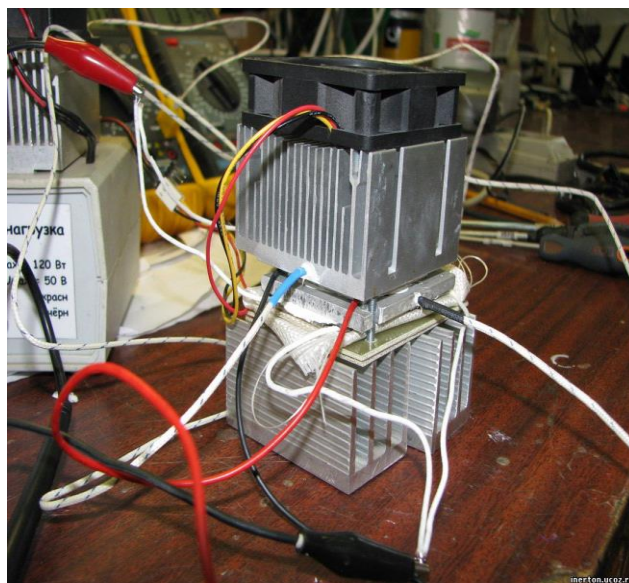


Рисунок 5.1 – Випробувальний стенд – термогенератор, на основі

## елемента Пельтьє.

Повністю зібраний стенд виглядає так (рис 5.1) Знизу нагрівачі прикриті декількома шарами склотканини і склотекстоліти. Далі подаємо напругу на нагрівачі, включаємо активне навантаження, вольтметр, амперметр і термометри і починаємо експеримент. Регулюючи напругу блоку живлення, виставляємо певну потужність нагріву гарячої сторони елемента Пельтьє. На активному навантаженні теж є ручка регулювання споживаного струму.

Таблиця 5.1 – ККД термоелектричного експерименту ТЕС1-12706

Потужність нагрівання, Вт	Струм елемента Пельтьє, А	Напруга на елементі Пельтьє, В	Потужність елемента Пельтьє, Вт	ККД, %	$\Delta T$ , °C	Ефективність, мВт / °C	Питома ефективність, Вт / (°C * кг)
45,2	0,134	1,94	0,26	0,567	60	4,333	0,173
	0,253	1,57	0,397	0,879	62	6,403	0,256
	0,501	0,67	0,336	0,744	63	5,333	0,213
	0,603	0,26	0,157	0,348	62	2,532	0,101
63,8	0,135	2,61	0,352	0,551	78	4,513	0,181
	0,253	2,41	0,61	0,956	83	7,349	0,294
	0,503	1,55	0,78	1,222	85	9,176	0,367
	0,798	0,35	0,279	0,437	85	3,282	0,131
99,9	0,134	3,88	0,52	0,521	108	4,815	0,193
	0,254	3,48	0,884	0,885	121	7,306	0,292
	0,499	2,45	1,223	1,224	126	9,706	0,388
	0,907	0,4	0,363	0,363	126	2,881	0,115

Як видно, ККД даного процесу перетворення (таблиця 5.1) тепла в електрику дуже малий. Звичайно мої дані трохи занижені, оскільки не все тепло, що виробляється нагрівачами, проходило крізь елемент Пельтьє. Деяка його частина розсіюється в навколишнє середовище, але для приблизної прикидки мої дані підходять. Але цікаві не просто цифри ККД і, отже,

вироблюваної потужності, а їх залежність від струму в ланцюзі. Якщо побудувати графіки залежності потужності елементів Пельтьє від струму, то ми бачимо явний максимум близько 0,5 А для ТЕС1-12706 і близько 0,8 А для ТЕС1-12709. Причому, з ростом різниці температур на сторонах елементу максимум зміщується в бік великих струмів.

Найцікавіший і показовий параметр даних таблиць – це ефективність. Ефективністю в цих експериментах я назвав потужність виробляється електричного струму даними елементом при різниці температур на його гарячою і холодною сторонах в 1 °С. На графіку видно, що залежність ефективності від струму теж має яскраво виражений максимум, (рисунок 5.2)

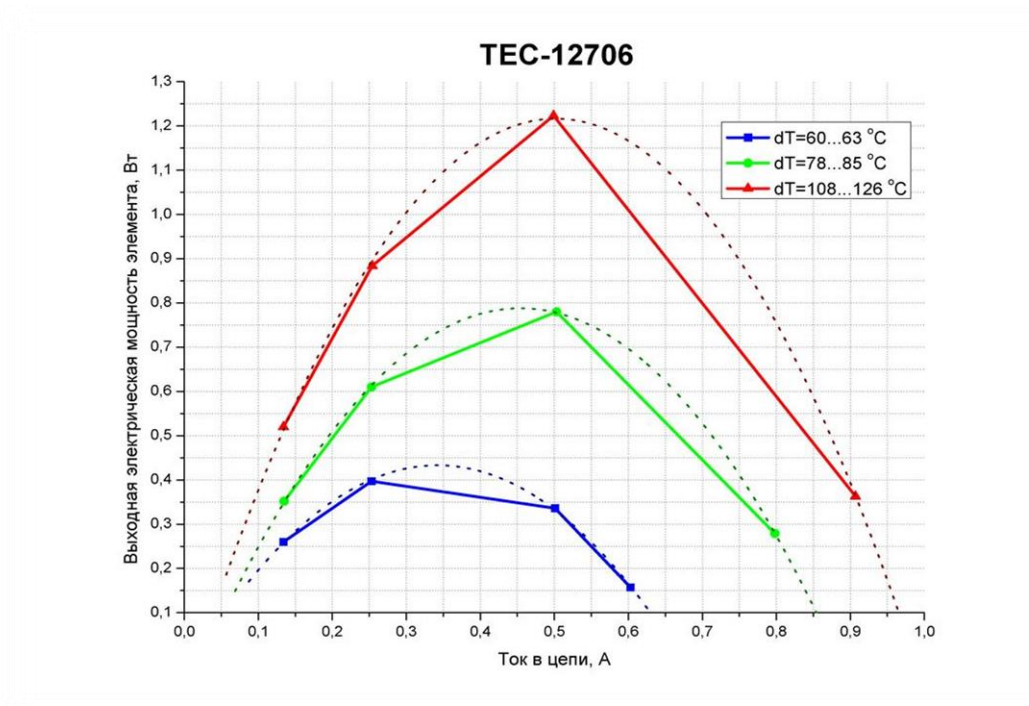


Рисунок 5.2 – Графік залежності ефективності від струму

Була поставлена мета – домогтися різниці температур в 60 градусів Цельсія і зробити вимір виробленої потужності.

Результати експерименту, графік (рис. 5.3), та (табл.5.2).

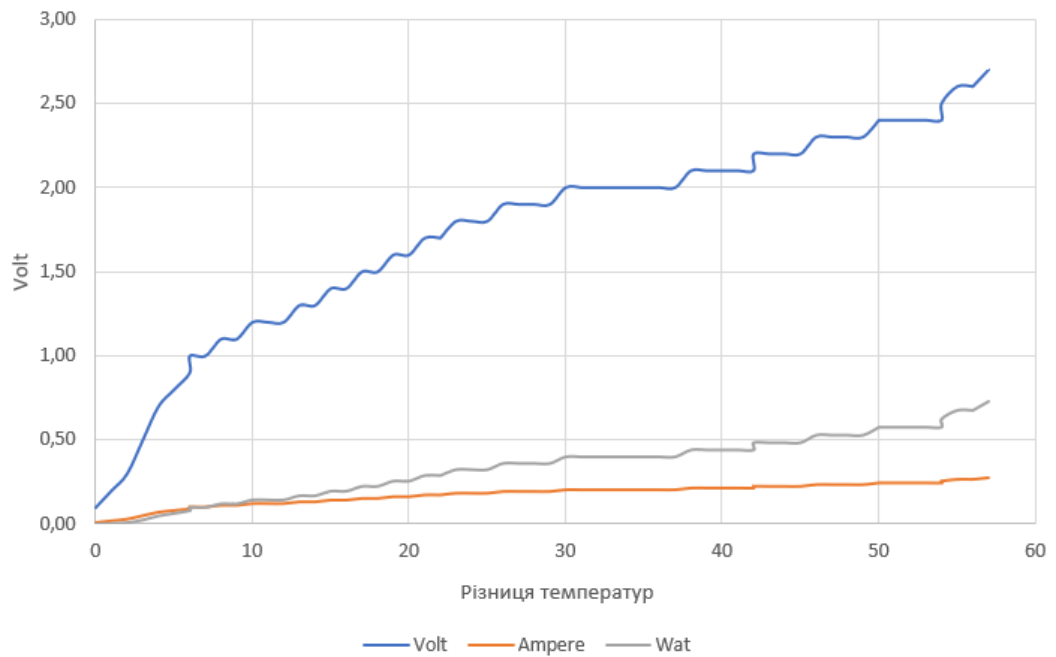


Рисунок 5.5 – Графік залежності різниці температур від струму

Таблиця 5.2 – Результати експерименту відносно різниці температур

$\Delta T$	Volt	Ampere	Wat
57	2,70	0,27	0,729
56	2,60	0,26	0,676
56	2,60	0,26	0,676
56	2,60	0,26	0,676
55	2,60	0,26	0,676
54	2,50	0,25	0,625
54	2,40	0,24	0,576
53	2,40	0,24	0,576
52	2,40	0,24	0,576
51	2,40	0,24	0,576
50	2,40	0,24	0,576
50	2,40	0,24	0,576
49	2,30	0,23	0,529
48	2,30	0,23	0,529
48	2,30	0,23	0,529
47	2,30	0,23	0,529
46	2,30	0,23	0,529
45	2,20	0,22	0,484
44	2,20	0,22	0,484
43	2,20	0,22	0,484
42	2,20	0,22	0,484

Продовження таблиці 5.2

42	2,10	0,21	0,441
41	2,10	0,21	0,441
40	2,10	0,21	0,441
39	2,10	0,21	0,441
38	2,10	0,21	0,441
37	2,00	0,20	0,4
36	2,00	0,2	0,4
35	2,00	0,20	0,4
34	2,00	0,2	0,4
33	2,00	0,20	0,4
32	2,00	0,2	0,4
31	2,00	0,20	0,4
31	2,00	0,2	0,4
30	2,00	0,20	0,4
29	1,90	0,19	0,361
28	1,90	0,19	0,361
27	1,90	0,19	0,361
26	1,90	0,19	0,361
25	1,80	0,18	0,324
24	1,80	0,18	0,324
23	1,80	0,18	0,324
22	1,70	0,17	0,289
22	1,70	0,17	0,289
21	1,70	0,17	0,289
20	1,60	0,16	0,256
19	1,60	0,16	0,256
18	1,50	0,15	0,225
17	1,50	0,15	0,225
16	1,40	0,14	0,196
15	1,40	0,14	0,196
14	1,30	0,13	0,169
13	1,30	0,13	0,169
12	1,20	0,12	0,144
11	1,20	0,12	0,144
10	1,20	0,12	0,144
9	1,10	0,11	0,121
8	1,10	0,11	0,121
7	1,00	0,10	0,1
6	1,00	0,1	0,1
6	0,90	0,09	0,081
5	0,80	0,08	0,064

## Продовження таблиці 5.2

4	0,70	0,07	0,049
3	0,50	0,05	0,025
2	0,30	0,03	0,009
1	0,20	0,02	0,004
0	0,10	0,01	0,001

Зробимо розрахунок, скільки в середньому електроенергії зможуть зробити елементи Пельтьє за добу роботи опалення. Але оскільки температура в приміщенні при роботі опалення також підніметься, візьмемо занижене значення різниці температур в 20 градусів Цельсія.

За даними таблиці при різниці температур в 20 градусів, два елементи виробляють 0.25 Ват/год, візьмемо це значення як константу.

Середній розмір радіатора опалення метр на метр, таких радіаторів в приміщенні 4 одиниці

Нам потрібно визначити скільки елементів Пельтьє можна розмістити на такому радіаторі.

Розрахуємо за формулою (5,1):

$$\frac{a^2}{d^2} = X, \quad (5,1)$$

де а – сторона радіатора 1000 мм; b – сторона елемента Пельтьє 40 мм; x – кількість елементів що розміщуються на площі радіатора.

$$\frac{100^2}{4^2} = 625.$$

Надалі помножмо кількість елементів що можна розташувати на площі одного радіатора на потужність Ват/годину що виробляють два елементи тестувального стенду, та поділимо навпіл щоб дізнатися скільки виробляє

один за формулою (5,2), оскільки розрахунок 0.25 Ват/год був зроблений з двома послідовно з'єднаними модулями Пельтьє.

$$\frac{x \times 0,25}{2} = y, \quad (5,2)$$

де  $y$  – Ват на годину виділяють модулі на площі одного радіатора,

$$\frac{625 \times 0,25}{2} = 77,75 \text{ Ват/год.}$$

Помножимо отриманий результат на кількість радіаторів в приміщенні, в нашому випадку чотири,  $77,75 \times 4 = 311$  Ват / год

Такої потужності вистачить для роботи холодильника 100-200 ват / год, плазмового телевізора 40-60 ват / год, а також освітлення приміщення.

Зробивши літературний огляд матеріалів, було зроблено висновок, що один елемент Пельтьє серії TEC1-12706 буде не достатньо, тому що буде досить мала потужність на виході одного елемента при його нагрівні. Було вирішено використати три елемента Пельтьє серії TEC1-12706.

Тепер зібравши цю конструкцію потрібно дослідити її параметри. Почнемо з дослідження залежності струму короткого замикання від напруги холостого ходу (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Вольт-амперна характеристика елемента Пельтьє

$U_{\text{ХХ}}, \text{ В}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{ А}$
0	0
0,1	0,01
0,150	0,01
0,175	0,02
0,2	0,02

Продовження таблиці 5.3

0,217	0,02
0,230	0,03
0,295	0,03
0,330	0,04
0,360	0,04
0,415	0,05
0,455	0,05
0,488	0,06
0,560	0,07
0,595	0,07
0,625	0,08
0,660	0,08
0,720	0,09
0,930	0,12
1,18	0,14
1,75	0,2
2	0,25
2,5	0,3

За заданою таблицею, побудуємо графік (рисунок 5.3) ВАХ, заданої конструкції котра складається з трьох елементів Пельтьє.

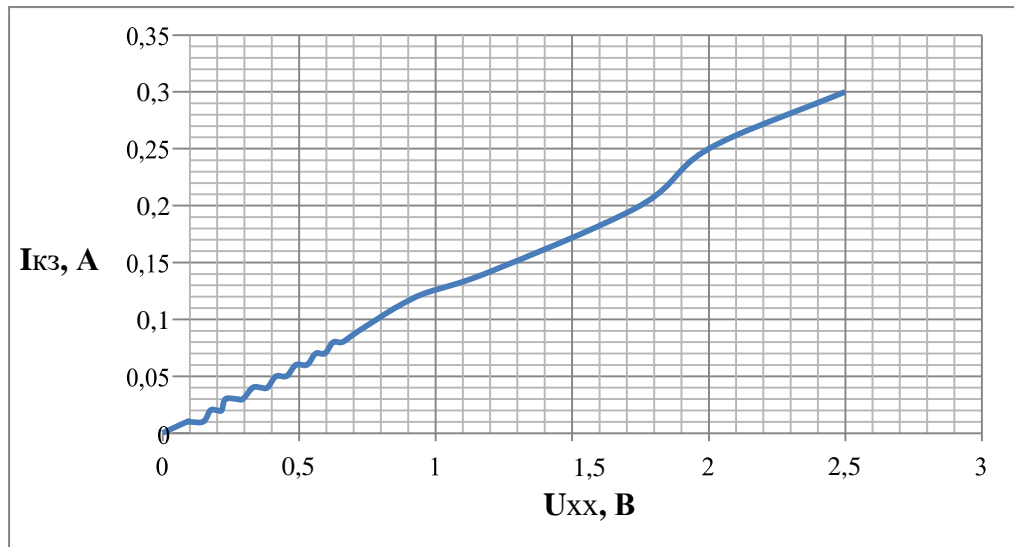


Рисунок 5.3 – Вольт-амперна характеристика конструкції, котра складається з трьох елементів Пельтьє.

Також було експериментарно побудовано залежність (таблиця 5.4) вихідної напруги елемента Пельтьє від різниці температур на сторонах елемента Пельтьє  $U(\Delta t)$ .

Таблиця 5.4 – Залежність вихідної напруги від різниці потенціалів

$t_{\text{хол}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{гар}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
26	26	0	0,11
26	27	1	0,42
26	28	2	0,48
26	29	3	0,58
27	31	4	0,82
27	32	5	0,96
27	33	6	1,05
27	34	7	1,09
28	36	8	1,25
28	37	9	1,34
28	38	10	1,47

## Продовження таблиці 5.4

29	40	11	1,67
29	41	12	1,79
29	42	13	1,91
30	44	14	2,09
30	45	15	2,20
31	47	16	2,38
32	48	16	2,47
35	51	16	2,98
35	54	19	3,33
35	55	20	3,54
36	56	20	3,61
36	57	21	3,75
36	58	21	3,85
36	59	22	3,97

Тепер згідно даним із (табл 5.4) наведемо графі залежності  $U(\Delta t)$  (рис 5.4).

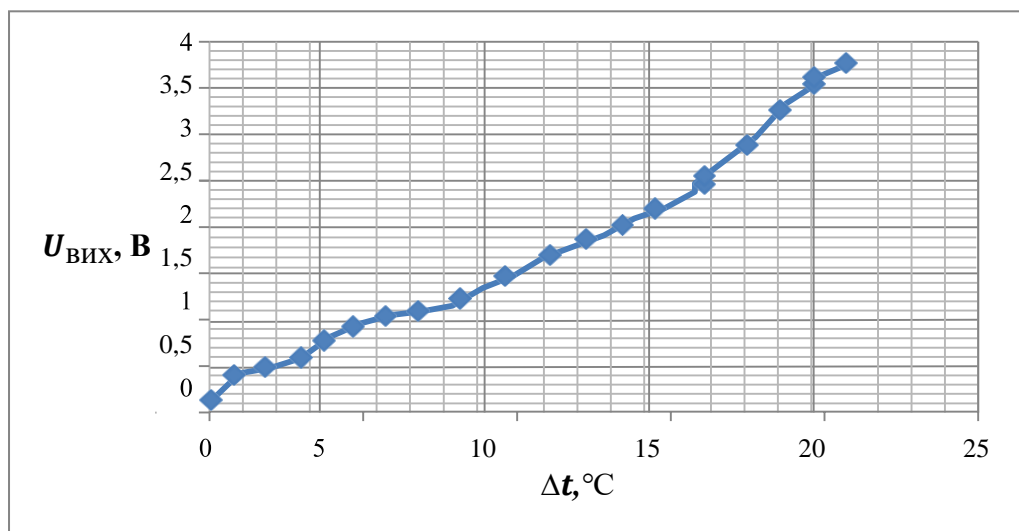


Рисунок 5.4 – Графік залежності  $U(\Delta t)$

## 5.2 Висновки до розділу

В цьому розділі було розглянуто детально, на прикладі спаїв р і п напівпровідників як генерується енергія в термоелектричному перетворювачі. Підвівши результати огляду, фізичних процесів які відбуваються при нагріванні контакту різних матеріалів, можна сказати, що ефект Зеебека досить не простий процес, якій обумовлюється такими процесами:

- об'ємна різниця потенціалів;
- контактна різниця потенціалів;
- фононне збільшення;
- магнотонне збільшення (в магнетиках).

Матеріали для створення елемента Пельтьє треба підбрати так, щоб вони одночасно володіли двома взаємо виключеними властивостями – добре проводити електричний струм, але погано проводити тепло, оскільки вільні електрони в речовині переносять не тільки електричний заряд, а й тепло.

Для серійних виробництв використовують модулі з тугоплавким припоєм, які можна нагрівати до 300 °С.

Елемент Пельтьє може працювати в двох режимах, як охолоджувач і як термогенератор. При подачі напруги на елемент він буде з одного боку нагріватися, а з іншого боку охолоджуватися. Цю властивість часто використовують в портативних холодильниках. Якщо один бік елемента нагрівати а інший охолоджувати, створюючи цим різницю температур, будемо спостерігати різницю потенціалів на вихід елемента Пельтьє. Цю властивість ми і будемо використовувати в проекті.

Провівши повний аналіз, можна виділити такі переваги елемента Пельтьє:

- малі розміри;
- відсутність рухомих частин;
- відсутність газів і рідин;
- відсутність шуму;

- можливе як охолодження так і нагрівання;
- простота конструкції;
- стійка до вібрацій.

Також було виділено такі недоліки:

- мала ККД;
- обмежена температура нагріву (менша температури плавлення припою);
- складна система відведення тепла від гарячої поверхні.

Чотири радіатора оснащені елементами Пельтьє будуть окупатися близько 60 років.

На даний момент часу використання та впровадження даної технології буде актуально лише в регіонах з постійними морозами, де необхідно цілодобове опалення.

У такому випадку і терміни окупності будуть в 3 рази менше, що вже може влаштувати користувачів даної технології.

Що ж стосується решти світу, потрібно зробити висновок, що поки елементи Пельтьє не ввійдуть в масове виробництво як інші альтернативні джерела енергії, ми ще довго не побачимо зрушень у цій сфері, як по ККД самих елементів, так і по їх ціні.

## ВИСНОВКИ

Метою роботи є визначення ефективності використання елементів Пельтьє та їх корисних властивостей у системах відновлювання і акумулювання електричної енергії на виробництвах та житлових приміщеннях.

Був розроблений експериментальний стенд, та на його основі зроблені розрахунки стосовно ККД елементів Пельтьє. Стенд відображає при якій різниці температур ефективність корисного ефекту Пельтьє є найбільшою.

Після детального вивчення ефекту Пельтьє можна зробити висновок, незважаючи на те, що використання ефекту Пельтьє вимагає додаткових заходів і досліджень по вивченню безпечного і раціонального використання модулів Пельтьє в якості охолоджуючих пристроїв, це явище вважається перспективним і корисним для людини і цивілізації.

На даному етапі є декілька підходів. Один з підходів – створення нано-клітинних матеріалів. Уявімо брязкальце, усередині щось тріпоче і ця умова для того, що б не було провідності тепла, а сама брязкальце, зовнішня її оболонка – це провідна система електрики, приблизно так само працює хімічна сполука на нано- та суб-нано рівні. Такі сполуки були створені і було показано що вони дуже ефективні, коефіцієнт їх добротності при потрібних температурах перевищує той, що є у телуриду вісмуту при 100 °С. Але вони дуже дорогі у виготовленні. Може бути вони не містять таких вже дорогих елементів, тільки барій і європій, але сама процедура їх отримання складна. Це означає, що витрати будуть пущені на виробництво хімічних сполук.

Є й інша ідея, яка розробляється до сих пір. Колись було виявлено, що термоелектричні речовини є в природі, і це сульфідні мідні мінерали, різного складу і будови, до сих пір до кінця не зрозуміло чому вони проявляють термоелектричні властивості. Однак ведуться дослідження, які можна охарактеризувати приблизно так: – давайте отримаємо синтетичний аналог мінералу, спробуємо придумати штучне легування, не те що буде в природі.

Подивитися за рахунок яких добавок поліпшуються або погіршуються властивості і знайти оптимальний шлях створення термоелектричного матеріалу. За рахунок лабораторних синтетичних хитрощів, це мабуть працює, тому що знову такий коефіцієнт добротності перевершує одиницю, то що є для телуриду вісмуту був отриманий, однак ці результати найновіші і тому до цих пір термоелектричні матеріали промислового і напівпромислового виробництва не створені. Однак очікування великі і звичайно ж ведуться лабораторні випробування і може бути років через п'ять з'являться термоелектричні матеріали здатні працювати при температурі 300-400 °C і складатимуться з нетоксичних аналогів мінералів які існують на землі.

Що ми хочемо від цих матеріалів? По-перше, автомобільна промисловість, по-друге, в якійсь мірі ми можемо створювати генератори електрики автономні під дією високих температур, наприклад під дією теплового випромінювання сонця. Сонце світить на робочу поверхню, інша поверхня альтернативна якимось способом охолоджується, наприклад вона знаходиться на водопровідній системі. Створюється градієнт температур, виникає термоелектрична енергія. Куди її можна використовувати? Наприклад, в тій же системі – розумний будинок, якщо уявити, що є сонячні панелі, які збирають ультрафіолетове світло і світло видимої області, то світло інфрачервоне, невидиме нам, але яке ми відчуваємо як тепло, воно втрачається, термоелектричний матеріал буде його захоплювати і перетворювати в джерело енергії. Такі очікування існують і залежать від того наскільки нам вдасться знайти нові матеріали, оптимізувати їх властивості та зробити так, щоб не тільки лабораторне та але промислове отримання цих матеріалів було б дуже простим. Порівнянний з тим, як це просто зробити, отримати теллурид вісмуту правильним чином легований. Поки ми це не зробимо, то основним ринком термоелектричних матеріалів будуть охолоджувачі, що працюють на тих матеріалах, які в середині 20 століття придумав академік Іоффе.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-2015. Звіти у сфері науки и техніки. Структура и правила оформлення. Документація. - Введ. 2015-06-22. - К .: Держстандарт України, 2015. - 31 с.
2. Методічні вказівки з дипломного проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 7.05090202 «Автоматизовані комплекси радіоелектронних виробництв», 7.05090203 "Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки" [Текст]: методічні вказівки / В. А. Палагін, С. П. Новоселов, Є. А. Разумов-Фрізюк, І. В. Жарікова. МОНМС України, ХНУРЕ. - Харків: ХНУРЕ, 2012. - 68 с.
3. Inerton [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/dc\\_dc\\_preobrazovateli/generator\\_na\\_ehlemente\\_pelte/16-1-0-30](http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/dc_dc_preobrazovateli/generator_na_ehlemente_pelte/16-1-0-30)
4. С SQL Raspberry Arduino Cubieboard etc [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://csql.ru/2014/05/17/fan-peltier-seeback/>
5. Habr [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://habr.com/ru/post/376285/>
6. Electrosam.ru [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/elementy-pelte/>
7. Ruselectronic [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ruselectronic.com/element-peltje/>
8. Студенческий научный форум – 2019 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018012121>
9. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы: Учебное пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008. - 198 с. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://me.kpi.ua/downloads/Poplavko\\_Yu.M. Electrofizika\\_tverdih\\_til.pdf](https://me.kpi.ua/downloads/Poplavko_Yu.M. Electrofizika_tverdih_til.pdf)