

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**  
ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ  
Кафедра електрофізики

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Сергій САВЕНКОВ

« \_ » грудня 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
на тему:  
**«ЛІНІЙНИЙ ЛАНЦЮЖОК ЕЛЕМЕНТІВ ПЕЛЬТ'Є В ТЕРМОГЕНЕРАТОРІ»**

**Виконав:**

студент 2-го курсу магістратури  
денної форми навчання  
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали  
ОПП «Радіофізика та електроніка»  
Бірюков Тимур Ігорович

\_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

канд. фіз.-мат. н., доцент  
Іванюта Олександр Миколайович

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

д. н., с.н.с.  
Бродин Олександр Михайлович

\_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри електрофізики  
від « \_ » грудня 2023 р., протокол № \_.

Завідувач кафедри електрофізики,  
доктор фіз.-мат. наук, професор  
Савенков Сергій Миколайович

\_\_\_\_\_

**ЗМІСТ**

ВСТУП.....	4
1.Функціональність елементів Пельт'є для “зеленої” енергетики.....	5
1.1 Модернізація фізико технологічних основ ланцюгів з елементами Пельт'є .....	5
1.2 Ефект Зеєбека.....	9
1.3 Ефект Томсона.....	10
1.4 Елементи Пельт'є у пристроях .....	13
1.5 Термогенератор на основі елементів Пельт'є .....	15
2.Розробка пристрою MICROCREOMUG та проведення експериментальних досліджень .....	17
2.1 Конструкція ЛЛЕП.....	17
2.2 Розробка конструкції дослідного макету .....	18
2.3 Оптимізація модуля Пельт'є .....	19
2.4 Аналіз отриманих даних та результатів пристрою MICROCREOMUG .....	23
ВИСНОВКИ.....	25
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	27
Додаток 1.....	27

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 28 с., 12 рис., 2 табл., 1 додаток, 15 джерел.

### ЛІНІЙНИЙ ЛАНЦЮЖОК ЕЛЕМЕНТІВ ПЕЛЬТ'Є В ТЕРМОГЕНЕРАТОРІ

Проведено аналіз літературних джерел, що описують особливості застосування елементів Пельт'є та на відповідність до вимог експлуатації в якості функціонального елемента «зеленої енергетики». Була запропонована методика вивчення електрофізичних властивостей лінійного ланцюжка елементів Пельт'є за допомогою 4 зондового методу були отримані вольт-амперні та інші характеристики по постійному струму. Було виготовлено декілька зразків на основі лінійного ланцюжка елементів Пельт'є та досліджена їх експлуатація в нормальних умовах при безпосередньому використанні.

Пельт'є, коефіцієнт корисної дії; напівпровідник, термоелектричний генератор, геометричний розмір,

## ABSTRACT

Explanatory note 28 p., 12 fig., 2 tables., 1 application, 15 sources for the list of links.

### LINEAR CHAIN OF PELTIER ELEMENTS IN THERMAL GENERATOR

An analysis literature has been carried out to describe the characteristics solidification of Peltier elements for their suitability of use as a functional element for “green energy”. A method was proposed for modification of the electrophysical power of linear chain Peltier elements using an additional 4-probe method for removing the current-voltage and other characteristics of the stationary flow. A series of designs were prepared on the basis of linear chain Peltier elements and their operation in normal conditions was monitored at an undisturbed level.

Peltier, efficiency factor; semiconductor, thermoelectric generator, geometric size

## ВСТУП

У сучасній електроніці одним з найважливіших питань є розробка альтернативних джерел енергії, оскільки традиційні джерела енергії мають шкідливий вплив не лише на здоров'я людей, а й на навколишнє середовище.

З цієї причини стає необхідним розробляти нові та вдосконалювати вже існуючі джерела альтернативної енергетики. Це питання має життєву важливість, оскільки з кожним роком ситуація забруднення навколишнього середовища лише погіршується. Основними винуватцями є вугільна та нафтопромисловість, які продовжують виробляти найбільшу частину електроенергії для споживачів. Щоб відмовитись від використання вугільних електростанцій, необхідно активно розвивати відновлювальні джерела електроенергії.

У рамках цієї магістерської роботи ми зосередимося на дослідженні лінійного ланцюжка елементів Пельт'є в термогенераторі. Метою цієї роботи є детальне вивчення принципів роботи лінійного ланцюжка елементів Пельт'є в термогенераторі, а також виявлення його потенціалу як альтернативного джерела енергії. На даному етапі розвитку альтернативної енергетики, ефекти Пельт'є і Зеєбека зацікавили вчених як можливий перспективний метод отримання електрики. Однак, для промислового використання подібних елементів існує одна складність - їх низький ККД.

Елементи Пельт'є широко використовують з метою охолодження малих приладів. Основна сфера застосування цього ефекту включає дрібну електроніку, портативні авто-холодильники і кондиціонери. Однією з незаперечних переваг елементів Пельт'є є їхня економічність у питаннях споживання електроенергії. Крім того, відомо, що ці елементи можуть не тільки охолоджувати або нагрівати предмети, поглинаючи енергію, але й функціонувати у зворотному напрямку. Саме вироблення струму за допомогою нагрівання або охолодження є особливо цікавим для вчених.

Проте, можливо, що важливішим елементом буде не сам термоелектричний перетворювач, а контролер. Оскільки такі джерела енергії є непередбачуваними і можуть спостерігатися різкі перепади напруги і струму, контролер є необхідним елементом для нормального застосування термоелектричного перетворювача без шкідливого впливу на інші прилади.

## 1. Функціональність елементів Пельт'є для “зеленої” енергетики

### 1.1 Модернізація фізико технологічних основ ланцюгів з елементами Пельт'є

У сьогоденні енергоефективність та сталість стають все більш пріоритетними завданнями. Саме з цієї причини термогенератори, засновані на лінійних ланцюжках елементів Пельт'є (ЛЛЕП), отримують все більше популярності. Ефект Пельт'є, відкритий французьким фізиком Жаном Шарлем Пельт'є в 1834 році, полягає в здатності певних матеріалів генерувати температурну різницю при проходженні електричного струму через них. Цей явище є фундаментом для функціонування термогенераторів, які конвертують теплову енергію в електричну та використовуються в різноманітних галузях, таких як електроніка, автомобільна промисловість та енергетика. [1-4]

Ефект Пельт'є базується на явищі термоелектричного перетворення. Це явище виникає внаслідок взаємодії електричного струму з матеріалами, що мають термоелектричні властивості. Основними компонентами ЛЛЕП є НП матеріали(які здебільшого є складними сполуками). Вони мають різну провідність для електронів та дірок. При проходженні електричного струму через ЛЛЕП, виникає перенесення тепла внаслідок різниці в електронній та дірковій провідності матеріалів. Для вивчення фізико-технологічних основ механізму ефекту Пельт'є проведено ряд експериментів. У цих дослідженнях були використані різні термоелектричні матеріали, такі як бісмут-телурід, селенід свинцю та інші. Експериментальні установки дозволили виміряти залежність градієнту температур від електричного струму, а також дослідити вплив різних чинників, таких як товщина матеріалу, температура навколишнього середовища та інші. Тепло, що утворюється в ЛЛЕП в термогенераторі, пропорційне силі струму і може бути виражено формулою  $Q_p = \Pi I$ , де  $Q_p$  - величина тепла,  $I$  - сила струму. Коефіцієнт Пельт'є є характеристикою контактуючих матеріалів. Він, звичайно, залежить від їх природи та температури і може бути виражений через коефіцієнт Томпсона ( $\alpha$ ),  $\Pi = \alpha \Delta T$ , де  $\Delta T$  - різниця в температурі. [2-5]

Необхідно пам'ятати, що коефіцієнт Пельт'є знаходиться в істотній залежності від температури. Деякі значення коефіцієнта Пельт'є для різних пар металів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнта Пельт'є для різних пар металів [3]

Залізо-константан		Мідь-нікель		Свинець-константан	
T, К	Π, мВ	T, К	Π, мВ	T, К	Π, 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 і його знак залежать від контактуючих матеріалів, сили струму та тривалості проходження струму. Тому  $Q_{\Pi}$  може бути виражено ще однією формулою,  $dQ_{\Pi} = \Pi_{12} \cdot \frac{q}{4} dt$ . Тут  $\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2$  є коефіцієнтом Пельт'є для даного контакту, пов'язаним з абсолютними коефіцієнтами Пельт'є ( $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ ) контактуючих матеріалів. При цьому вважається, що струм йде від першого зразка до другого. При виділенні тепла Пельт'є маємо:

$$Q_{\Pi} > 0, \Pi_{12} > 0, \Pi_1 > \Pi_2 \quad (1.1)$$

При поглинанні тепла Пельт'є - вважається негативним і відповідно:  $Q_{\Pi} < 0, \Pi_{12} < 0, \Pi_1 < \Pi_2$ .

Очевидно, що  $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$ . Розмірність коефіцієнта Пельт'є  $[\Pi] \text{ СІ} = \text{Дж} / \text{Кл} = \text{В}$ .

Класична теорія розкриває загадковий феномен Пельт'є шляхом пояснення того, що при переміщенні електронів струмом з одного металу в інший вони відчують збільшення або зменшення швидкості через внутрішню контактну різницю потенціалів між металами. У випадку прискорення, кінетична енергія електронів зростає, а потім вивільняється у формі тепла. Зворотний випадок призводить до зменшення кінетичної енергії, а енергія поповнюється за рахунок взаємодії енергії теплових коливань атомів іншого провідника. Це веде до охолодження другого провідника.

При більш детальному розгляді зафіксується не лише зміна потенційної, а й загальної енергії. [1-

4]



Рис.1.1. Замкнутий ланцюг, що складається з двох різних за типом провідності напівпровідників: а) виділення тепла (контакт А). б) поглинання тепла (контакт В). [1-4]

На рис.1.1 представлено замкнутий ланцюг, що складається з двох різних за типом провідності напівпровідників (НП)1 та НП2 з контактами А та В. Це зветься термоелементом, а його виводи - термоелектродами. Через нього протікає струм  $I$ , який створюється зовнішнім джерелом  $E$ . Рис. 1.1.б ілюструє ситуацію, коли на контакті А (струм тече від НП1 до НП2) відбувається виділення тепла Пельт'є  $Q_p(A) > 0$ , а на контакті В (струм направлений від НП2 до НП1) відбувається поглинання тепла -  $Q_p(B) < 0$ . Це призводить до зміни температур спаїв:  $T_A > T_B$ . [4-6]

Причина виникнення ефекту Пельт'є на контакті НП з однаковим типом носіїв струму (два НП n-типу або два НП р-типу) така ж, як і у випадку контакту двох металевих провідників. Носії струму (електрони або дірки), які перебувають по різні сторони спаю, мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох чинників. Цими чинниками є енергетичний спектр, концентрація та механізм розсіяння носіїв заряду. Коли носії, подолавши спай, опиняються в області з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній ґратці. В результаті чого відбувається виділення тепла за принципом Пельт'є ( $Q_p > 0$ ) та підвищення температури контакту. Тим часом, на іншому спаю носії, переходячи в область з більшою енергією, взаємодіють із ґраткою, запозичуючи відсутню енергію. Це призводить до поглинання тепла за принципом Пельт'є ( $Q_p < 0$ ) та зниження температури. [6-8]

Ефект Пельт'є, як і всі інші термоелектричні явища, проявляється особливо сильно в

ланцюгах, що складаються з електронних (n-тип) і діркових (р-тип) НП. У такому випадку ефект Пельт'є має інше пояснення. Розглянемо ситуацію, коли струм у контакті йде від діркового НП до електронного (р-n). При цьому електрони і дірки рухаються назустріч один одному і, зустрівшись, рекомбінують. Це призводить до звільнення енергії у вигляді тепла. Така ситуація показана на рис.1.2, де зображені енергетичні зони ( $E_c$  - зона провідності,  $E_v$  - валентна зона) для домішкових НП з дірковою і електронною провідністю та поглинання тепла у випадку, коли струм йде від n- до р- НП (n-p). У цьому випадку електрони в електронному НП і дірки в дірковому НП рухаються в протилежних напрямках, йдучи від межі розділу. Зменшення носіїв струму в прикордонній області заповнюється за рахунок попарного народження електронів і дірок. Для утворення таких пар необхідна енергія, яка надходить за рахунок теплових коливань атомів ґратки. Утворені електрони і дірки захоплюються в протилежних напрямках електричним полем. Тому, поки через контакт протікає струм, безперервно відбувається народження нових пар. Це призводить до поглинання тепла в контакті. Такий ланцюг дозволяє створювати ефективні охолоджуючі елементи. [8-10]

Проблема отримання "зеленої" енергії та відведення тепла від пристроїв у XIX столітті не була настільки актуальною, як сьогодні. Тому ефектом Пельт'є зацікавилися через два століття, коли з'явилися електронні пристрої, для яких потрібні були мініатюрні системи охолодження. Для досягнення ефективної роботи термогенераторів на основі ефекту Пельт'є, важливо вибрати відповідні термоелектричні матеріали. Ці матеріали повинні мати високу термоелектричну ефективність, тобто здатність генерувати велику температурну різницю при невеликому електричному струмі та низьку теплопровідність, щоб зменшити втрати тепла через конвекцію та теплопровідність



Рис.1.2. Зміна структури енергетичних зон на контакті напівпровідників р і n-типу: а) виділення тепла. б) поглинання тепла. [3]

## 1.2 Ефект Зеебека

Тепло є джерелом енергії, і тому ефективне використання теплової енергії, таке як переробка відпрацьованого тепла та виробництво сонячної теплової енергії, необхідне для побудови майбутнього сталого суспільства. Термоелектрична генерація є однією з перспективних технологій ефективного використання тепла. Через те, що вона забезпечує пряме перетворення теплової енергії на електричну. Оскільки термоелектричні пристрої складаються з твердотільних матеріалів і не мають частин, що рухаються, вони безшумні, надійні і масштабовані. Більшість поширених технологій термоелектричної генерації заснована на ефекті Зеебека, відкритому Томасом Зеебеком в 1821 [3, 4]. Ефект Зеебека означає виникнення електричного поля  $E_{SE}$  в результаті градієнта температури  $\nabla T$  у провіднику, де напрям  $E_{SE}$  є паралельним напрямку  $\nabla T$ . [1–4].

Термоерс, індукована ефектом Зеебека представлена коефіцієнтом Зеебека:  $\alpha \equiv \frac{E_{SE}}{\nabla T}$ , який дорівнює відношенню генерованої електричної напруги до прикладеної різниці температур завдяки колінеарній орієнтації  $E_{SE}$  та  $\nabla T$ . Термоелектричний модуль на основі ефекту Зеебека зазвичай складається з ряду П-структурованих термопар. Тобто, він побудований із з'єднань двох матеріалів з різними коефіцієнтами Зеебека; термопари з'єднані послідовно для підвищення термоелектричного виходу [рис. 1.3]. Вихідна напруга термоелектричного модуля може бути підвищена пропорційно до кількості елементів термопари, хоча така каскадна структура вимагає затратні процеси виготовлення. Ефективність термоелектричної генерації базована на ефекті Зеебека характеризується безрозмірною добротністю  $Z_{SE}T$ , що визначається як  $Z_{SE}T \equiv \frac{\alpha^2}{\kappa\rho}T$  (2.1), де  $\kappa$ ,  $\rho$ ,  $T$  – теплопровідність, електричний питомий опір і абсолютна температура термоелектричних матеріалів [4].

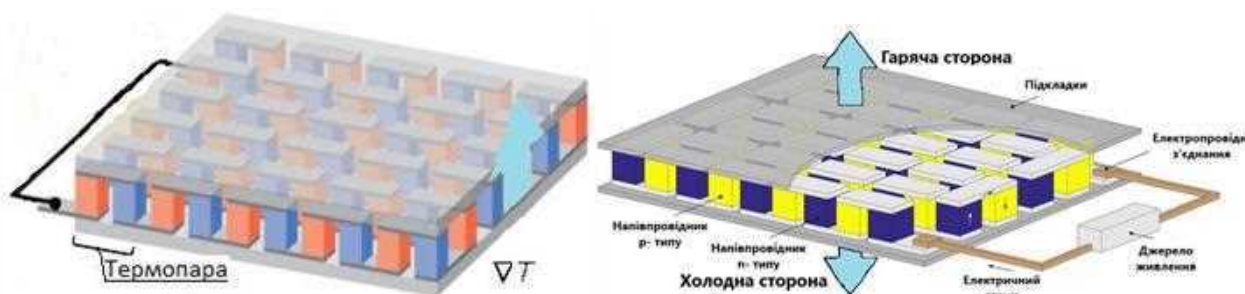


Рис 1.3. Ефект Зеебека (модульна структура)

Частина  $\alpha^2/\rho$  відома як коефіцієнт термоелектричної потужності. ККД приладу Зеєбека для виробництва електроенергії визначається як  $\eta = (\text{енергія, надана навантаженню})/(\text{теплова енергія, поглинена на гарячому кінці пристрою})$ . Це являє собою функцією внутрішнього та навантаження опори. Оптимізований ККД  $\eta^*_{SE}$  приладу Зеєбека надається як функція добротності наступним чином:

$$\eta^*_{SE} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\sqrt{1 + Z_{SE} \cdot \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_{SE} \cdot \bar{T} + \frac{T_c}{T_h}}}, \quad (1.2)$$

де  $\Delta T = T_h - T_c$  — різниця температур між гарячим і холодним кінцями пристрою,  $T_h(c)$  — температура на гарячому (холодному) кінці, а  $\bar{T}$  — середня температура між гарячим і холодним кінцями [3, 4]. Важливо, що  $\eta^*_{SE}$  монотонно зростає зі збільшенням  $Z_{SE}T$ ;  $\eta^*_{SE}$  переходить до ефективності Карно  $\eta_C = \Delta T / T_h$  в межах  $Z_{SE}T \rightarrow \infty$ . Тому багато зусиль у термоелектричних дослідженнях спрямовані на покращення добротності термоелектричних матеріалів. Рівняння (1.1) і (1.2) означають, що матеріали, які мають великий коефіцієнт Зеєбека, низьку теплопровідність  $\kappa$  і низький питомий електричний опір  $\rho$  необхідні для поліпшення ККД термоелектричного перетворення. Важливо, низький  $\kappa$  і  $\rho$  дозволяють зменшити втрати енергії за рахунок теплопровідності та розсіювання Джоуля відповідно. Однак в ізотропних металах закон Відемана-Франца ( $\kappa_e \rho = L_e T$ , з електронним числом Лоренца  $L_e$ ) обмежує покращення, коли  $\kappa$  домінується електронною теплопровідністю  $\kappa_e$ . Звичайний спосіб подолання цього обмеження полягає у використанні термоелектричних напівпровідників, де теплопровідність зазвичай визначається фононами, тоді як електрична провідність визначається носіями заряду, і, таким чином,  $\kappa$  і  $\rho$  розділяють за типом носіїв [1-5].

### 1.3 Ефект Томсона

Одним із основних термоелектричних ефектів, який слід враховувати, є ефект Томсона. Цей ефект виникає внаслідок сильної залежності коефіцієнта Зеєбека від температури. Результати

багатьох досліджень показують значний вплив цього ефекту на ефективність термоелектричних модулів (ТЕМ) [11, 12].

Для оцінки фактичної ефективності, яку можуть досягти ТЕМ, слід враховувати ефект Томсона. Однак більшість досліджень, доступних у літературі, описують вплив ефекту Томсона на основі спрощених математичних моделей. Для нас це може спричинити значні похибки в реальній оцінці потужності та ефективності термоелектричних модулів. На рис. 1.4 наведено конфігурацію термоелектричного генератора (ТЕГ) та геометричні розміри ТЕМ [5]. ТЕГ складається з термоелектричного модуля та електричного опору ( $R_{load}$ ). ТЕМ утворений НП (типу p і типу n), які електрично з'єднані послідовно мідними стрічками. Ці смуги піддаються дії гарячої ( $T_h$ ) і холодної температури ( $T_c$ ), які генеруються потоком джерела тепла ( $Q_{in}$ ) і потоком тепла, що відбирається системою охолодження ( $Q_{out}$ ). Зв'язок між ТЕМ і електричним опором викликає появу електричного струму ( $I$ ) і напруги ( $V$ ), які використовуються для розрахунку потужності та ефективності ТЕМ. Для математичних описів електричних і теплових властивостей ТЕМ, таких як тепловий потік ( $Q$ ), електричний заряд, густина електричного струму ( $J$ ), діелектричне середовище ( $D$ ) і скалярний електричний потенціал ( $E$ ). Швидкість теплового потоку ( $Q$ ) визначається рівнянням (1.3).

$$\nabla \cdot Q + \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}, \quad (1.3)$$

де  $\rho$  – густина,  $C$  – теплоємність,  $Q$  – швидкість виділення тепла.

Електричний заряд обчислюється за допомогою рівняння (1.4).

$$\nabla \cdot \left( \frac{\partial D}{\partial t} + J \right), \quad (1.4)$$

де  $D$  і  $J$  – вектори густини електричного потоку та електричного струму.

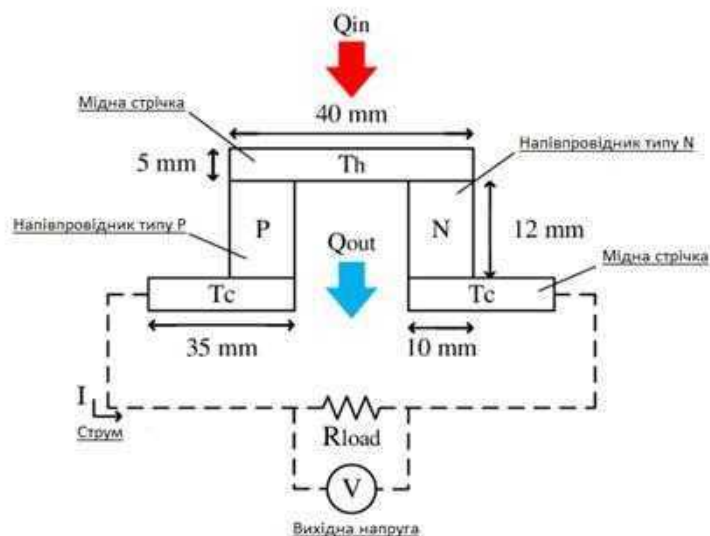


Рис. 1.4 Схема термоелектричного модуля

Швидкість теплового потоку ( $Q$ ) і густину електричного струму ( $J$ ) можна виразити, як показано в рівняннях (1.5) і (1.6).

$$Q = \Pi \cdot J - k \cdot \nabla T, \quad (1.5)$$

$$J = \sigma \cdot (E - S \cdot \nabla T), \quad (1.6)$$

де  $k$  – теплопровідність,  $\Pi$  – коефіцієнт Пельтьє.

Діелектричне середовище ( $D$ ) і скалярний електричний потенціал ( $E$ ) визначаються рівняннями (1.7) і (1.8).

$$D = \varepsilon \cdot E, \quad (1.7)$$

$$E = -\nabla\varphi, \quad (1.8)$$

де  $\varphi$  – скалярний електричний потенціал.

Об'єднавши вищеописані рівняння, можна сформулювати рівняння (1.9) або (1.10), які описують теплові та електричні явища ТЕМ [6-8].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\Pi \cdot J) - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = \dot{Q}, \quad (1.9)$$

$$\nabla \left( \varepsilon \cdot \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (\sigma \cdot S \nabla T) + \nabla \cdot (\sigma + \nabla \varphi) = 0. \quad (1.10)$$

Нарешті, розрахунок електричної потужності та ефективності ТЕМ проводився за допомогою рівнянь (1.11) та (1.12).

$$P_{elec} = I^2 \cdot R_{load}, \quad (1.11)$$

$$\eta = \frac{P_{elec}}{Q_{in}}. \quad (1.12)$$

З метою вирішення даної системи рівнянь застосовувався метод скінченних елементів, що дозволяє моделювати електричні та теплові явища. Окрім цього, він надає можливість розглядати ефекти Зеебека, Джоуля, Пельт'є та Томсона. Теплові явища випромінювання та конвекції в цьому дослідженні відсутні, оскільки вони амортизуються в більшості умов. У цьому розділі демонструється лінійна та поліноміальна залежність коефіцієнта Зеебека та його вплив на коефіцієнт Томсона як функцію різних рівнів температури.

#### 1.4 Елементи Пельт'є у пристроях

Ефект Пельт'є, як і всі термоелектричні явища, виражені особливо сильно в ланцюгах, складених з електронних і діркових НП. Розглянемо випадок, коли струм проходить від діркового напівпровідника до електронного. Тоді електрони в електронному НП і дірки в дірковому будуть рухатись назустріч один одному. Електрон з вільної зони електронного провідника після проходження через межу розподілу потрапляє в заповнену зону діркового НП і там займає місце дірки. В результаті такої рекомбінації вивільнюється енергія, яка і виділяється в контакт у вигляді тепла.

Розглянемо випадок, коли струм проходить через межу розподілу від електронного НП до діркового. Тоді електрони в електронному і дірки в дірковому НП будуть рухатись в протилежні сторони. Дірки, що рухаються від меж розподілу, будуть поповнюватись в результаті утворення нових пар при переходах електронів із заповненої зони діркового НП у вільну. На утворення таких пар потрібна енергія, яка поставляється тепловими коливаннями атомів решітки. Електрони і дірки, що утворюються під час народження таких пар, захоплюються в протилежні сторони електричним полем. Через це поки через контакт проходить струм, безперервно відбувається народження нових пар. В результаті в контакті теплота буде поглинатись. Таким чином, якщо струм рухається від діркового НП до електронного, то теплота Пельт'є виділяється. При зворотному напрямку струму

вона поглинається. А. Ф. Іоффе запропонував використовувати явище Пельт'є в НП для створення охолоджуючих пристроїв.[2-5]

Елемент Пельт'є (ЕП) представляє з себе термоелектричний перетворювач. Він виконаний у вигляді пластини з 2 виводами живлення. Якщо до цих виводів прикласти постійну напругу, то одна зі сторін елемента почне охолоджуватись, в той час як температура протилежної сторони буде зростати. Таким чином ми отримаємо пластину, яка буде гаряча з однієї сторони і холодна з іншої. Також, необхідно відмітити одну закономірність. Якщо примусово відводити тепло з гарячої сторони (наприклад за допомогою радіатора), то температура холодної сторони буде знижуватись ще більше, аж до зледеніння. [2-5]

Зміна полярності живлення призведе до зміни місцями гарячої і холодної сторін. Таке явище зумовлене внутрішньою структурою елемента, яка складається з великої кількості груп термічних пар, що розміщені між пластинами. У разі проходження електричного струму через термічну пару запускається процес виділення теплової енергії на переході р-п і одночасно поглинання тепла на п-р переході. Внаслідок цього частина контакту, пов'язаного з п-р переходом буде охолоджуватися, а пластина з боку переходу р-п почне змінювати температуру в бік її збільшення. ЕП також здатний на зворотнє перетворення. У випадку підведення тепла до однієї із його ЕП сторін, він починає генерувати електричну енергію. Це дає можливість використовувати цей пристрій як тепловий датчик. ТЕС1-12706 розшифровується: ТЕ—тепло-елемент, С-стандартний розмір, 1-кількість шарів всередині елемента, 127-кількість термопар, 06-кількість спожитого струму в Амперах (6 А). В табл. 1.2 наведені технічні характеристики типового НП ЕП (ТЕС1-12706). [2-5]

Завдяки тому, що термоелектричні ЕП можна підключати каскадно, можливо збільшити різницю значень температур між протилежними сторонами підкладок. Існують два основних види каскадного підключення ЕП: каскадне підключення однакових за розміром елементів (рис. 1.3. зображення зліва) і каскадне підключення ЕП у формі піраміди (рис. 1.3. - справа). Каскадне підключення однакових за розміром ЕП. У цьому варіанті кілька ЕП однакового розміру підключаються послідовно. Це означає, що гаряча сторона одного елемента з'єднується з холодною стороною наступного ЕП. Підключення їх в каскаді дозволяє збільшити різницю температур між гарячою та

холодною стороною. Це найбільш ефективний спосіб збільшити різницю температур і зазвичай використовується в додатках, де потрібна висока ефективність охолодження або нагрівання. [1-5]

Табл. 1.2 Технічні характеристики модуля Пельть 'є TEC1-12706. [3]

Значення робочої напруги:	12 В;
Максимальна напруга живлення:	15.4 В;
Споживаний струм:	6 А;
Споживча потужність:	77 Вт;
Макс. можлива потужність охолодження:	53.3 Вт;
Макс. можлива різниця температур між протилежними сторонами:	60 °C;
Робоча температура:	-30 °C...+70 °C;
Кількість термопар:	127;
Внутрішній опір:	1,98 Ом;
Фізичні розміри:	40 x 40 x 3,82 мм;
Вага:	22 г;

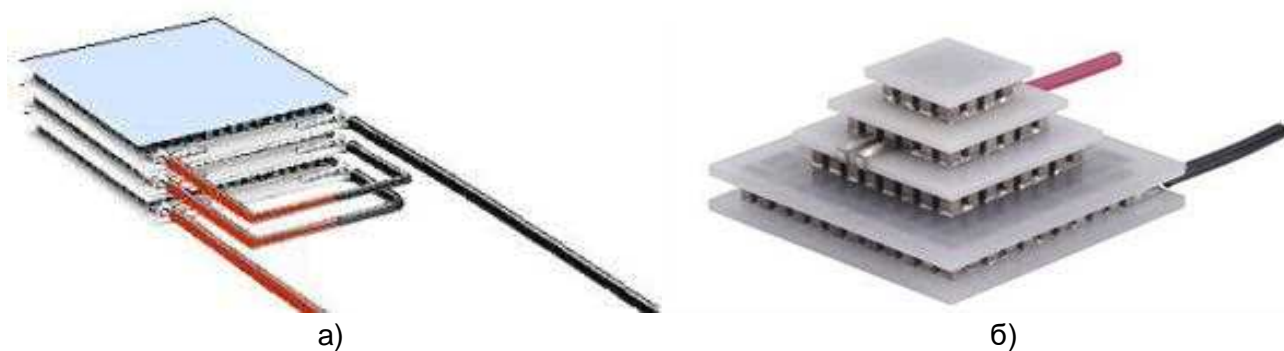


Рис. 1.5. Каскадне підключення модулів Пельть 'є. [3-5]

Каскадне підключення елементів у формі піраміди: У цьому випадку ЕП різних розмірів підключаються послідовно так, що розмір кожного наступного елемента менший за попередній. Це також дозволяє збільшити різницю температур, але менш ефективно, ніж каскадне підключення однакових за розміром ЕП. Однак це може бути корисним, якщо обмежені простором або бюджетом, оскільки менші ЕП коштують дешевше.

Каскадне підключення однакових за розміром ЕП зазвичай забезпечує більшу різницю температур порівняно з каскадним підключенням елементів у формі піраміди.

### 1.5 Використання ЛЛЕП у термогенераторі

Для термоелектрогенераторів використовують НП термоелектричні матеріали (ТМ), що забезпечують найбільш високий коефіцієнт перетворення тепла в електрику. Перелік речовин,

що мають термоелектричні властивості, досить великий, але лише деякі з них можуть використовуватися для перетворення теплової енергії. Сучасна наука постійно відшукує нові й нові НП композиції і прогрес в цій області забезпечується не стільки теорією, скільки практикою та зважаючи на складність фізичних процесів, що відбуваються в ТМ. Безумовно, можна сказати, що на сьогоднішній день не існує ТМ, який в повному обсязі задовольняє промисловість своїми властивостями, і головним інструментом у створенні такого матеріалу є експеримент. Найважливішими властивостями ТМ для термоелектрогенераторів є: ККД; технологічність; собівартість; коефіцієнт термо-ЕРС; токсичність; робочі температури. [1-5]

## 2. Розробка пристрою MICROCREOMUG та проведення експериментальних досліджень

### 2.1 Будова ЛЛЕП

В реальному перетворювачі Пельт'є, між 2 керамічними підкладками встановлені декілька паралелепіпедів із телуриду вісмуту і твердого розчину Si і Ge, з'єднаних між собою послідовно (рис 1.5). Ці пари НП n- і р-типу з'єднані за допомогою провідних перемичок, котрі контактують з керамічними підкладками. Кожна пара НП паралелепіпедів утворює контакт для проходження струму від НП n-типу до НП р-типу з одного боку перетворювача Пельт'є і від НП р-типу до НП n-типу з іншого боку перетворювача. Опір звичайного ЕП знаходиться в районі декількох Ом. Переваги ЕП: малі розміри; відсутність рухомих частин; відсутність газів і рідин; відсутність шуму; можливе як охолодження так і нагрівання; простота конструкції; стійка до вібрацій. Недоліки ЕП: мала ККД; обмежена температура нагріву складна система відведення тепла від гарячої поверхні.

Матеріал для ЕП повинен одночасно володіти двома взаємо виключеними властивостями – добре проводити електричний струм, але погано проводити тепло, оскільки вільні електрони в речовині перекосять 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 TEC1-12706, обмеження 150°C. [1-6]

В даному проекті в якості ЕП будемо використовувати TEC1-12706, який має наступні характеристики (таблиця 1.2).. ЕП 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 ЕП, доцільно прикріпити

до однієї сторони охолоджувальну систему, яка складається з радіатора та кулеру. Це

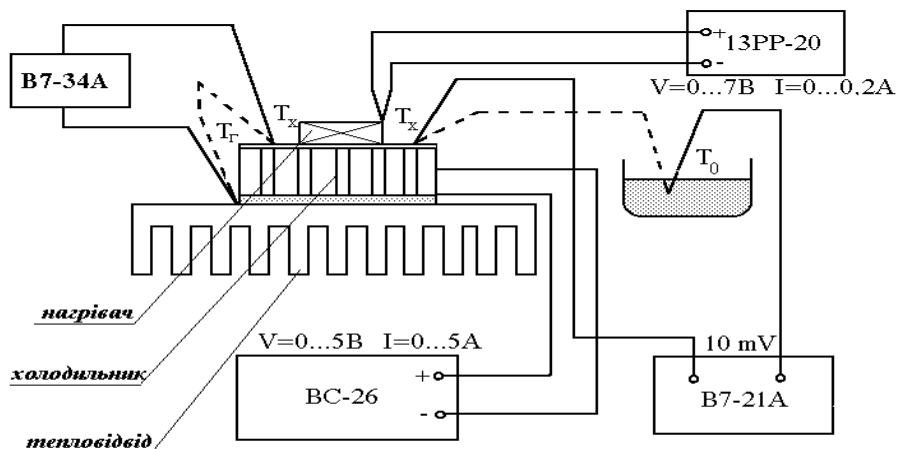


Рис. 2.1. Принципова схема холодильної камери з каскадним підключенням елементів Пельть'є.

забезпечить нам більшу різницю температур на пластинах. Щоб не перегріти наш термоелектричний елемент, до сторони яку будемо нагрівати прикріпимо алюмінієву пластину, тобто будемо гріти сторону ЕП опосередковано. Було б доцільніше вибрати мідь, оскільки вона має більшу теплопровідність ніж алюміній, але з огляду на економічну складову проекту, більш вигідніше використовувати алюміній. На рис. 2.1 представлено принципову схему холодильної камери каскадним підключенням модулів Пельть'є.

## 2.2 Розробка конструкції дослідного макету

При побудові випробувального стенду було використано: 5 ЕП TEC1-12706, мідний радіатор, комп'ютерний кулер датчик температури, 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 ЕП, а радіатор примусового охолодження з кулером на протилежну. ЕП були скріплені між двома радіаторами і щільно притиснуті, а також змащені термопастою.. 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 ЕП.

У цьому розділі були розглянуті етапи розробки навчального стенду для проведення експерименту. Для фіксування параметрів вольтамперметра та двох термометрів стенду, весь процесі роботи було заснято на відео. Була поставлена мета дослідити залежності різниці температур та 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.

### 2.3 Оптимізація модуля TEC1-12706

У випадку відсутності навантаження на холодний спай та нехтуванням теплом, що приходить із навколишнього середовища, все тепло Пельт'є  $Q_2^n$  врівноважується сумою зустрічного потоку тепла  $Q_D + Q_T$

$$Q_2^n = Q_D + Q_T \quad (2.1)$$

$$(\alpha_A - \alpha_B)IT_2 = I/2I^2R + k(T_0 - T_2), \quad (2.2)$$

$$T_0 - T_2 = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)IT_2 - I/2I^2R}{k}. \quad (2.3)$$

цьому станіві рівноваги відповідає максимальне зниження температури на холодному спайі. Прирівнюючи похідну  $\partial(T_0 - T_2)/\partial I$  до нуля, знайдемо оптимальне значення струму та відповідне максимальне значення

$$I_{opt} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)T_2}{R} \quad (2.4)$$

$$(T_0 - T_2)_{max} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2 T_2^2}{Rk^2} - I/2ZT_2^2 \quad (2.5)$$

$$T_{2min} = \frac{(1 + 2T_0Z)^{1/2} - 1}{Z} \quad (2.6)$$

$$Z = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2}{Rk} = \left[ \frac{\alpha_A - \alpha_B}{(\lambda_A \rho_A)^{1/2} + (\lambda_B \rho_B)^{1/2}} \right]^2 \quad (2.7)$$

Якщо припустити, що обидві гілки мають однакові геометричні розміри, мають однакову теплопровідність  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda$ , однаковий електричний опір  $\rho_A = \rho_B = \rho$  та рівні, але протилежні за знаком ТЕРС, то за цих умов отримаємо критерій, що характеризує якість одного елемента, так звану добротність  $Z$ :

$$Z = \frac{\alpha^2}{\lambda \rho} = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}, \rho = \frac{I}{\sigma} \quad (2.8)$$

Максимальне значення теплоти, що виділяється  $Q_2^n$  та відповідного до нього оптимальне значення струму  $I_{opt}$  дорівнюють:

$$Q_2^n = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2 T_2^2}{2R} - (T_0 - T_2)k, \quad (2.9)$$

$$I_{opt} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) T_2}{R}$$

Холодильний коефіцієнт батареї знаходиться за виразом

$$\varepsilon = \frac{Q_2^n}{Q_L} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) T_2 I - 0.5 I^2 R - k(T_0 - T_2)}{I^2 R + (\alpha_A - \alpha_B)(T_0 - T_2) I}, Q_L = Q_D - Q_2^n \quad (2.10)$$

при цьому можна знайти величину  $\varepsilon_{max}$  та відповідний струм  $I_{opt}^\varepsilon$

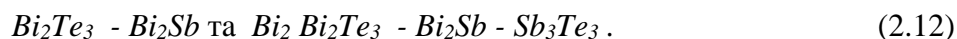
$$\varepsilon_{max} = \frac{T_0 (M - T_0 / T_1)}{(T_0 - T_2)(M + I)} \quad (2.11)$$

$$I_{opt}^\varepsilon = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)(T_0 - T_2)}{R(M - I)}$$

де:  $M = [1 + 0.5Z(T_0 - T_2)]^{1/2}$ ,  $T_0 = 300K$ . Отже,  $I_{opt}^\varepsilon = 2A$ .

Оскільки одиничний термоелемент розвиває незначну потужність, тому для отримання достатніх  $Q_2$  застосовують термобатареї, що складаються з великої кількості послідовно з'єднаних термоелементів. Величина  $Z$ , що зв'язує термоелектричні та теплові властивості речовини, уявляє собою критерій ефективності термо охолодження. Таким чином важливо розшукувати матеріали з високим значенням величини  $Z$ . У всіх металів відношення  $\sigma/\lambda$  однакове /співвідношення

Відемана-Франца, а у НП навіть менше, ніж у металів. Однак величина  $\alpha$  у НП значно більша, тому більша і величина  $Z$ . Цією обставиною визначився успіх застосування НП у термоелектриці. Кращими матеріалами у наш час є тверді розчини:



Для них в області низьких температур ( $T < 250K$ )  $Z \sim \sqrt{T}$ . Для різних матеріалів величина  $Z$  коливається в залежності від температури від  $1.2 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  1/град. Для збільшення перепаду температури та збільшення ефективності холодильного пристрою застосовують багато каскадне охолодження у вигляді декількох термобатарей, що послідовно охолоджують одна другу. Загальний перепад температур, що досягається, у термохолодильних пристроїв звичайно менший за 100 К.

На рисунку 2.2 (синій колір) зображено швидкість розрядки павербанка, тобто залежність ємності від часу за умови холостого ходу. На рисунку 2.2. (червоний колір) зображено залежність ємності від часу за умови короткого замикання. Гіперболічні залежності, які мають тенденцію до експоненційного спаду у перші чотири години. Експоненційна поведінка кривих обумовлена неоптимальністю роботи елементів Пельть'є, приблизно на 4-5 годин роботи значення  $C_{xx}$  та  $C_{kz}$  стабілізуються та виходять на значення 15 Ah та 13Ah відповідно.

На рисунку 2.3 зображено нормовану на максимальне значення залежність різниці температур від електричної потужності генератора за наявності п'яти елементів Пельть'є з'єднаних у лінійний

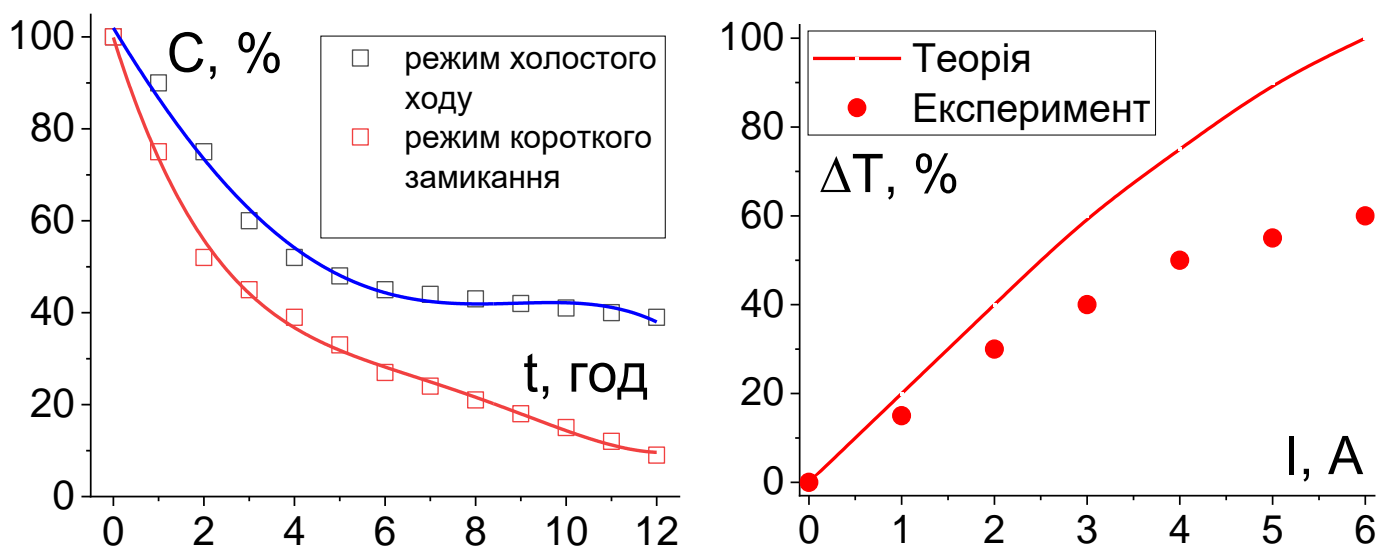


Рис. 2.2 Ємність павербанки як функція часу

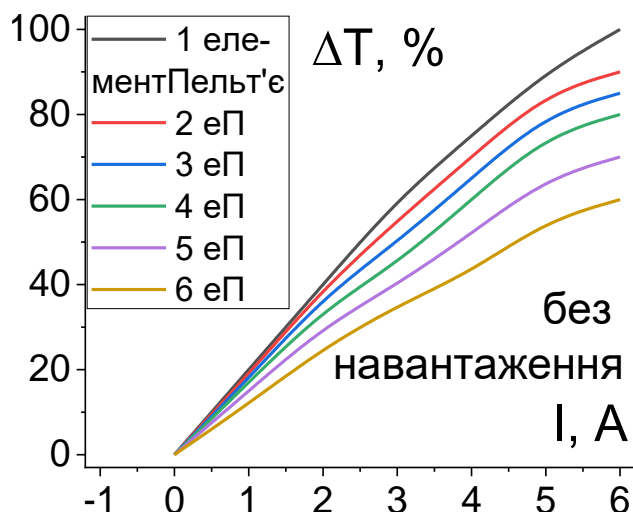
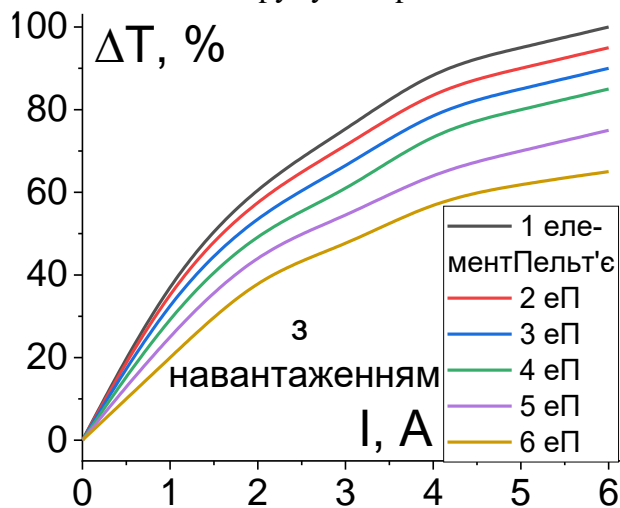


Рис. 2.4 Різниця температур лінійного ланцюжка елементів Пельтьє як функція струму

Рис. 2.3 Різниця температур генератора від струму павербанки



ланцюжок. Експоненційно зростаючий графік на проміжку  $\Delta T=20-46$  К. Така поведінка кривої показує, що при збільшенні електричної потужності, майже прямо пропорційна та отримали більшу потужність охолодження, де максимально можлива  $\Delta T_{\max}$  отримана при дослідженнях набуває значення  $\Delta T_{\max}=46^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_{\max}$  теоретичне= $60^{\circ}\text{C}$ ). На рисунку 2.4 зображено нормовану на максимальне значення залежність різниці температур від сили струму при живленні від павербанок. Дві степеневі функції, кожна з яких має свою “полицю”, для  $\Delta T_1$  це  $40^{\circ}\text{C}$  (живлення від павербанки 20800 mAh з напругою 12 V) та  $\Delta T_2=45^{\circ}\text{C}$  (живлення від павербанки 30000 mAh з напругою 15 V). Треба враховувати, що дані залежності дійсні при роботі в режимі без навантаження. Отримуємо залежності різниці температур від струму для лінійного ланцюжка з шести елементів Пельтьє. Кожна з шести степеневих функцій має свою “полицю” на яку вона виходить при оптимальній силі струму ( $I=2-3$  A), а саме:  $\Delta T_1=45$  К,  $\Delta T_2=60$  К,  $\Delta T_3=70$  К,  $\Delta T_4=78$  К та  $\Delta T_5=84$  К. Слід зазначити, що такі значення обумовлені тим, що робота проходить в режимі без навантаження (Рис. 2.4.a) Після цього, на рисунку 2.4.б було отримано подібні до попередніх нормованих на максимальне значення залежності різниці температур від струму для лінійного ланцюжка з шести елементів Пельтьє. На цей раз режим роботи був при оптимальному навантаженні у 50 Вт. Кожна з степеневих функцій так само має свою “полицю” на яку вона виходить за оптимальної сили струму ( $I=2-3$  A), а саме:  $\Delta T_1=22$  К,  $\Delta T_2=30$  К,  $\Delta T_3=35$  К,  $\Delta T_4=39$  К та  $\Delta T_5=42$  К.

На рисунку 2.5 зображено графік залежності зовнішньої напруги як функції величини струму

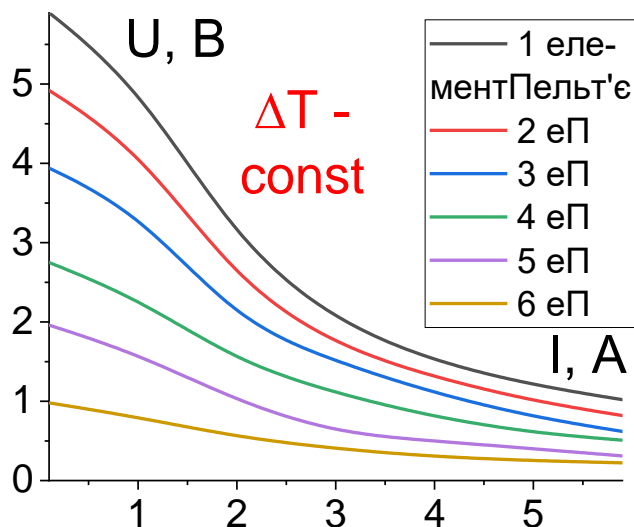


Рис 2.5 Залежність зовнішньої напруги як функції величини струму при постійній різниці температур

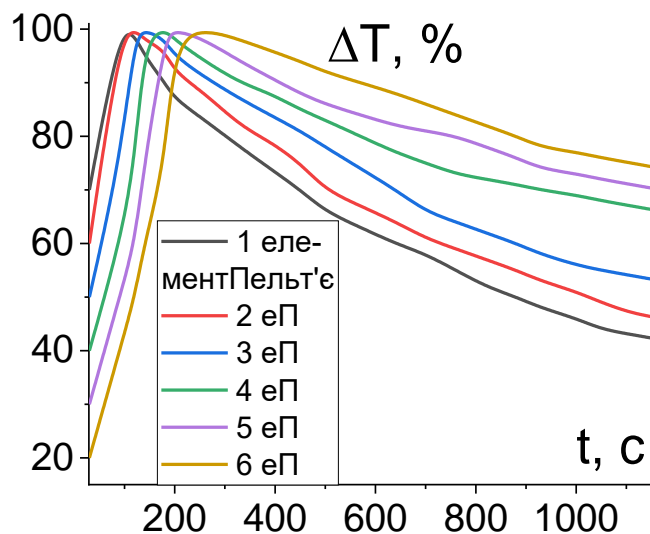


Рис 2.6 Різниця температур як функція часу

при постійній різниці температур. Лінійна залежність, яка має тенденцію до спаду. Мається на увазі, що коли ми збільшуємо струм – конденсатор більше розряджається, отже і павербанка буде швидше розряджатися. На рисунку 2.6 зображено графік залежності різницю температур як функцію часу. Нелінійна функція, що має тенденцію до спаду після 150 секунд. Така поведінка функції обумовлена тим, що оптимальне охолодження відбувається за 100 секунд, далі, коли воно і далі нагрівається, падає потужність охолодження за експонентою, що зображено на графіку.

## 2.4 Аналіз отриманих даних та результатів пристрою MICROCREOMUG

Для випробувань був створений стенд, що складається з нагріваючої алюмінієвої пластини з двома нагрівачами і охолоджуючого комп'ютерного кулера. Між ними ЕП, підключені до активного навантаження. 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 ЕП в тому числі і видається потужність.

Температуру вимірювали за допомогою термопар, підключених до мультиметра. Для цього в підставі радіатора і в нагріваючій 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.

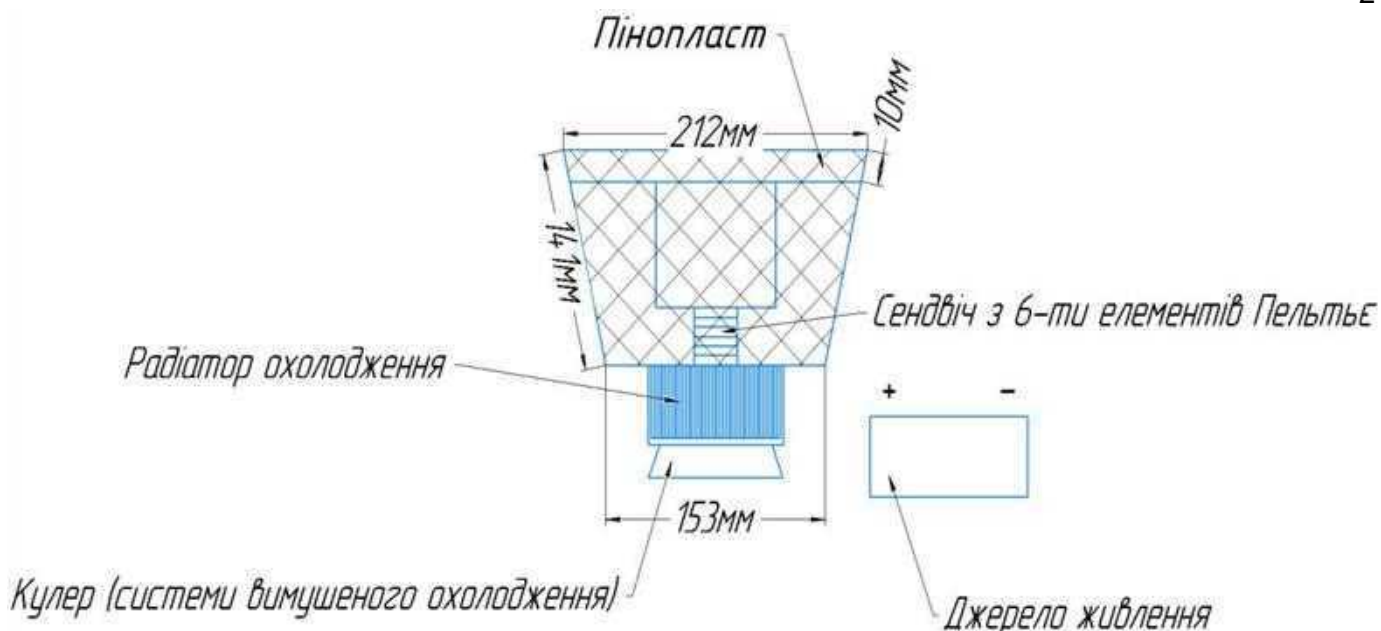


Рис. 2.7 – Випробувальний стенд – термогенератор, на основі елемента Пельтьє.

Повністю зібраний стенд виглядає так (рис 2.7) 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 е ЕП. На активному навантаженні т є ручка регулювання споживаного струму. Зробивши перший макет з шести елементів Пельтьє, було зроблено висновок, що оптимально використовувати саме чотири елемента Пельтьє серії TEC1-12706. Тепер зібравши цю конструкцію потрібно дослідити її параметри. Почнемо з дослідження залежності струму короткого замикання від напруги холостого ходу (рис. 2.1). Також було експериментально побудовано залежність (рис. 2.5) вихідної напруги елемента Пельтьє від різниці температур на сторонах елемента Пельтьє  $U(\Delta t)$ .

## ВИСНОВКИ

1. Був розроблений експериментальний стенд, та на його основі зроблені розрахунки стосовно ККД елементів Пельт'є. Стенд відображає при якій різниці температур ефективність корисного ефекту Пельт'є є найбільшою.
2. Після детального вивчення ефекту Пельт'є можна зробити висновок, незважаючи на те, що використання ефекту Пельт'є вимагає додаткових заходів і досліджень по вивченню безпечного і раціонального використання модулів Пельт'є в якості охолоджуючих пристроїв, це явище вважається перспективним і корисним для людини і цивілізації.
3. 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 пушені на виробництво хімічних сполук.
4. 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.
5. 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 °С і складатимуться з нетоксичних аналогів мінералів які існують на землі.

б. Що ми хочемо від цих матеріалів? По-перше, автомобільна промисловість, по-друге, в якійсь мірі ми можемо створювати автономні генератори електрики 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. Порівняний 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. S.B. Riffat, Xiaoli Ma, Thermoelectrics: a review of present and potential applications, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 913–935.
2. [https://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophotonics/\\_assets/pdf/f1/K3\\_Thermoelectrics.pdf](https://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophotonics/_assets/pdf/f1/K3_Thermoelectrics.pdf)
3. . D. M. Rowe ed., CRC Handbook of Thermoelectrics. CRC Press, 1995
4. <https://core.ac.uk/download/pdf/162661893.pdf>
5. J. Chen and C. Wu, “Analysis on the Performance of a Thermoelectric Generator,” J. Energy Resour. Technol., vol. 122, no. 2, p. 61, Dec. 2000
6. L. E. Bell, “Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems,” Science, vol. 321, no. 5895, pp. 1457-1461, Sep. 2008.
7. P. Sundarraj, D. Maity and R. A. Taylor, “Recent advances in thermoelectric materials and solar thermoelectric generators - a critical review,” RSC Adv., vol. 4, no. 87, pp. 46860-46874, Sep. 2014.
8. H. J. Goldsmid, Introduction to Thermoelectricity. Springer, 2009.
9. “Study of the Thomson effect on the performance of thermoelectric modules with application to the energy recovery”, J P Rojas Suárez et al 2020.
10. Wang S, Yang B, Lu C Influences of Thomson effect and additional thermal resistance on the performance of thermoelectric module Journal Tianjin Univ. Sci. Technol.47(1) 15, 2014.
10. Landau L D, Lifshitz E M, King A L 1961 Electrodynamics of continuous media Am. J. Phys. 29 647.
11. SPQEO, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, L.V. Shekhovtsov, Diagnosis of semiconductor heterosystems using the photovoltaic method, Optoelectron. Semicond. Tech. 56, 129-133 (2021).
12. SPQEO, M.M. Grigoryev, M.Yu. Kravetskii, I.M. Matiyuk, V.F. Onischenko, A.V. Sukach, V.V. Tetyorkin, Academician O. G. Goldman - the founder of semiconductor physics and technology in Ukraine (Review. Part I), Optoelectron. Semicond. Tech. 54, 5-50 (2019).
13. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/gyvermax6675/>

14. <http://www.gaw.ru/pdf/Maxim/sensor/MAX6674.pdf>

15. <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>

### З'єднання термопар з ноутбуком

Для підключення термопар до ноутбуку вирішив скористатися **Arduino UNO**. Arduino Uno - флагманська платформа для розробки мовою програмування C++. Uno виконана на мікроконтролері ATmega328P із тактовою частотою 16 МГц. На платі передбачено 20 портів входу-виходу для підключення зовнішніх пристроїв, наприклад, плат розширення або датчиків. (Рис. 3.1 – 3.6). [13-15]

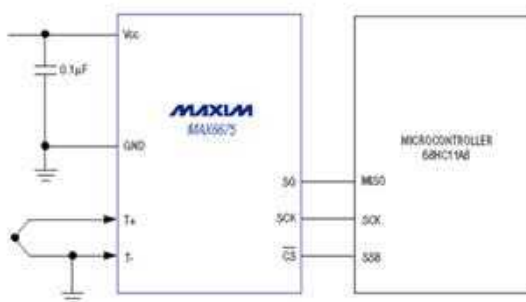


Рис. 3.1. Типова схема включення. [14]

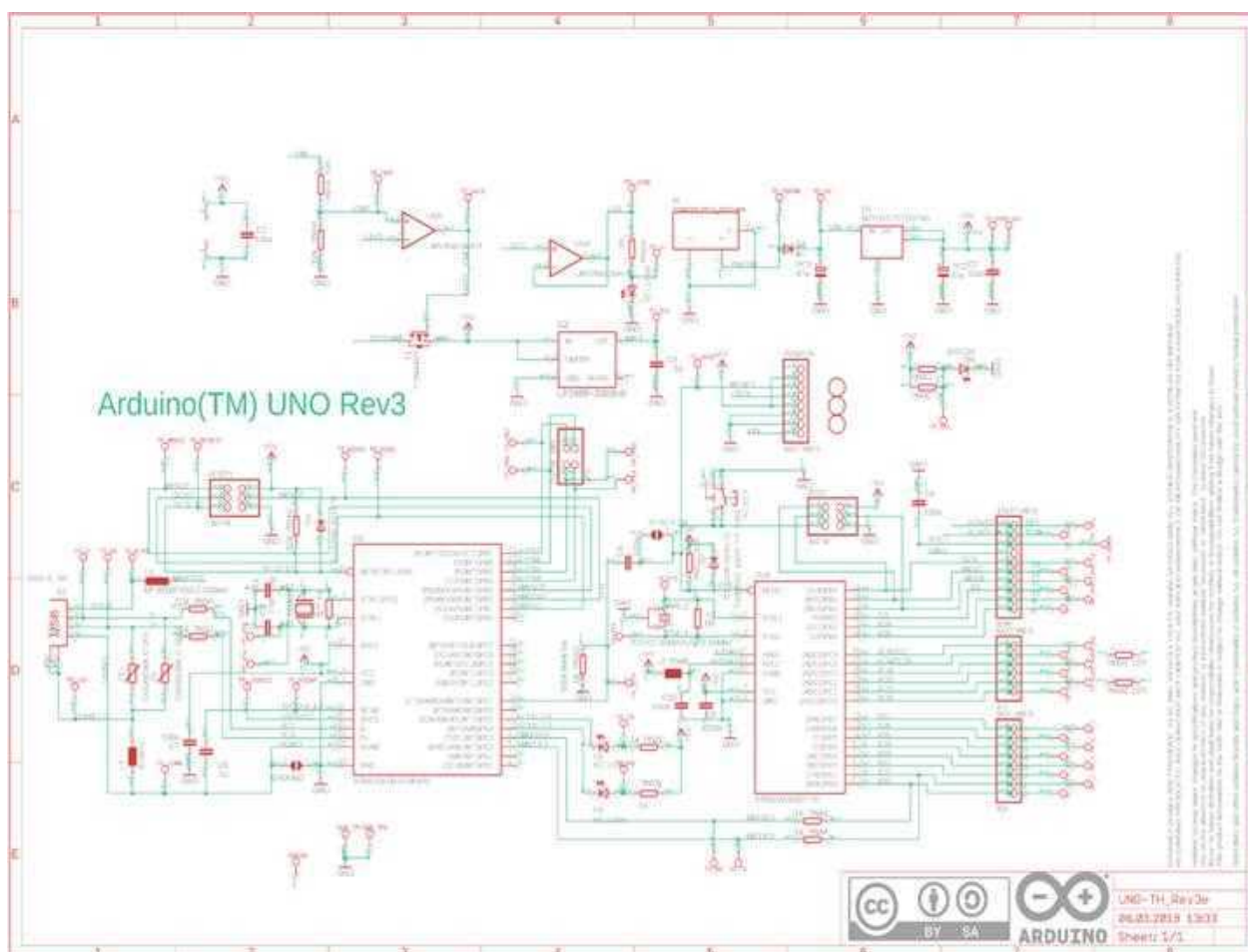


Рис. 3.2. Типова схема включення. [13]

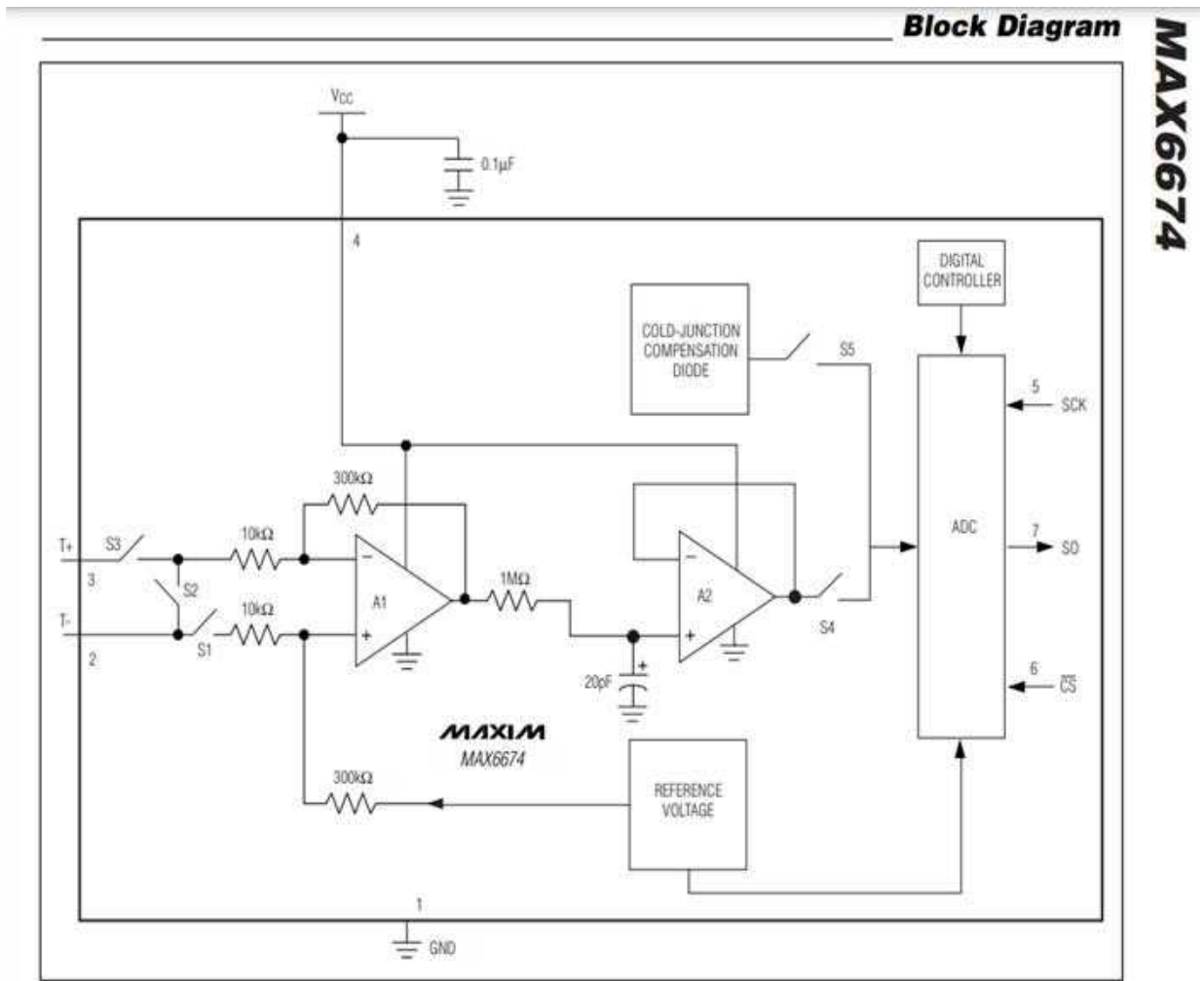


Рис3.3. Підключення підсилювачів до мікросхеми.[14]

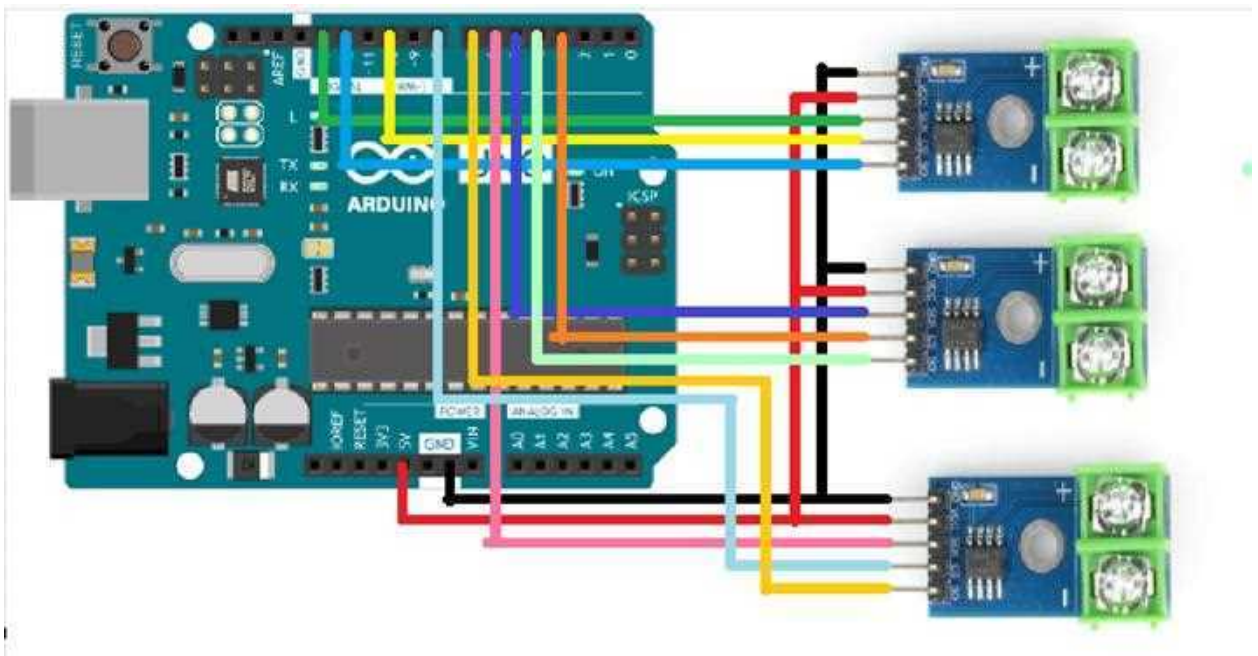


Рис. 3.4. Типова схема включення. [15]

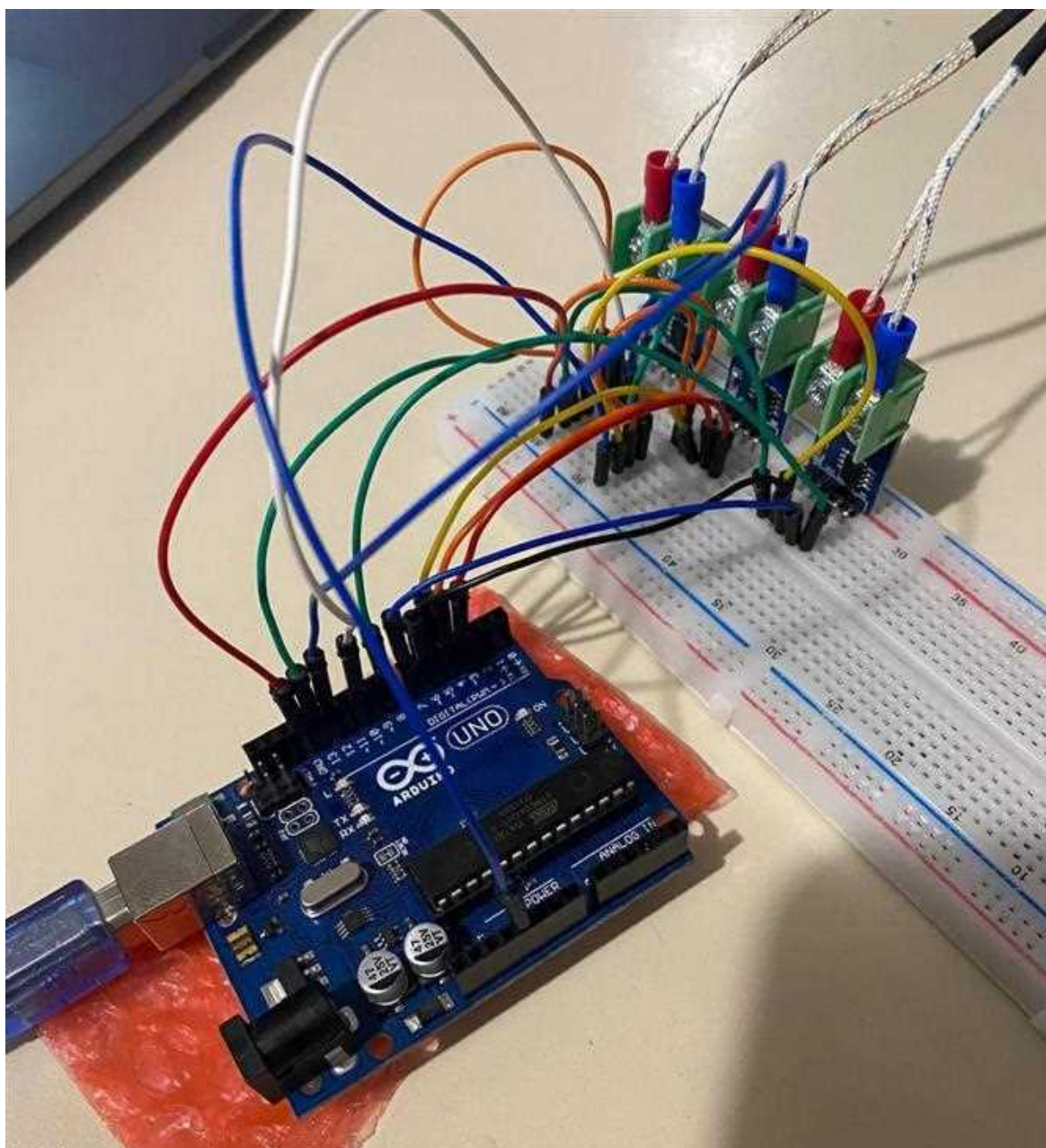


Рис. 3.5. Підключення Arduino до ноутбуку через порт USB

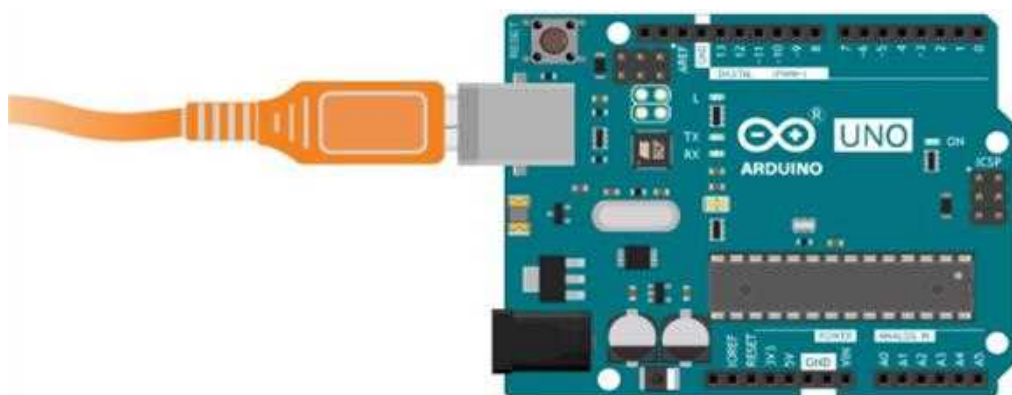


Рис. 3.6. Підключення Arduino до ноутбуку через порт USB. [15]