

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту

**Пятківський Андрій Романович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 537.322.11

(індекс)

## **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

Розроблення пристрою для діагностики параметрів термоелектричних генераторів

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 – “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело**

А. Р. Пятківський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Чуйко Мирослава Михайлівна, к. т. н, доц

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

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

В.С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 – “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІВТЕМ**

Цих В.С.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Пятківський Андрій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення пристрою для діагностики параметрів термоелектричних генераторів

**керівник роботи** Чуйко Мирослава Михайлівна, к. т. н, доц

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “30”04 2025 року № 270/7

2. Строк подання студентом роботи 23.06.2025

3. Вихідні дані до роботи вимірювана напруга 30 В, внутрішній опір термоелектричного генератора 2 Ом, сила струму 5А, діапазон температур 600-50 °С

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

1. Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів

2 Розробка пристрою для діагностики термоелектричних параметрів

3 Методика проведення експерименту і метрологічна оцінка розробленого пристрою

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

1. Алгоритм роботи пристрою

2. Схема нагромадження сумарної невизначеності

3. Розрядник схема електрична принципова

4. Розрядник складальне креслення

5. Розрядник плата

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Кривено Г.М.		
Нормоконтроль	Лютак З.П.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 30.05.2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів</i>	<i>05.05.2025-10.05.2025</i>	
2.	<i>Розробка пристрою для діагностики термоелектричних параметрів</i>	<i>11.05.2025-18.05.2025</i>	
3.	<i>Методика проведення експерименту і метрологічна оцінка розробленого пристрою</i>	<i>18.05.2025-26.05.2025</i>	
4.	<i>Охорона праці</i>	<i>27.05.2025-06.06.2025</i>	
5.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	<i>06.06.2025-10.06.2025</i>	
6.	<i>Оформлення графічного матеріалу</i>	<i>10.06.2025-15.06.2025</i>	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Пятківський А. Р.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Чуйко М. М.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота 80 ст, 18 рисунків, 9 таблиць, 21 джерело, 5 креслень

У бакалаврській роботі досліджено методи вимірювання параметрів термоелектричних генераторів (ТЕГ) та розроблено пристрій для їх діагностики. Проведено аналіз принципів роботи ТЕГ і сучасних підходів до оцінки їх ефективності, зокрема розглянуто метод Хармана, аналітичні та експериментальні методи. Визначено технічні вимоги до вимірювальної системи, сформульовано завдання розробки.

Запропоновано конструкцію діагностичного пристрою, що включає блок вимірювання теплових потоків, термопару зі схемою компенсації температури холодного спаю, електронне навантаження та імпульсний блок живлення. Детально розглянуто етапи проектування, включно з розрахунками трансформатора, елементів силової частини перетворювача та схеми керування.

Розроблено методику проведення експерименту та проведено метрологічну оцінку пристрою. Наведено приклад розрахунку властивостей матеріалу ТЕГ за результатами вимірювань і проведено аналіз похибок. Також приділено увагу питанням охорони праці при роботі з вимірювальною системою, зокрема нормалізації умов праці, вентиляції та безпеці під час експлуатації діагностичного обладнання.

Результати роботи можуть бути використані для подальших досліджень у сфері термоелектричної енергетики та вдосконалення засобів діагностики ТЕГ.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР, ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ,  
МЕТОД ХАРМАНА, КОЕФІЦІЄНТ ЗЕСБЕКА, ЕЛЕКТРОННЕ  
НАВАНТАЖЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ ПОТІК, ДІАГНОСТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ,  
ВИМІРЮВАННЯ, ІМПУЛЬСНИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ, ПОХИБКА  
ВИМІРЮВАНЬ.

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis 80 pages, 18 figures, 9 tables, 21 sources, 5 drawings

In the bachelor's thesis, methods for measuring parameters of thermoelectric generators (TEGs) were investigated and a device for their diagnostics was developed. The principles of TEG operation and modern approaches to assessing their efficiency were analyzed, in particular, the Harman method, analytical and experimental methods. Technical requirements for the measuring system were determined, and development tasks were formulated.

The design of a diagnostic device was proposed, which includes a heat flow measurement unit, a thermocouple with a cold junction temperature compensation circuit, an electronic load and a pulsed power supply. The design stages were considered in detail, including transformer calculations, elements of the power part of the converter and control circuits.

The methodology for conducting the experiment was developed and a metrological assessment of the device was carried out. An example of calculating the properties of the TEG material based on the measurement results was given and an error analysis was performed. Attention was also paid to issues of labor protection when working with the measuring system, in particular, normalization of working conditions, ventilation and safety during the operation of information equipment.

The results of the work can be used for further research in the field of thermoelectric power engineering and improving TEG diagnostic tools.

**THERMOELECTRIC GENERATOR, THERMOELECTRIC MODULE, HARMAN METHOD, SEEBECK COEFFICIENT, ELECTRONIC LOAD, HEAT FLOW, DIAGNOSTIC DEVICE, MEASUREMENT, PULSE POWER SUPPLY UNIT, MEASUREMENT ERROR.**

## ЗМІСТ

Вступ	6
1. Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів	8
1.1 Принципи роботи термоелектричних генераторів	8
1.2 Огляд методів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів	25
1.2.1 Початкова оцінка продуктивності термоелектричних модулів	25
1.2.2 Аналітична оцінка властивостей термоелектричних модулів	31
1.2.3 Метод Хармана для оцінки властивостей термоелектричних модулів	35
1.2.4 Оцінка ефективності на основі відомих максимальних параметрів	36
1.3 Постановка завдання дипломної роботи	39
2 Розробка пристрою для діагностики термоелектричних параметрів	42
2.1 Загальні принципи функціонування пристрою	42
2.2 Проектування блоків вимірювання теплових потоків	46
2.3 Підключення термопари і вибір схеми компенсації температури холодного спаю	49
2.4 Проектування електронного навантаження	50
2.5 Розрахунок елементів імпульсного блоку живлення	58
2.5.1 Аналіз схеми перетворювача	60
2.5.2 Вибір і розрахунки трансформатора	61
2.5.3 Розрахунки елементів силової частини перетворювача	63
2.5.4 Розробка схеми управління	66
3 Методика проведення експерименту і метрологічна оцінка розробленого пристрою	73
3.1 Розробка методики проведення експерименту	73
3.2 Розрахунок властивостей матеріалу ТЕГ з отриманих експериментальних даних	77
3.3 Оцінка похибки розробленого пристрою	80
4 Охорона праці	88
4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов праці.	
4.2 Забезпечення безпеки при роботі з вимірювальною системою	90
4.3 Забезпечення нормальних умов праці	90
4.3.1 Розрахунок штучної вентиляції	92
4.4 Забезпечення безпеки роботи з установкою для дослідження властивостей термоелектричних модулів	93
Висновки	97
Перелік посилань на джерела	98
Додатки	101

## ВСТУП

Термоелектричні ефекти базуються на здатності перетворювати теплову енергію в електричну та навпаки. Коли такі пристрої використовуються для генерації електроенергії, їх називають термоелектричними генераторами (ТЕГ). У режимі охолодження вони функціонують як термоелектричні охолоджувачі (ТЕО). Ці пристрої мають твердотільну конструкцію, що дозволяє їм працювати без застосування рідин чи проміжних процесів. Відсутність рухомих елементів робить їх менш вразливими до механічного зносу, що забезпечує довготривалу роботу з мінімальним обслуговуванням. До того ж, вони забезпечують безшумне охолодження, на відміну від традиційних компресорних систем, та не утворюють шкідливих викидів чи забруднюючих речовин. Завдяки цим перевагам термоелектричні пристрої є перспективними для широкого застосування для нагріву або охолодження або генерування енергії [1].

Термоелектричні пристрої застосовуються для генерації енергії, зокрема, в автомобілях як елементи систем рекуперації тепла вихлопних газів. У таких системах теплова енергія, що проходить уздовж вихлопної труби, перетворюється на електричну [1]. У космічних дослідженнях роботизовані апарати використовують термоелектричні генератори (ТЕГ) для отримання електроенергії з тепла, що утворюється внаслідок розпаду радіоактивних ізотопів [2]. Сонячні термоелектричні генератори, у свою чергу, вловлюють сонячне випромінювання і перетворюють отриману теплову енергію на електрику за рахунок термоелектричних ефектів [3][4].

З іншого боку, термоелектричні пристрої активно використовуються для обігріву та вентиляції в транспортних засобах. Вони входять до складу термоелектричних кондиціонерів і систем клімат-контролю, а також мають потенціал стати альтернативою традиційним компресорним системам охолодження в автомобілях [5]. Завдяки високому рівню технологічності та можливості мініатюризації, ці пристрої є ефективним рішенням для точного температурного регулювання, зокрема у медичному обладнанні, такому як хірургічні інструменти, та в телекомунікаційних системах, наприклад, для

охолодження волоконно-оптичних лазерів [6]. Крім того, їх можна інтегрувати в мікропроцесори для забезпечення високоточного контролю температури [7].

Розробники часто зіштовхуються з проблемами, пов'язаними з нестандартними форматами даних про продуктивність, які надають виробники термоелектричних модулів. За відсутності експериментального обладнання, єдиним шляхом оцінки ефективності таких пристроїв залишається аналітичне моделювання на основі матеріальних характеристик, які, як правило, не розголошуються або повністю невідомі. У цій бакалаврській роботі розглядається теоретичний підхід до визначення властивостей матеріалів шляхом аналізу граничних робочих параметрів, наданих виробниками. Отримані значення використовуються в подальшому для аналітичної оцінки експлуатаційних характеристик термоелектричних модулів. Крім того, були розроблені методи для експериментальної перевірки отриманих характеристик.

# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

## 1.1 Принципи роботи термоелектричних генераторів

Термоелектричні генератори складаються із термоелектричного матеріалу який нерівномірно нагрітий і має ізотропні властивості, рівняння нерозривності для постійної густини струму  $\mathbf{J}$  задається у вигляді

$$\mathbf{\nabla} \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (1.1)$$

де  $\mathbf{\nabla}$  - диференційний оператор по відношенню до довжини. Електричний потенціал (або електричне поле  $\mathbf{E}$  в даному випадку) мають вклади від двох ефектів закону Ома і ефекту Зеєбека, які виходить шляхом диференціювання рівняння  $U = \alpha \cdot \Delta T$  по відношенню до довжини. Електричне поле задається як

$$\mathbf{E} = \mathbf{J} \cdot \rho + \alpha \cdot \mathbf{\nabla} \cdot T. \quad (1.2)$$

Вектор густини теплового потоку  $\mathbf{q}$  виражається як

$$\mathbf{q} = \alpha T \mathbf{J} - k \mathbf{\nabla} T, \quad (1.3)$$

де  $T$  температура межі теплового потоку. Величина  $\alpha T \mathbf{J}$  є теплової внесок Пельтьє, в той час як  $k \mathbf{\nabla} T$  дає теплопередачу від закону Фур'є. Загальне рівняння теплопровідності як функція часу задається

$$-\mathbf{\nabla} \cdot \mathbf{q} + \Phi = \rho_m c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.4)$$

де  $\Phi$  являє собою тепло, що генерується на одиницю об'єму,  $\rho_m$  є масова густина матеріалу,  $c_p$  питома теплоємність і  $\frac{\partial T}{\partial t}$  - швидкість зміни температури по відношенню до часу. Тільки з урахуванням умов сталого стану призводить до того, що залежить від часу  $\frac{\partial T}{\partial t}$  прямує до нуля. Рівняння (1.4), після перестановки, зводиться до

$$\Phi = \mathbf{\nabla} \cdot \mathbf{q}, \quad (1.5)$$

Співвідношення між коефіцієнтом теплової енергії, що генерується і електричною потужністю виражається як

$$\mathcal{E} = \dot{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{J}} = J^2 \cdot \rho + \dot{\mathbf{J}} \cdot \alpha \cdot \dot{\nabla} \cdot T, \quad (1.6)$$

рівняння (1.3) і (1.6) можна підставити в рівняння (1.5) щоб отримати

$$\dot{\nabla} \cdot (k \dot{\nabla} T) + J^2 \rho - T \frac{d\alpha}{dT} \dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\nabla} T = 0, \quad (1.7)$$

де  $T \frac{d\alpha}{dT} = \tau$  і відомий як коефіцієнт Томсона. Величина  $J^2 \rho$  це форма джоулевого тепла, що виникає у всіх струмоведучих матеріалах через взаємодію між електричним струмом і опором.

Тепер розглянемо коло із двох різнорідних металів, термоелектричну пару, з'єднаних один з одним і опір навантаження (у разі генератора) або джерело енергії (у разі включення як охолоджувач). Кожен елемент, взаємозамінний і називається термоелектрична нога, позитивна (позначаються як p- тип) або негативна (позначаються як n- тип). Разом два елементи утворюють термоелектричну пару і використовуються в якості основи для розробки основних рівнянь термоелектричних пристроїв.

Термоелектричні елементи легують, щоб їх носії заряду більш легко звільнялися. У разі вироблення електроенергії джерелом збурення є тепло, утворюються вільні електрони і дірки, які рухаються в протилежних напрямках. Ці носії заряду показують напрямок струму в термоелектричних парах, дірки рухаються за напрямком струму, а електрони в зворотному. На противагу цьому, коли електричний струм подається дірки прилипати до напрямку струму в той час як електрони рухаються в протилежному напрямку. Це проілюстровано на рисунку 1.1 а. Вільні електрони несуть теплову енергію, і це дає можливість забезпечити передачу тепла.

Термоелектричний пара, яка складається з елемента p- типу і одного n- типу з усіма його складовими властивостями матеріалу ( $\alpha$ ,  $\rho$  і  $k$ ) і геометричної інформації (поздовжньої довжиною і бічними площами поперечного перерізу) представлена на рисунку 1.1 б. Нижні індекси відносяться до матеріалів p- і n- типу, відповідно. Обидва елементи знаходяться

при тих же температурах переходу  $T_1$  і  $T_2$  на протилежних кінцях, де відбуваються рівномірні теплові потоки, і обидва елементи піддаються дії таких же величин струму  $I$ .  $Q_1$  і  $Q_2$  швидкості передачі тепла, які виникають при переходах з температурами  $T_1$  і  $T_2$ , відповідно. Напрямок це не більше, ніж система координат для довідки.

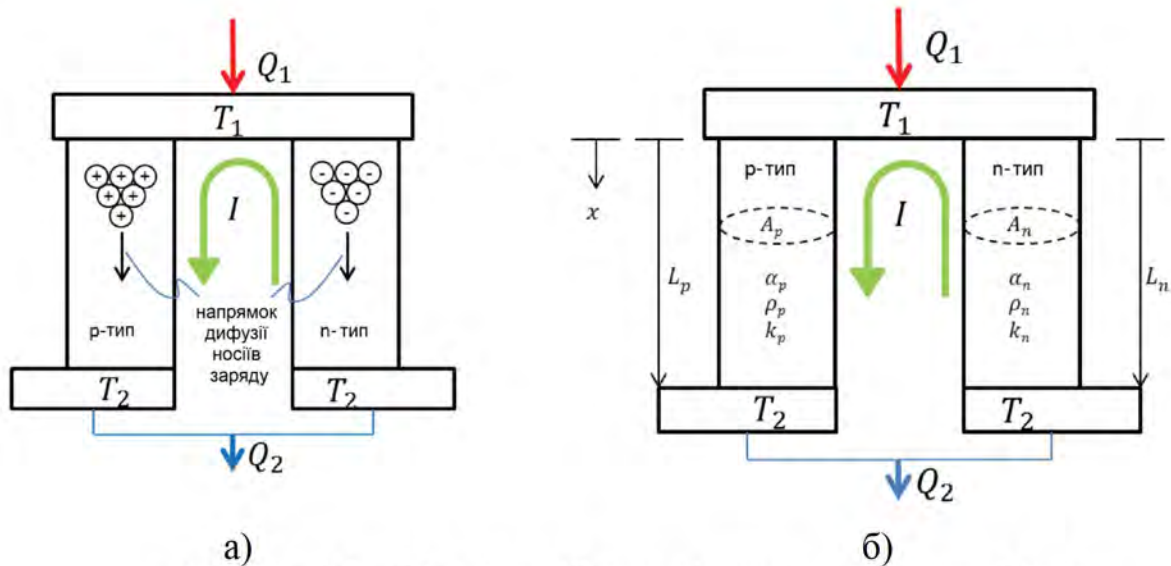


Рисунок 1.1 – Поздовжній переріз термоелектричної пари

Розглянемо диференційний елемент одної з термоелектричних ніг з площею поперечного перерізу  $A$  і диференціальною довжиною  $dx$ , як показано на рисунку 1.2. Однорідний струм  $I$ , який проходить через диференційний елемент з електричним опором  $\rho$  буде викликати джоулів ефектів нагрівання. В даний час передбачається, що джоулеве тепло є єдиним джерелом внутрішньої енергії, що генерується всередині диференціального елемента.

Прийmemo знак конвенції теплового потоку в елементі позитивним, розглядаючи тільки одну розмірність і рівняння (1.5), тепловий баланс на диференціальному елементі тепер стає

$$q_x - \left( q_x + \frac{dq_x}{dx} \right) dx + \frac{I^2 \rho}{A} dx = 0, \quad (1.8)$$

де  $q_x$  є тепловим потоком. Рівняння (1.3), помножене на площу перпендикулярну напрямку теплового потоку  $A$  в цьому випадку, отримаємо

$$q_x = \alpha T(x)I - kA \frac{dT}{dx}, \quad (1.9)$$

де  $I = J_x A$  і температура  $T$  є функцією положення  $x$ . При  $x = 0$  рівняння (1.9) стане

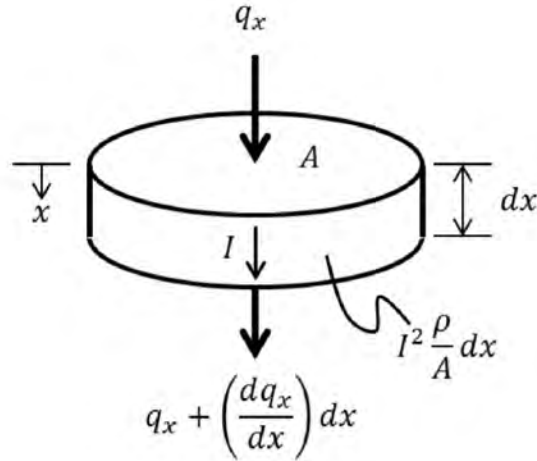


Рисунок 1.2 – Диференціальний елемент з термоелектричної пари

$$q_{x=0} = \alpha T_1 I - kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}, \quad (1.10)$$

диференціюючи рівняння (1.10) по  $x$  отримаємо

$$\frac{dq_x}{dx} = -kA \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right), \quad (1.11)$$

підставляючи рівняння (1.11) в рівняння (1.8) і перегрупувавши отримаєм

$$kA \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) = -\frac{I^2 \rho}{A}, \quad (1.12)$$

інтегруючи рівняння (1.12) один раз отримаєм

$$kA \int d \left( \frac{dT}{dx} \right) = -\frac{I^2 \rho}{A} \int dx \rightarrow \frac{dT}{dx} = -\frac{I^2 \rho}{kA^2} x + C_1, \quad (1.13)$$

де  $C_1$  постійна невизначеного інтегрування. Інтегруючи рівняння (1.13) знову в межах від  $x = 0$  до  $x = L$  з граничними умовами  $T(x = 0) = T_1$  і  $T(x = L) = T_2$  веде до

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{I^2 \rho}{kA^2} \int_0^L x + \int_0^L x C_1 \rightarrow (T_2 - T_1) = -\frac{I^2 \rho}{2kA^2} L^2 + C_1 L, \quad (1.14)$$

рівняння (1.14) може бути перероблене, щоб отримати постійні інтегрування  $C_1$  як

$$C_1 = \frac{(T_2 - T_1)}{L} + \frac{I^2 \rho}{2kA^2} L, \quad (1.15)$$

підставляючи рівняння (1.15) в (1.13) при  $x = 0$  дає

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{(T_2 - T_1)}{L} + \frac{I^2 \rho}{2kA^2} L. \quad (1.16)$$

За аналогічним рівнянням оцінимо (1.13) при  $x = L$  виходить

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = \frac{(T_2 - T_1)}{L} + \frac{I^2 \rho}{2kA^2} L, \quad (1.17)$$

підставляючи рівняння (1.16) в (1.9) отримаємо

$$q_{x=0} = \alpha T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho L}{A} + \frac{kA}{L} (T_1 - T_2). \quad (1.18)$$

Для відповідних елементів (р- і n- типу) рівняння (1.18) стає

$$q_{p,x=0} = \alpha_p T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{k_p A_p}{L_p} (T_1 - T_2), \quad (1.19)$$

$$q_{n,x=0} = \alpha_n T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{k_n A_n}{L_n} (T_1 - T_2). \quad (1.20)$$

Коефіцієнт Зеебека для елемента n- типу є негативним, так як він є негативно легованим і несе попередній негативний знак для того, щоб підтвердити термоелектричні рівняння. За аналогічним чином рівняння переносу тепла для  $x = L$  р- і n- типу, з  $T(x = L) = T_2$  і рівняння (1.17), виявляються

$$q_{p,x=L} = \alpha_p T_2 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{k_p A_p}{L_p} (T_1 - T_2), \quad (1.21)$$

$$q_{n,x=L} = -\alpha_n T_2 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{k_n A_n}{L_n} (T_1 - T_2). \quad (1.22)$$

На рисунку 1.1 б, розуміючи, що  $Q_1 = q_{p,x=0} + q_{n,x=0}$  і  $Q_2 = q_{p,x=L} + q_{n,x=L}$  відповідні швидкості теплопередачі в місцях з'єднання термоелектричної пари є

$$Q_1 = (\alpha_p - \alpha_n) T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \left( \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) + \left( \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_1 - T_2), \quad (1.23)$$

$$Q_2 = (\alpha_p - \alpha_n) T_2 I - \frac{1}{2} I^2 \left( \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) + \left( \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_1 - T_2). \quad (1.24)$$

Властивості матеріалу р- і n- типу елементів можуть бути пов'язані один з одним з використанням наступних рівнянь

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n, \quad (1.25)$$

$$R = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n}, \quad (1.26)$$

$$K = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n}, \quad (1.27)$$

де  $R$  і  $K$  загальний електричний опір і теплопровідність пари, відповідно. використовуючи рівняння (1.25) – (1.27), рівняння (1.22) і (1.24) можна спростити

$$Q_1 = \alpha T_1 I - \frac{1}{2} I^2 R + K (T_1 - T_2), \quad (1.28)$$

$$Q_2 = \alpha T_2 I - \frac{1}{2} I^2 R + K (T_1 - T_2), \quad (1.29)$$

рівняння (1.28) і (1.29) відомі як ідеальні рівняння. Виключаючи попередні знаки, то перший член в рівняннях (1.28) і (1.29)  $\alpha T I$  відомий як ефект Пельтьє / Зеебека і є оборотним це рушійна сила термо ЕРС. Чим сильніше ефект Пельтьє / Зеебека, тим більше ефект нагрівання, охолодження або вироблення електроенергії. Другий член -  $\frac{1}{2} I^2 R$  в цих двох рівнянь є Джоулеве тепло, яке походить від взаємодії електричного струму і опору і працює проти основної властивості, тобто охолодження або вироблення електроенергії. Однак цей ефект, допомагає пристроям, спрямованим на нагрів. Останній член  $K(T_1 - T_2)$  це теплопровідність, яка відбувається через різницю температур в будь-якому матеріалі, а також працює проти охолоджуючої потужності. Обидва ефекти Джоуля і теплопровідність є незворотніми.

Основний конструкційний елемент термоелектричного генератора термоелектрична пара матеріалів р- типу і n- типу. Рисунок 1.3 ілюструє типовий термоелектричний модуль, який складається з декількох термоелектричних пар, з'єднаних одне з одною за допомогою електричних провідників і затиснутий між двома керамічними пластинами. Електричні провідники розташовані так, що термоелектричні пари з'єднані послідовно одна з одними. Керамічні пластини виступають в якості ізолятора для запобігання від короткого замикання провідників і пар між собою.

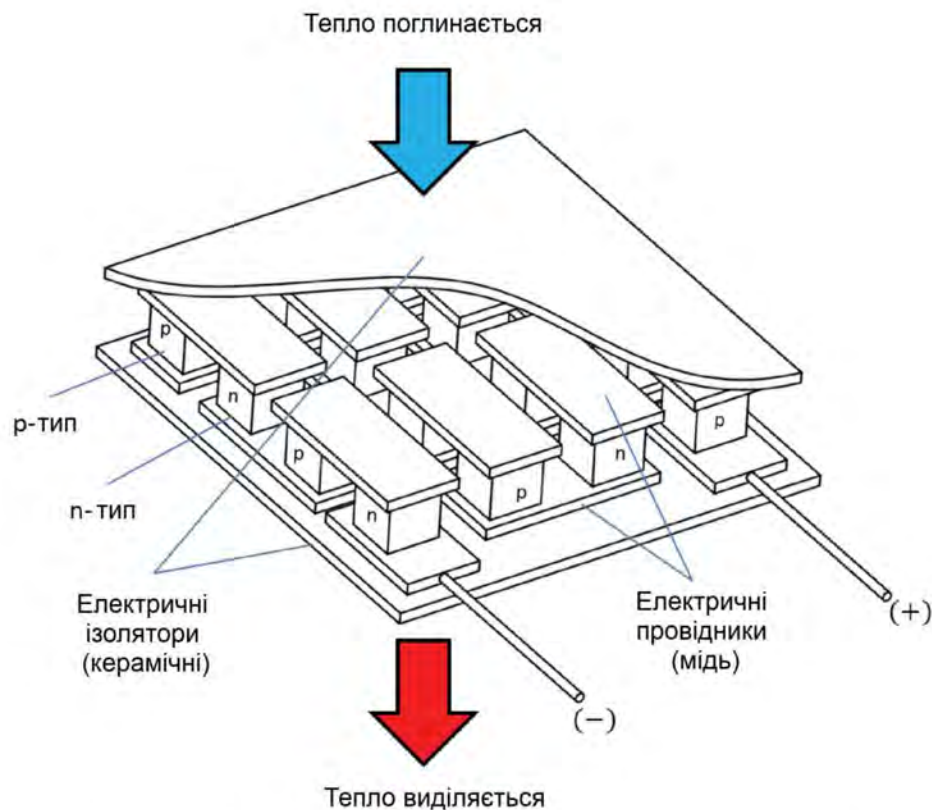


Рисунок 1.3 – Розріз термоелектричного модуля

Функції ТЕГ для перетворення теплової енергії або різниці температур в корисну електроенергію рис 1.4. Використовуючи відповідні гарячі і холодні температури переходу,  $T_r$  і  $T_x$ , замість температур  $T_1$  і  $T_2$ , відповідно, рівняння (1.28) і (1.29) стають

$$Q_r = \alpha T_r I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_r - T_x), \quad (1.30)$$

$$Q_x = \alpha T_x I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_r - T_x), \quad (1.31)$$

де  $Q_r$  і  $Q_x$  швидкості теплопередачі в гарячих і холодних спаях ТЕГ, відповідно.

Візуально ТЕГ це аналог теплового двигуна перший закон термодинаміки говорить, що сума всіх енергій яка входять і виходять в ізолювану систему, повинні бути враховані. Напрямок конвенції, прийнятий тут: позитивний потік тепла або енергії в систему і негативна для потоку тепла або енергії з системи, як показано в на рисунку 1.4. Пряма кореляція між швидкістю передачі тепла і електричної потужністю є

$$W = Q_r - Q_x, \quad (1.32)$$

$$W = \alpha I(T_r - T_x) - I^2 R, \quad (1.33)$$

Аналогічним чином, замість того щоб використовувати внутрішній опір термоелектричної пари  $R$ , вихідна потужність  $W$  може бути обчислена з точки зору опору навантаження  $R_L$  (рис. 1.5) з

$$W = I^2 R_L = IU, \quad (1.34)$$

де  $U$  являє собою напругу через резистор навантаження. Ще інакше,  $U$  можна обчислити з вкладів за законом Ома, і напруга Зеебека через наступні рівняння

$$U = IR_L = \frac{W}{I} = \alpha(T_r - T_x) - IR. \quad (1.35)$$

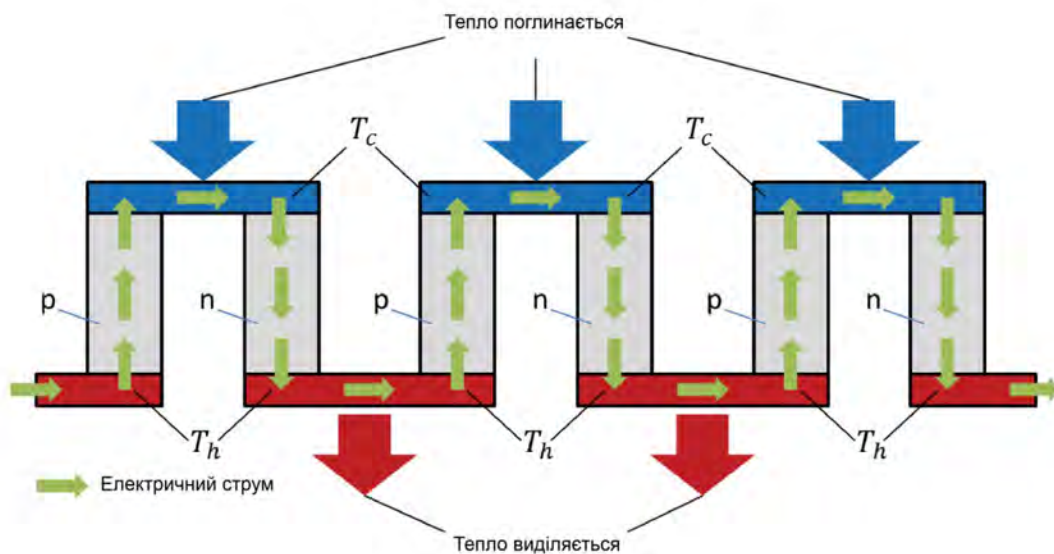


Рисунок 1.4 – Електрична і теплова можливості підключення ТЕО пар в межах модуля

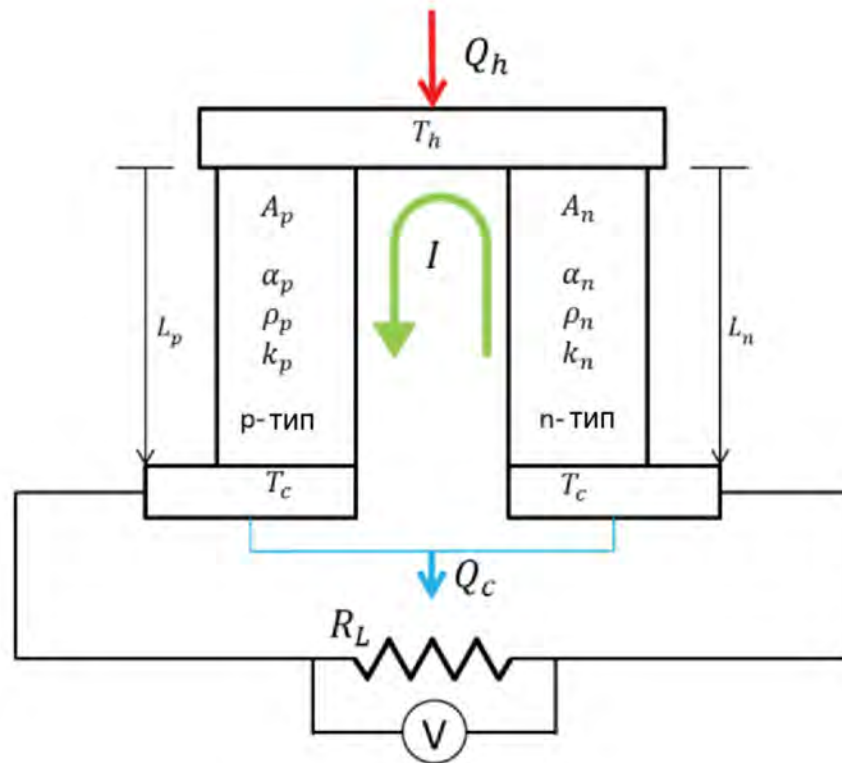


Рисунок 1.5 – ТЕГ приєднаний до навантаження

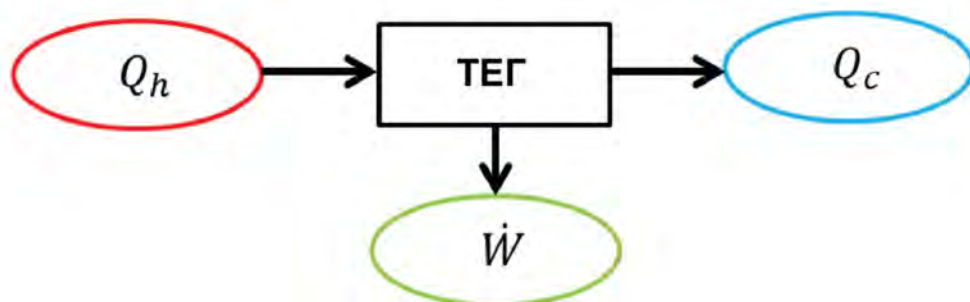


Рисунок 1.6 – Енергетичний баланс для ТЕГ

Таким чином, струм в колі дорівнює

$$I = \frac{\alpha(T_r - T_x)}{R_L + R}. \quad (1.36)$$

Теплова ефективність ТЕГ  $\eta$  являє собою відношення вихідної потужності до вхідної потужності (швидкості передачі тепла в системі) і визначається як

$$\eta = \frac{W}{Q_r} = \frac{I^2 R_L}{\alpha T_r I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_r - T_x)}. \quad (1.37)$$

Співвідношення опорів  $R_L/R$  є важливим параметром при проектуванні. Використовуючи співвідношення для визначення коефіцієнта добротності, з рівняння  $Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k}$ , і струм, з рівняння (1.36), рівняння (1.37) може бути змінено з точки зору співвідношення  $R_L/R$

$$\eta = \frac{\frac{R_L}{R} \left(1 - \frac{T_x}{T_r}\right)}{\left(1 - \frac{R_L}{R}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_x}{T_r}\right) + \frac{1}{2ZT} \left(1 - \frac{R_L}{R}\right)^2 \left(1 + \frac{T_x}{T_r}\right)}. \quad (1.38)$$

Є два режими роботи ТЕГ щоб отримати його максимальні параметри: максимальна вихідна потужність або максимальна ефективність перетворення. Змінний параметр в обох цих випадках співвідношення між  $R_L/R$ . Ці режими можуть бути встановлені користувачем відповідно до мети застосування, вибором відповідного значення співвідношення  $R_L/R$ . У разі максимальної вихідної потужності  $W$  в рівнянні (1.34) диференціювання по  $R_L/R$  встановлюється рівним нулю. Це дає

$$\frac{dW}{d\left(\frac{R_L}{R}\right)} = 0 \rightarrow \frac{R_L}{R} = 1. \quad (1.39)$$

Результуючий струм  $I_{\max p}$ , вихідна потужність  $W_{\max}$  і ефективність  $\eta_{\max p}$  при максимальній потужності, відповідно,

$$I_{\max p} = \frac{\alpha(T_r - T_x)}{2R}, \quad (1.40)$$

$$W_{\max} = \frac{\alpha^2(T_r - T_x)^2}{4R}, \quad (1.41)$$

$$\eta_{\max p} = \frac{1 - \left(\frac{T_x}{T_r}\right)}{2 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_x}{T_r}\right) + 4 \frac{\frac{T_x}{T_r}}{Z T_x}}, \quad (1.42)$$

Інший режим роботи максимального параметра є ситуація, коли ТЕГ працює з максимальною ефективністю перетворення. Теплова ефективність  $\eta$  диференційована по співвідношенню опорів  $R_L/R$  і встановлюється рівною нулю, що дає

$$\frac{d\eta}{d\left(\frac{R_L}{R}\right)} = 0 \rightarrow \frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + Z\bar{T}}, \quad (1.43)$$

де  $\bar{T}$  середні температури переходів і вони рівні

$$\bar{T} = \frac{T_r + T_x}{2} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left(\frac{T_x}{T_r}\right)^{-1} \right]. \quad (1.44)$$

Результуючий струм  $I_{\max c}$ , вихідна потужність  $W_{\max c}$  і ефективність  $\eta_{\max}$  при максимальній ефективності перетворення, відповідно,

$$I_{\max c} = \frac{\alpha(T_r - T_x)}{R(\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1)}, \quad (1.45)$$

$$W_{\max c} = \frac{\alpha^2(T_r - T_x)^2 \sqrt{1 + Z\bar{T}}}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1}, \quad (1.46)$$

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{T_x}{T_r}\right) \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_x}{T_r}}. \quad (1.47)$$

Максимальні робочі параметри можуть тепер бути визначені шляхом нормалізації вихідної потужності  $W$ , струму  $I$  і напруги  $U$  з їх відповідних одиночних значень максимальної потужності  $W_{\max}$ , максимальний струм  $I_{\max}$  і максимальна напруга  $U_{\max}$ . Використовуючи рівняння (1.34) і (1.36) і поділивши на (1.41) відношення вихідної потужності до максимальної вихідної потужності є

$$\frac{W}{W_{\max}} = \frac{\left[ \frac{\alpha(T_r - T_x)}{R_L + R} \right]^2 R_L}{\frac{\alpha^2 (T_r - T_x)^2}{4R}} = \frac{4 \frac{R_L}{R}}{\left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)^2}. \quad (1.48)$$

Максимальний струм  $I_{\max}$  проходить, коли опір навантаження  $R_L$  рівняння (1.34) встановлюється рівним нулю - режим короткого замикання. Таким чином, максимальний струм

$$I_{\max} = I_{\text{кз}} = \frac{\alpha(T_r - T_x)}{R}. \quad (1.49)$$

Рівняння (1.34) і (1.49) дають

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{\frac{\alpha(T_r - T_x)}{R_L + R}}{\frac{\alpha(T_r - T_x)}{R}} = \frac{1}{\frac{R_L}{R} + 1}. \quad (1.50)$$

Максимальна напруга виникає при режимі відкритої кола. При такому режимі навантаження і внутрішній опір буде перебувати в послідовному з'єднанні кола (рис. 1.7), що роблять суму опорів в колі  $\Sigma R = R_L + R$  за допомогою закону Ома і з рівняння (1.35)

$$U_{\max} = U_{\text{xx}} = I(R_L + R) = \alpha(T_r - T_x). \quad (1.51)$$

В якості альтернативи, рівняння (1.35) можна розглядати як спад напруги за законом Ома працює проти напруги Зеебека, в результаті чого відбувається максимум, коли напруга за законом Ома стає рівною нулю (так як  $R \neq 0$ ,  $I = 0$ ). Це призводить до розмикання кола.

Розділивши рівняння (1.35) по (1.51) відношення напруги до максимальної напруги

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{IR_L}{I(R_L + R)} = \frac{\frac{R_L}{R}}{\frac{R_L}{R} + 1}. \quad (1.52)$$

Розділивши рівняння (1.37) на (1.42) дає нормалізовану ефективність

$$\frac{\eta}{\eta_{\max}} = \frac{\frac{R_L}{R} \left[ \sqrt{1 + \frac{ZT_c}{2} \left( 1 + \left( \frac{T_x}{T_r} \right)^{-1} \right)} + \frac{T_x}{T_r} \right]}{\left[ \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right) - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_x}{T_r} \right) + \frac{\left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)^2 \frac{T_x}{T_r}}{ZT_c} \right] \left[ \sqrt{1 + \frac{ZT_c}{2} \left( 1 + \left( \frac{T_x}{T_r} \right)^{-1} \right)} - 1 \right]} \quad (1.53)$$

Холодна температура переходу  $T_x$ , як правило, основа для ТЕГ, тому що він обмежений на охолодження системи від чого буде залежати його продуктивність. Ці чотири нормованих параметри можуть бути зображені графічно як функції коефіцієнта опору  $R_L/R$  при певних співвідношеннях температури переходу  $T_x/T_r$  і безрозмірною добротністю (вимірюється при холодній температурі переходу) значеннях  $ZT_x$ . Співвідношення опорів є змінним параметром, який можна регулювати, а відношення температури переходу і безрозмірний показник добротності представляють робочі параметри і обмеження властивостей матеріалів, відповідно.

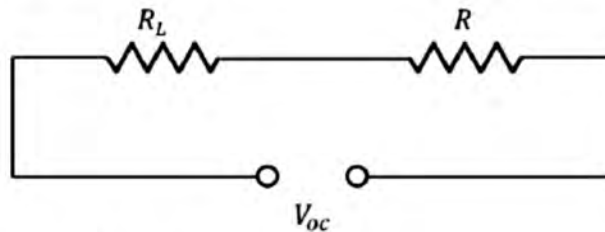


Рисунок 1.7 – ТЕГ режим не замкненого кола

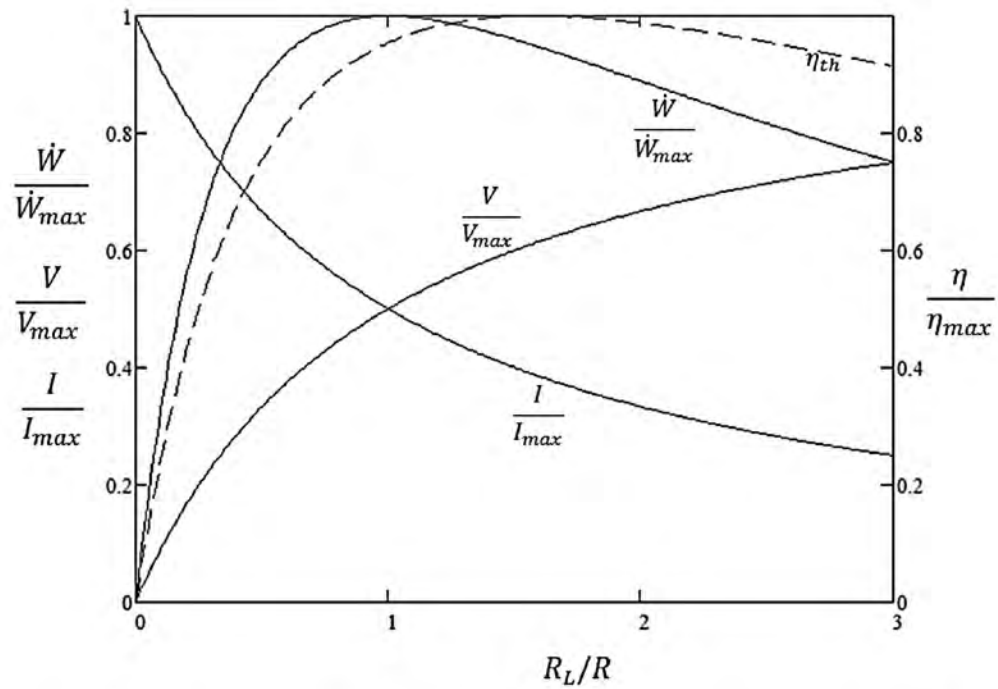


Рисунок 1.8 – Узагальнена продуктивність ТЕГ при  $T_x/T_r = 0,5$  і  $ZT_x = 1$

Температури переходів вказують на навколишнє середовище або таких як температура гарячої і холодної сторін і тепловідведення конструкцій в той час як безрозмірний показник добротності пов'язаний з типом термоелектричного матеріалу.

Рисунок 1.8 ілюструє узагальнену продуктивність, характерну для ТЕГ з типовими значеннями  $T_x/T_r = 0,5$  і  $ZT_x = 1$ . Параметри були аналітично отриманими з використанням рівнянь (1.48), (1.50), (1.52) і (1.53). Максимальна потужність виникає, коли опір навантаження узгоджено з внутрішнім опором ( $R_L/R = 1$ ). Ефективність має максимальне значення при  $R_L/R = \sqrt{1 + Z\bar{T}}$ , або, зокрема в цьому випадку при 1,581. На основі  $T_x$

$$Z\bar{T} = \frac{ZT_x}{2} \left( 1 + \left( \frac{T_x}{T_r} \right)^{-1} \right). \quad (1.54)$$

Так як термоелектричний модуль являє собою поєднання більш ніж одну термоелектричну пару деякі параметри для термоелектричного модуля просто рівні параметрам однієї пари, помножене на загальне число пар всередині модуля  $n$ . Ці модульні параметри, що позначаються з нижнім індексом  $m$ , є

$$(W)_m = nW, \quad (1.55)$$

$$(Q_r)_m = nQ_r, \quad (1.56)$$

$$(Q_x)_m = nQ_x, \quad (1.57)$$

$$(R)_m = nR, \quad (1.58)$$

$$(R_L)_m = nR_L, \quad (1.59)$$

$$(U)_m = nU, \quad (1.60)$$

$$(K)_m = nK, \quad (1.61)$$

Струм, що проходить через термоелектричний модуль  $(I)_n$  і опір навантаження узгоджується з струмом  $I$ , який проходить через одну пару, так як всі пари з'єднані послідовно. Ефективність однієї пари всередині модуля також представляє ефективність всього модуля, так як пари з'єднані для тепла паралельно; кожна пара поглинає і виділяє таку ж кількість тепла і виробляє ту ж саму кількість вихідної потужності.

## **1.2 Огляд методів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів**

Оцінка ефективності термоелектричних модулів є темою для постійного вивчення. Обидва підходи аналітичні та експериментальні з'являються в літературі з різним ступенем точності вимірювань в порівнянні з даними продуктивності від виробника. Подібності були знайдені в аналітичних і експериментальних методах і методиках між різними дослідницькими групами і їх публікаціями, що дозволяють провести їх класифікацію. Тут представлені чотири основні групи: базова оцінка продуктивності, оцінка властивостей модуля, метод Хармана і ефективність на основі максимальних параметрів.

### **1.2.1 Початкова оцінка продуктивності термоелектричних модулів**

Дослідники зазвичай обирають спрощені методи оцінки ефективності, оскільки такі підходи легше передати кінцевим користувачам термоелектричних перетворювачів або конструкторам для подальшого відтворення. Експериментальні дослідження здебільшого спрямовані на перевірку достовірності заявлених виробником характеристик шляхом зіставлення отриманих результатів з наданими даними. У цьому розділі розглядаються не власне термоелектричні властивості матеріалів, з яких виготовлено модулі, а акцент зроблено на експериментальних методах, що дозволяють відтворити криві продуктивності, наведені виробником. Випробування виконуються за різних умов експлуатації, оскільки точні параметри тестування виробником зазвичай невідомі. Наприклад, важливою є інформація про те, чи проводились випробування у вакуумному середовищі, що суттєво впливає на точність вимірювання теплопередачі.

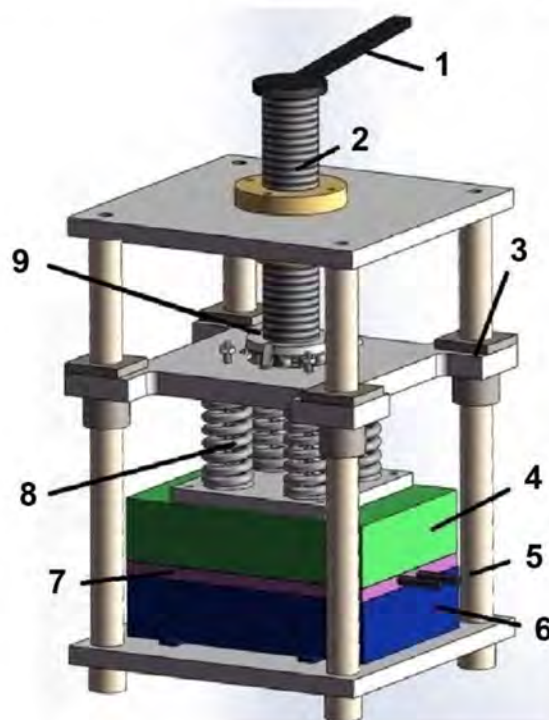
Д'Анжело та Хоган розробили безперервну довготривалу процедуру тестування (тривалістю один місяць) для оцінки характеристик ТЕГ-модуля, виготовленого компанією Tellurex [19]. Їхній випробувальний стенд включав вакуумний кожух і джерело постійного тепла, реалізоване за допомогою нікель-хромового нагрівального елемента, встановленого на гарячій стороні модуля (рис. 1.9). Отримані криві продуктивності добре відповідали даним, наданим компанією Tellurex. Це дослідження підкреслює важливість використання вакуумного середовища для мінімізації конвективних тепловтрат навколо модуля, які можуть істотно впливати на точність результатів.

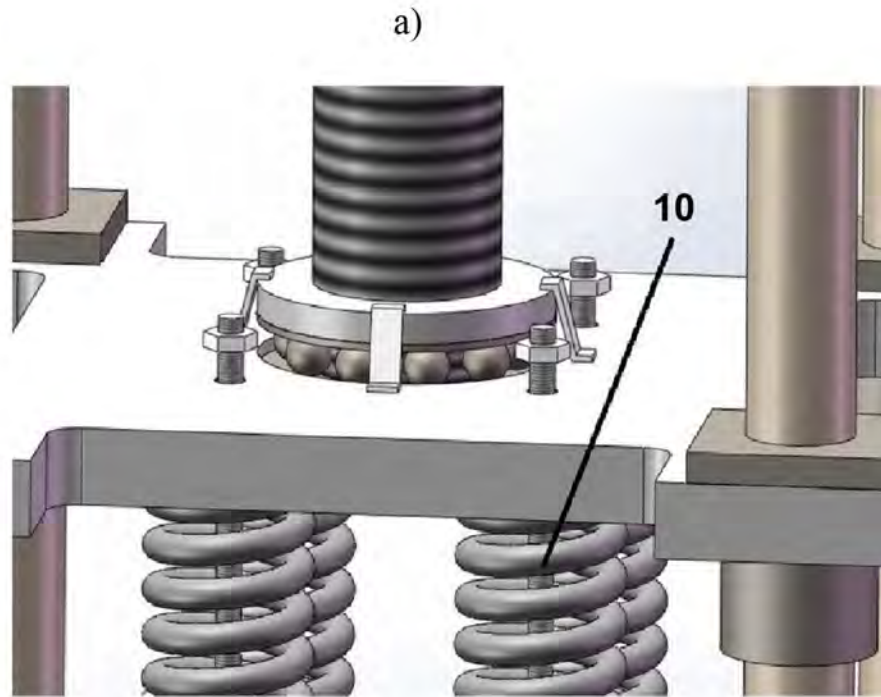
Васкес та співавтори розробили випробувальний стенд для оцінки ефективності комерційних термоелектричних модулів (ТЕГ) [20]. Конструкція установки передбачала комбінацію тестованого модуля з основним тепловим блоком і системою водяного охолодження. Основний блок слугував джерелом тепла і був термічно ізолюваний для мінімізації тепловтрат у навколишнє середовище. Дослідники застосували два режими випробування: у першому змінювали температуру гарячої сторони, водночас підтримуючи постійну температуру холодної сторони; у другому — стабільною залишалася

температура холодного спаю, тоді як потужність, що подавалась до теплового блоку, варіювалася. Отримані експериментальні результати добре узгоджувалися з технічними характеристиками, наданими виробником NI-Z.

Раушер та колеги провели дослідження ефективності термоелектричних модулів (ТЕГ) [21][22], використовуючи наступну методику: тестовий зразок розміщували між нагрівальним елементом і охолоджувальним блоком, затискаючи його між цими двома компонентами (рис. 1.10).

Оскільки ефективність визначається як співвідношення вихідної електричної потужності до швидкості подачі тепла на вхід (рівняння 1.42), дослідники провели лише два ключові вимірювання. Вихідну потужність визначали за допомогою електронного навантаження, яке дозволяло змінювати опір навантаження. Щодо швидкості теплопередачі на вхід, то замість складних вимірювань теплового потоку використовували електричний підхід: вхідну потужність нагрівального блоку розглядали як кількість тепла, що передається тестовому зразку. Для мінімізації теплових втрат, пов'язаних із самою системою нагріву, застосовувався захисний нагрівач. Зовнішній (додатковий) нагрівач підтримував температуру основного нагрівача на одному рівні, а регулювання здійснювалося за допомогою ПД-контролера. Коли температури обох нагрівачів вирівнювалися, вважалося, що теплові втрати несуттєві.

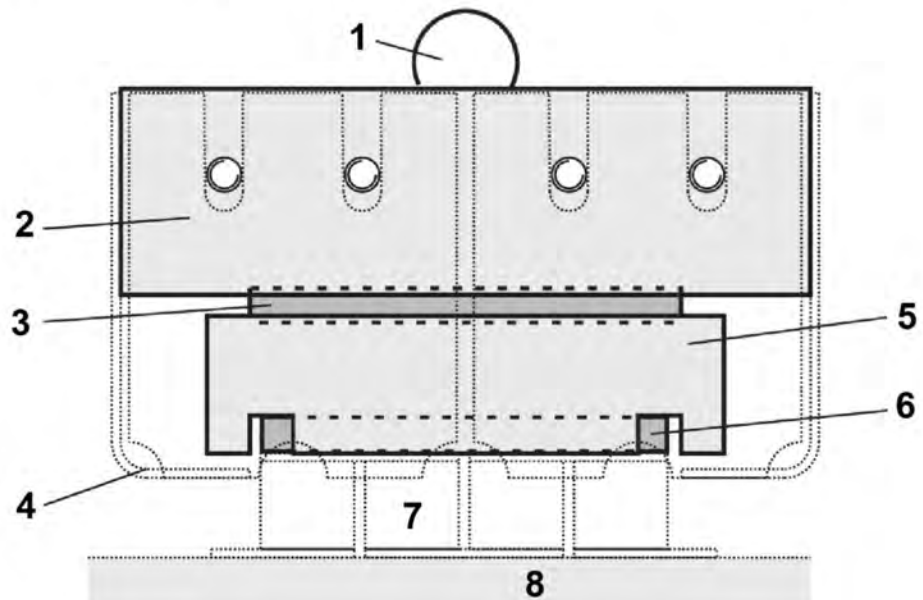




б)

- 1- гайковий ключ; 2- болт подачі; 3- лінійний підшипник; 4- холодна сторона;  
 5- виходи ТЕГ; 6- гаряча сторона; 7-ізолятор; 8- пружина; 9- упорний  
 підшипник; 10- пружина і направляючі болти

Рисунок 1.9 – Механічна конструкція установки для визначення характеристик ТЕГ модуля: (а) загальний вигляд (б) детальний вигляд блоку стиснення [19]



- 1 - нагрівач з опорною сталеву кулькою, 2 - мідний блок, 3 – додатковий охоронний нагрівач, 4 – екран від теплового випромінювання, 5 - ізоляційний

блок, 6 - вимірювальний нагрівач, 7 - холодний бік охолоджувача, 8 - термоелектричний модуль.

Рисунок 1.10 – Установа для визначення характеристик ТЕГ [22]

Уся тепла енергія, що надходила від основного нагрівача, передавалася виключно термоелектричному модулю. Водночас отримані результати не були зіставлені з характеристиками, заявленими виробником.

Схожий підхід із використанням захисних нагрівачів був застосований Анатичуком і Гаврилюком [23]. У їхній експериментальній установці між холодною стороною зразка та радіатором розміщувався тепловий вимірювач. У процесі досліджень вони встановили, що вихідна потужність нагрівача на гарячій стороні може бути коректно пов'язана з тепловим потоком, який реєструвався тепловим датчиком на протилежному боці. Це дозволило їм відкалібрувати тепловий вимірювач відносно вхідної потужності нагрівача, спрощуючи таким чином подальші вимірювання. Проте, метод виявився досить складним у реалізації через необхідність врахування або усунення численних паразитних теплових втрат.

Таказава та співавтори також досліджували ефективність ТЕГ-модулів при значних температурних перепадах — до 500 К [24]. Подібно до підходу, застосованого Анатичуком і Гаврилюком [23], тепловий потік з гарячого переходу визначався за вхідною електричною потужністю нагрівача, тоді як теплопередача на холодній стороні вимірювалася за допомогою каліброваного мідного блоку. Температурний градієнт у цьому блоці визначався з урахуванням відомого значення теплопровідності міді. Протягом усього експерименту мідний блок підтримувався при постійній температурі 300 К. Уся установка була розміщена у вакуумній середовищі ( $< 10^{-3}$  Па) для зменшення теплопровідності повітря. Однак, попри застосування захисту від теплового випромінювання, при високих температурах повністю уникнути радіаційних втрат не вдалося.

Сандоз-Розсадо та Стівенс створили випробувальний стенд для оцінки продуктивності ТЕГ-модулів [25]. У ході дослідження вони виявили, що саме визначення швидкості теплопередачі є найбільш складним завданням. Вони побудували аналітичну модель для прогнозування продуктивності модулів із відомими характеристиками матеріалів, наданими виробниками Melcor і Hi-Z. Модель враховувала паразитні теплові втрати, що виникали в порожнинах між керамічними пластинами. Порівняння аналітичних і експериментальних даних з характеристиками, зазначеними виробниками, дозволило зробити висновок, що подані матеріальні властивості спочатку були неточними.

Чен і Вільямс провели експериментальне дослідження з визначення швидкості теплопередачі та ефективності термоелектричних охолоджувальних систем [26]. Їхній аналітичний підхід базувався на фундаментальних рівняннях термоелектрики. Для опису термоелектричних властивостей матеріалів вони використали два підходи: один враховував температурну залежність властивостей, інший — оперував постійними значеннями. Виробник надав властивості у вигляді емпіричних залежностей від температури. Окрім цього, Чен і Вільямс провели оцінку характеристик матеріалу при середній робочій температурі. Результати дослідження показали, що обидва підходи давали відносну похибку менше 10% при визначенні оптимального струму, необхідного для досягнення максимальної продуктивності системи за заданих температур переходу та швидкості охолодження.

### **1.2.2 Аналітична оцінка властивостей термоелектричних модулів**

Продуктивність термоелектричного модуля може бути оцінена аналітично, коли відомо фізичні властивості матеріалу які використані для його виготовлення. На жаль, як зазначено вище, ці властивості, як правило, недоступні для споживача. Дослідники розробили методи визначення цих властивостей через серію випробувань в стаціонарних умовах.

Хуанг і ін. розробили автоматизовані засоби визначення властивостей ТЕО модуля [27]. Вони розробили вакуумну випробувальну камеру, щоб звести

до мінімуму паразитні втрати тепла через конвекцію. Випробуваний модуль був розташований між блоком нагрівача і охолоджуючим блоком, щоб створювати дві постійної температури сторін, які вимірювалися за допомогою термопар. Шляхом вимірювання температури і напруги при розімкненому колі ( $I=0$ ) рівняння  $U = \frac{W}{I} = \alpha(T_r - T_x) + IR$  було використано для визначення коефіцієнта Зеебека. Нагрівальний блок був ізольований і встановлений, щоб розсіювати певну кількість енергії. Було використано припущення що тепло не було втрачено з блоку нагрівача в навколишній простір, і все тепло що розсіюється ним було поглинене термоелектричним модулем в стаціонарних умовах. Знаючи потужність, що подається до блоку нагрівача при таких умовах визначалося тепло яке поглинається  $Q_c$ . Знаючи величину  $Q_c$  і температури поверхонь ТЕО, при умовах розімкненого кола рівняння (1.31) було використано для визначення коефіцієнта теплопровідності  $K$  модуля. Після того, як  $\alpha$  і  $K$  були відомі електричний опір модуля  $R$  був визначений з використанням рівняння (1.31) ще раз, але при відомому значенні  $I$ . Повторюючи ці вимірювання при різних температурах поверхонь ТЕО вони виявили, що властивості матеріалу мали невеликі залежності від робочої температури. Їхнє аналітичне прогнозування кривих продуктивності узгоджується з даними, наданими виробником, але не співпадають ідеально. Вони пояснюють цю розбіжність тим, що вони використовували спрощені ідеальні рівняння. Але, вони, розробили емпіричну залежність для заміни рівняння (1.31), з обмеженням в тому, що ця залежність була дійсна тільки для конкретного модуля, яка навіть не підходила до подібних модулів через потенційні зміни виробничого процесу.

Ця методика обчислення коефіцієнта Зеебека  $\alpha$  і електричного опору  $R$  модуля, продемонстрована Хуанг і ін. [27] широко застосовується. Її використання було також продемонстровано Лепхекардом [28]. Єдина відмінність полягала в тому, що теплопровідність  $K$  була обчислена через відведення тепла мідною пластиною через модуль ТЕО під час холостого ходу. Значення  $Q_c$  в рівнянні (1.31) при  $I=0$  визначається з теплової ємності мідного

блоку, протягом певного періоду часу, за умови, ідеального теплового контакту між ТЕО модулем і мідним блоком.

Крафтмайкер провів серію простих експериментів з термоелектричним модулем, працюючи з ним у режимах нагріву, охолодження та генерації електроенергії [29]. Для створення необхідних температур використовувалися блоки нагріву і охолодження. При роботі як генератора електроенергії швидкість теплопередачі на гарячій стороні точно визначали шляхом підтримки холодної сторони при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і регулювання нагріву гарячої сторони до досягнення температури, рівної температурі навколишнього середовища. У такому режимі тепло від нагрівача повністю поглинається модулем і не розсіюється у навколишнє середовище. У режимі охолодження гаряча сторона підтримувалася на рівні температури навколишнього середовища, тоді як нагрівач на холодній стороні налаштовувався так, щоб через модуль не було температурного перепаду ( $T_r = T_x$ ). При таких умовах, з використанням рівнянь  $Q_{II} = \pi \cdot I$  і (1.31) і знаючи, що  $T_x$  дорівнює температурі навколишнього середовища, а також  $I$  і  $R$  (від окремого дослідження), коефіцієнт Пельтьє був обчислений.

Фарджі та Акбарзаде створили компактний випробувальний стенд для оцінки продуктивності термоелектричних генераторних модулів (ТЕГ) [30]. В якості джерела тепла використовувався нагрівальний блок, тоді як температура на холодній стороні модуля підтримувалась за допомогою водяного охолодження. Щоб зменшити розмір системи охолодження, в якості охолоджувача для циркулюючої рідини застосовували термоелектричний охолоджувач (ТЕО). Коефіцієнт Зеебека визначали шляхом вимірювання напруги холостого ходу модуля при відомих температурних перепадах і застосуванні відповідного рівняння  $U = \frac{W}{I} = \alpha(T_r - T_x) + IR$ . Теплопровідність була виміряна в якості ефективної власності, яка включала керамічні та електричні контакти, а також всі інтерфейси в межах модуля при роботі розімкнутого кола за допомогою рівняння (1.31). Оскільки ТЕГ працює в режимі максимальної вихідної потужності, коли опір навантаження

узгоджується з внутрішнім опором модуля внутрішній опір модуля, який тестувався розраховувався шляхом змінних опорів при підтримці сталої температури переходу. Було отримано параболічні залежності вихідної потужності в залежності від опору навантаження. Опір навантаження, при якому досягалась максимальна вихідна потужність, розглядали як внутрішній опір термоелектричного модуля. Швидкість теплопередачі на холодній стороні додатково розраховували з використанням рівняння для ентальпії потоку. Отримані експериментальні криві ефективності добре співпадали з даними виробника. Водночас, у своїх аналітичних прогнозах продуктивності ТЕГ вони не застосовували обчислені властивості матеріалу. У роботі було підкреслено важливість забезпечення достатньої сили притиску між ТЕГ та його контактними площинами, оскільки підвищення сили стиснення дозволяє зменшити контактний опір і, відповідно, підвищити вихідну потужність до певного рівня. Аналогічне дослідження впливу сили притиску на зниження опору контактів виконали також Монтекко та співавтори [31][32].

Хсу та співавтори провели дослідження, зосереджене на визначенні термоЕРС модуля через поняття «ефективного коефіцієнта Зеебека» [33]. Їхні експериментальні результати показали розбіжність близько 30% у порівнянні з теоретичними значеннями, наведеними виробниками. Автори пояснюють цю різницю двома факторами: по-перше, збільшенням теплового опору на контактах модуля при низьких силах притиску; по-друге, неточністю вимірювань температури термопарами, розміщеними на керамічних пластинах, через теплові контактні опори. Щоб врахувати ці ефекти, вони розробили детальні теплові залежності опору для точнішого визначення різниці температур на сторонах модуля. Запропонована концепція «ефективного коефіцієнта Зеебека», що визначається експериментально, дозволила підвищити точність аналітичних розрахунків за рахунок зменшення похибок, пов'язаних із контактним опором.

Мітрані і ін. розробили методику визначення властивостей ТЕО модуля [34]. Їх експериментальна установка була аналогічна Хуанг і співавт. [27] крім холодної сторони яка охолоджується. Між модулем зразком і допоміжним ТЕО

знаходився алюмінієвий блок з відомою теплопровідністю. Це дозволило розрахувати швидкості передачі тепла.

Танджі і ін. ввів новий спосіб загвинчування для збірки термоелектричних елементів всередині модуля [35]. Це було зроблено, щоб зменшити теплове навантаження зсуву, що буде відбуватися в звичайних методах. Так як гвинти будуть викликати додаткові контактні опори, вони компенсуються за допомогою рідкої InGa і твердої Zn пасти на межах розділу. Для вимірювання швидкості теплопередачі стиків модулів замість цього вони використовуються вимірювання теплового потоку через нікелевий блок відомої теплопровідності. Вони не оцінювали коефіцієнт Зеебека або електричний опір модуля, але обчислювали теплопровідність, яка включала узагальнену теплопровідність керамічних пластини і електричних провідників всередині модуля.

Муто і ін. оцінювали якість матеріалу одного елемента ТЕГ при великих різницях температур [36]. Таким чином, ефекти випромінювання і нагрів Томсона були включені в їх аналізі і якість матеріалу були оцінені як функція температури. Ці властивості матеріалу були спрощені, щоб визначити «ефективні властивості матеріалу», які були оцінені у вигляді інтегралів по робочій температурі.

### **1.2.3 Метод Хармана для оцінки властивостей термоелектричних модулів**

Метод Хармана — це спрощений, але точний спосіб вимірювання безрозмірної термоелектричної добротності, який широко застосовується в термоелектриці [37]. Він був вперше запропонований Т. С. Харманом у 1958 році і названий на його честь. Метод базується на вимірюванні повної напруги і напруги, обчисленої через електричний опір (рівняння (1.72)) при проходженні струму через зразок. З напруги, спричиненої ефектом Зеебека, визначається електрична складова опору, що дозволяє розрахувати коефіцієнт Зеебека за

рівнянням (1.1). Без урахування джоулевого нагріву та ефекту Томсона, Харман запропонував

$$Z\bar{T} = \frac{U_{\alpha}}{IR}. \quad (1.62)$$

При застосуванні методу необхідно дотримуватися певних запобіжних заходів, серед яких — забезпечення розміщення тестового зразка у вакуумному середовищі та вибір такого джерела струму, яке було б достатньо малим, щоб не викликати ефект Пельтьє і не створювати температурних градієнтів у зразку, але водночас досить великим для виникнення помітного джоулевого нагріву [38]. Оскільки термоелектрична добротність є важливим показником якості термоелектричних матеріалів, її значення викликає значний інтерес серед розробників. Лау вивчали вплив різних рівнів вакууму на тестовому зразку, коли був застосований метод Харман визначення  $Z\bar{T}$  [39]. Проте, результати не враховують всі невизначеності в різних рівнях тиску в вакуумних шафах.

Мін і Рове запропонували модифіковану версію методу Хармана для визначення  $Z\bar{T}$  [40]. Вони показали, що метод Хармана є швидким, проте накопичена похибка вимірювання може сягати близько 20%, тоді як значення властивостей матеріалу (або модуля)  $Z\bar{T}$  визначаються з більшою точністю – приблизно 10% похибки. У своїй публікації вони продемонстрували, що шляхом вимірювання різниці температур у режимах короткого замикання  $\Delta T_s$  та розімкнутого кола  $\Delta T_0$  можна визначити безрозмірний показник добротності

$$Z\bar{T} = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_0} + 1. \quad (1.63)$$

Порівняно з початковим методом Хармана, перевагою цієї модифікації є те, що для її реалізації необхідно лише досягнення стаціонарного теплового стану, без потреби в адіабатичних умовах, які вимагаються в оригінальній методиці.

#### **1.2.4 Оцінка ефективності на основі відомих максимальних параметрів**

Максимальні робочі параметри більшості термоелектричних модулів представлені виробниками в документації в ході відповідних етапів тестування. Для ТЕГ це три з чотирьох максимальних параметрів ( $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ ,  $W_{\max}$  і  $\eta_{\text{mp}}$  або  $\eta_{\max}$ ). Але потрібно переформулювати рівняння, так щоб отримати властивості модуля ( $\alpha$ ,  $R$  і  $K$ ). З трьох максимальних параметрів два з них,  $W_{\max}$  і  $\eta_{\text{mp}}$  або  $\eta_{\max}$ , мають важливе значення, для параметрів  $U_{\max}$  або  $I_{\max}$ . Що стосується ТЕО подібна тенденція, представляються три з чотирьох максимальних параметрів ( $\Delta T_{\max}$ ,  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$  і  $Q_{\text{сmax}}$ ) для цього вимагаються переформулювати рівняння два з них ( $\Delta T_{\max}$  і  $I_{\max}$ ) мають важливе значення в результаті яких  $Q_{\text{сmax}}$  або  $U_{\max}$ . Три з чотирьох максимальних параметрів необхідні, оскільки три рівняння необхідно розв'язати для трьох невідомих. Коли геометрична інформація (площа поперечного перерізу  $A$  і довжина  $L$ ) термоелектричних елементів відома,  $\rho$  і  $k$  може бути обчислена безпосередньо з властивостей модуля. Обчислення коефіцієнта Зеєбека  $\alpha$  не залежить від геометрії елемента, але залежить від кількості пар  $n$ .

Лінейкін і Бен-Яков розробили аналітичну модель для визначення властивостей матеріалу термоелектричних модулів, розроблених Криотерм і Ні- $Z$  [41]. Вони використовували три максимальні параметри ( $\Delta T_{\max}$ ,  $I_{\max}$  і  $U_{\max}$ ), щоб обчислити реверсивно властивість модуля ( $\alpha$ ,  $R$  і  $K$ ). Вони використовували комп'ютерне програмне забезпечення, щоб аналітично передбачити криві продуктивності і порівняли результати з даними, наданими виробниками. Їх результати показали гарне узгодження. Жанг провів аналогічне дослідження і запропонував підхід до реконструкції кривих продуктивності, засноване на ТЕО, значеннях  $I_{\max}$  і  $U_{\max}$  представляються виробниками [42]. Вони експериментально перевірили їх аналітичну роботу і порівняли свої результати кривих продуктивності проти попередніх досліджень ТЕО охолодження для мікропроцесора.

Лоу [43] використовують той же метод, який використовується Лінейкін і Бен-Яков [41] використовуючи максимальні параметри ( $\Delta T_{\max}$ ,  $I_{\max}$  і  $U_{\max}$ ), для визначення властивостей модуля і аналітично передбачити продуктивність модуля. Другий підхід був використаний з використання параметрів  $\Delta T_{\max}$ ,  $I_{\max}$  і  $Q_{c\max}$ . Обидва методи потім були порівняні з однією кривою продуктивності чотирьох виробників і показали прийнятну похибку 3%.

Концепція крок за кроком по вибору відповідних ТЕО модулів від різних виробників з точки зору споживача був представлений Таном і Фоком [17]. Вони обговорили труднощі, з якими стикаються споживачі через відсутність стандартизації інформації, представленої виробниками і пропонують стандартні засоби порівняння продуктивності модулів різних компаній. Вони описали метод з використанням трьох максимальних параметрів  $\Delta T_{\max}$ ,  $I_{\max}$  і  $U_{\max}$  щоб обчислити властивості модуля і передбачити криві продуктивності. Їх аналітичні результати підтверджувалися експериментальними даними, причому обидві форми узгоджувалися з даними від виробника до близько двох третин  $I_{\max}$ . Розбіжність кривих продуктивності за межами цих точки було пояснено температурними залежностями від властивостей матеріалу.

Ахіска і ін. запропонували альтернативний метод з комп'ютерним управлінням для вимірювання властивостей модуля [44]. Ця концепція ґрунтувалася на максимальних параметрах модуля, але не наданих від виробника. Крім того, замість цього вони використовували параметри  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$  і  $E_{\max}$  які були визначені через серію автоматизованих тестів на випробувальному стенді з комп'ютерним управлінням.  $E$  відноситься до електрорушійної сили (ЕРС), яка буде генеруватися модулем виключно на основі різниці температур, що нічого більше ніж, напруга холостого ходу, яка впливає з коефіцієнтів і температурного градієнта Зеебека і  $E_{\max}$  є максимальним ЕРС, який може бути отриманий за допомогою цього модуля при певній різниці температур на його площинах. Алгоритм з комп'ютерним управлінням був написана таким чином, що температура в стійких станах були визначені для конкретного значення струму живлення, при якій були обчислені

значення напруги і ЕРС. Система буде потім збільшувати струм, що подається за допомогою певного кроку користувача і повторить вимір до тих пір, поки максимальна різниця температур не була досягнута. Використовуючи ці дані, криві продуктивності які аналітично передбачені і експериментально перевірені і показали гарну узгодження з даними від виробників. Мета автоматизованого тестування було реалізувати такі функції для випробування і контролю якості в процесі виробництва модулів.

### **1.3 Постановка завдання бакалаврської роботи**

На сьогодні термоелектричні модулі набули широкого поширення в різних промислових пристроях і це посприяло їхньому масовому виробництву і комерціалізації. Такі впливи змусили виробників випускати широкий спектр термоелектричних модулів від недорогих для пристроїв малих розмірів до високої продуктивних і дорого вартісних [17]. Розробники, які прагнуть використати термоелектричні модулі в своїх приладах стикаються зі складним завданням вибору правильного типу термоелектричного модуля, який буде відповідати їх вимогам.

Виробники схильні надавати якомога більше інформації, про модулі для споживачів. Ця інформація приймає графічну форму у вигляді кривих продуктивності або максимальних (або мінімальних) меж експлуатації. Виробники надають таку інформацію легко на своїх веб-сайтах. Ці веб-сайти, як правило, включають в себе або електронні формати документів із характеристиками або інтегроване програмне забезпечення онлайн, яке допомагає клієнту у виборі конкретного термоелектричного модуля відповідно до його критеріїв. Пошук між продуктами в межах однієї компанії, як правило, досить простий, але проблеми виникають, коли ці характеристики не стандартизовані між різними виробниками. Розробникам в таких випадках як правило складно порівнювати продукти. Це ще більше ускладнюється, коли виробники надають такі характеристики в різних формах.

Єдиний найкращий метод оцінки реальних можливостей термоелектричних модулів буде отримати їх шляхом покупки від виробника і експериментально перевірити їх. Такі методи є трудомісткими, дорогими і трудомістким для споживача. Крім того, не всі споживачі можуть мати можливість протестувати модулі в контрольованих умовах. Життєздатною альтернативою є аналітично визначити продуктивність цих модулів з використанням спрощених або ідеальних рівнянь. Однак, ці рівняння не можна застосувати при відсутній інформації про властивості модуля (коефіцієнт Зеебека  $\alpha$ , електричний опір  $R$ , теплопровідність  $K$ ). Ця інформація, як правило, не надається виробником з кількох причин. Виробники, які тільки збирають термоелектричні модулі і упаковують їх для продажу, як правило отримують термоелектричні елементи від великих постачальників або зовнішнього джерела. Вони, як правило, не надають інформацію про властивості матеріалів через те що ці властивості матеріалу можуть бути визнані в якості службової інформації і не доступні навіть розробникам.

Незважаючи на відмінності в поданні інформації, максимальні параметри продуктивності, як правило, завжди подається виробником. У разі ТЕГ максимальні параметри такі максимальний струм  $I_{\max}$ , максимальна напруга  $U_{\max}$ , максимальна вихідна потужність  $W_{\max}$  і відповідний коефіцієнт корисної дії при максимальній вихідній потужності  $\eta_{\max p}$ . З іншого боку, для ТЕО вони наступні максимальна різниця температур між контактами модуля  $\Delta T_{\max}$ , максимальний струм  $I_{\max}$ , максимальна напруга  $U_{\max}$  і максимальна потужність охолодження (тепло поглинається на холодному переході)  $Q_{\text{сmax}}$ .

Теорія з використанням обмеженої інформації для прогнозування характеристик термоелектричних модулів була розроблена авторами [18]. Максимальні робочі параметри використовуються як компоненти в ідеальних рівняннях, щоб обчислити властивості матеріалів термоелектричного модуля. Ці обчислені властивості матеріалу, давали відомості про ефективні властивості матеріалу, і дозволяли аналітично визначити продуктивність конкретного термоелектричного модуля. Однією з цілей даного дослідження було

експериментально перевірити цю теорію шляхом порівняння експериментальних результатів з аналітично прогнозованою продуктивністю та даних про продуктивність, що надаються виробниками. Тестовий стенд для дослідження, який може вмістити як ТЕГ так і ТЕО був побудований і напівавтоматичний алгоритм тестування розроблений і реалізований. Термоелектричні модулі були отримані від декількох виробників разом з їх відповідними кривими продуктивності і максимальними експлуатаційними параметрами.

Для цього в бакалаврській роботі, на основі проведеного літературного аналізу необхідно:

- розробити метод вимірювання параметрів термоелектричних генераторів;
- розробити структурну схему пристрою для вимірювання параметрів термоелектричних генераторів;
- розробити конструкцію установки;
- розробити електричну принципову схему з розрахунком її окремих вузлів;
- представити методику яка дозволяє з отриманих даних розрахувати параметри термоелектричного генератора;
- розробити необхідні заходи по охороні праці.

## 2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1 Загальні принципи функціонування пристрою

Коли термоелектричний модуль працює в якості пристрою, що генерує Е.Р.С. основні параметри, від яких залежать вихідні значення продуктивності це температури сторін і опір навантаження. Так як всі параметри оцінюються в стаціонарних умовах тому температури повинні бути сталими. Гаряча сторона модуля, як правило, забезпечується джерелом тепла, яким можна керувати. Найбільш поширеною практикою є поверхневі нагрівачі пластинчатого типу або плоскі нагрівачі [19] [30]. Іноді використовують резистивні нагрівачі які вбудовані в металеві блоки високої теплопровідності (зазвичай алюміній або мідь), замість того, щоб використовувати промислово виготовлені нагрівачі. Ці нагрівачі ізолювані зі всіх сторін крім одної яка перебуває в контакті з модулем. Джерело тепла живиться від стабілізованого джерела, щоб забезпечити безперервну і постійну потужність, так щоб були досягнуті умови стаціонарного режиму.

Тепло на холодній стороні модуля повинно постійно відводитися в іншому випадку обидва контакти модуля в кінцевому підсумку досягнуть теплової рівноваги і не буде ніякого вироблення електроенергії. Тепловідвід на холодній стороні, як правило, досягається за допомогою примусової конвекції або рідинного охолодження. Це залежить від кількості тепла, що виділяється модулем. Примусова конвекція повітря за допомогою вентиляторів або повітродувок і радіаторів з природнім охолодженням буде досить для малих швидкостей виділення тепла, під час рідинного охолодження з використанням води через охолоджуючі кожухи або теплообмінники, коли потрібна велика кількість охолодження. Рідини, такі як етиленгліколь і йому подібні суміші зазвичай використовуються для досягнення температур нижче нуля. Постійні швидкості потоків цих охолоджуючих рідин мають вирішальне значення для досягнення і підтримки стійкого стану. Примусові швидкості потоку повітря

можуть легко змінюватися або підтримуватися на постійному рівні, регулюючи вхідну потужність до вентиляторів. Рідинне охолодження в основному досягається за рахунок вторинних процесів теплообміну, де поглинене тепло від проміжної рідини розсіюється в навколишнє середовище з використанням відкачування тепла або процесу охолодження. Рециркуляційні охолоджувачі або регуляційні температурні ванни використовуються для досягнення таких умов. Ці пристрої в електронному вигляді конфігуруються і управляються або за допомогою внутрішніх або зовнішніх систем управління, які зазвичай використовують форму управління пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) типу [20] [23] [30]. Це гарантує, що циркулююча рідина підтримується при бажаній температурі. З регульованою швидкістю або об'ємними насосами призначені для подачі потоку рідини[27].

Значення опору навантаження, до якого під'єднаний ТЕГ, можна змінювати за допомогою електронних навантажень. Електронні навантаження в основному використовуються для тестування блоків живлення, акумуляторних елементів і генеруючих пристроїв. Електронне навантаження, коли воно під'єднане до пристрою живлення, підтримує постійним значення величини напруги або струму. В якості альтернативи, пристрій може імітувати постійне значення опору з точним контролем його значення протягом тривалих періодів використання.

Важливі параметри при тестуванні ТЕГ є температури переходів і вихідна потужність пристрою (струм і напруга).

Установка, яка була розроблена (рис. 2.1), дозволяє оцінити параметри ТЕГ вміщує комерційні термоелектричні модулі на площі  $30 \times 30$  мм<sup>2</sup>. Випробувальний стенд з'єднаний з схемою перемикачів, яка складається з електронного навантаження і джерела живлення і пристрою контролю температури.

Тепло подається від нагрівального блоку, який складається з двох нагрівальних елементів в які вбудовані циліндричні нагрівники які мають розміри 15,875 мм в діаметрі і 88,9 мм в довжину. Кожен нагрівник має теплову потужність  $0,078$  Вт/мм<sup>2</sup> в загальному це 300 Вт електричної потужності при

максимальній напрузі 70В. Котушки опору нагрівника були вбудовані в стійку до іржі оболонки з максимальною робочою температурою 600°C.

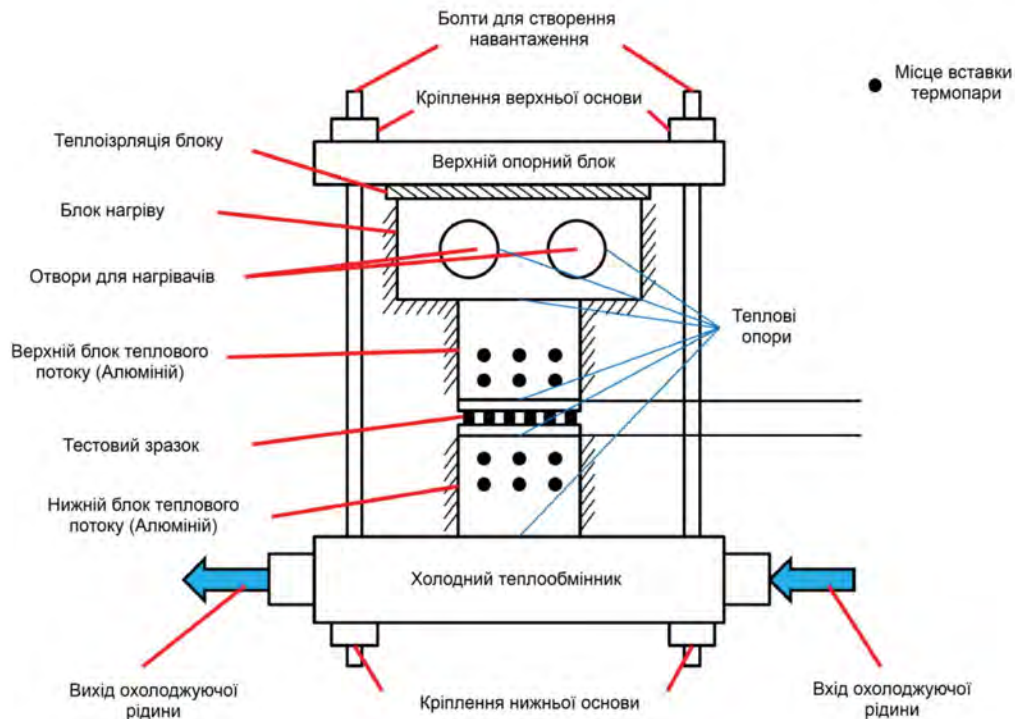


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки

Охолодження модуля було реалізовано за допомогою рециркуляційної холодильної машини. Холодильна машина складається з системи охолодження, циркуляційного насосу і мікропроцесорного контролер температури. Блок, можна застосовувати в температурному діапазоні між  $-25^{\circ}\text{C}$  і  $150^{\circ}\text{C}$ . Насос має потужність 5 л/хв при  $0^{\circ}\text{C}$ , в якості робочої рідини використовували 50/50 гліцерин / вода з температурами замерзання і кипіння -  $22,8^{\circ}\text{C}$  і  $106^{\circ}\text{C}$ , відповідно. Внутрішній нагрівач 800 Вт був використаний разом з вбудованим ПД-регулятором для підтримки рециркуляційної рідини при бажаній робочій температурі. Робоча рідина відбирає тепло, що виділяється з модуля через один ввід, прямокутний канал тепловідвід.

Між блоками нагріву і охолодження затиснутого тестовий зразок. Ці блоки були виготовлені з алюмінієвого сплаву з приблизною теплопровідністю  $142 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , кожен блок мав площу поверхні контакту  $30\times 30 \text{ мм}^2$  і висоту 20 мм.

Шість термопар встановлено в кожному блоці на одному горизонтальному рівні і ще три на іншому горизонтальному рівні. Для конструкції використані термопари К-типу, в стандартній ізоляції із нержавіючої сталі. Ізоляція термопар має діаметр 2 мм і глибина 20 мм. Блоки нагріву і охолодження були ізольовані із всіх площин, крім тих до яких прикріплювався модуль за допомогою скловолокна.

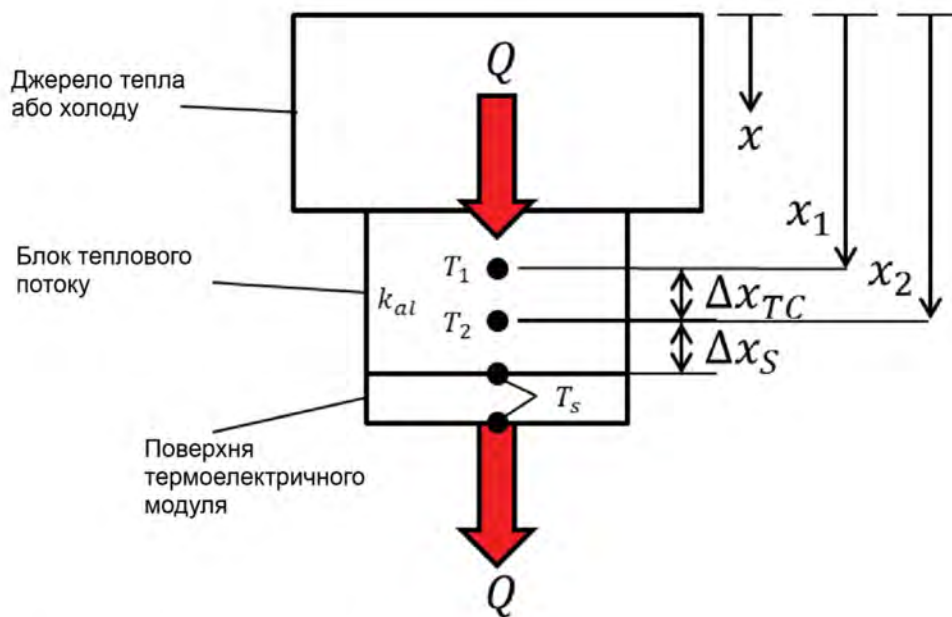


Рисунок 2.2 – Екстраполяція температури і вимірювання теплового потоку

## 2.2 Проектування блоків вимірювання теплових потоків

Блоки теплового потоку мають два призначення. Перше вимірювання теплового потоку, яке відбувається в місцях стикування модуля, друге вимірювання температури переходу модулів з використанням методу лінійної екстраполяції. Розглянемо детальніше схему передачі тепла рис 2.2. При правильній ізоляції і припускаючи ідеальний контакт між контактними поверхнями ТЕГ, а також однорідні теплові потоки між холодною і теплою стороною, швидкість передачі тепла у одновимірному випадку можна визначити. Для одновимірного стійкого стану передачі тепла без будь-якого

внутрішнього джерела тепла основне рівняння для блоку теплового потоку визначається

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0, \quad (2.1)$$

де  $T$  температура яка залежить від відстані  $dx$ . При відомих граничних умовах (вимірюються термопарами)

$$T(x = x_1) = T_1, \quad (2.2)$$

$$T(x = x_2) = T_2, \quad (2.3)$$

інтегруючи рівняння (2.1) два рази отримаємо

$$T(x) = C_1x + C_2, \quad (2.4)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  постійні інтегрування. Застосування граничних умов з рівняння (2.3) і (2.4) дають лінійний температурний профіль для блоку теплового потоку

$$T(x) = \left( \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} \right) x + \left( T_1 - \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} x_1 \right). \quad (2.5)$$

Оскільки температурний профіль лінійний, для  $x_1$  може бути встановлено значення рівне 0 і тоді  $x_2 = x_1 + \Delta x_{TC} = \Delta x_{TC}$ . Для даної установки  $\Delta x_{TC}$  має значення  $\Delta x_{TC} = \Delta x_s = 5 \text{ мм}$ . Тоді рівняння (2.5) стане

$$T(x) = \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_{TC}} \right) x + T_1. \quad (2.6)$$

Також, температуру поверхні  $T_s$  при  $x = \Delta x_{TC} + \Delta x_s$  можна отримати як

$$T_s = T(\Delta x_{TC} + \Delta x_s) = \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_{TC}} \right) \Delta x_s + T_2. \quad (2.7)$$

Крім того, відповідно до припущення про відсутність контактних опорів між поверхнями керамічних ізоляторів та самими спаями термоелектричних пар модуля, то можна екстраполювати температури поверхні  $T_s$  і її можна вважати за температуру переходу модуля. Дане припущення для отримання температури переходу через екстраполяцію еквівалентне кріпленню термопари між керамічною поверхнею і тепловим або холодним джерелом. Перевага методу прямого вимірювання є більш точні показники температури в разі не

лінійності що відбувається при розподілі температури в блоці теплового потоку. Недолік даного методу була би створення додаткових теплових контактних опорів між блоком нагріву або охолодження і керамічною поверхнею модуля, якщо тільки не використовувати дуже тонкі або плоскі термопари. Термопари стрічкового типу, як правило більш дорожчі за традиційні циліндричні або дротяні, і вони можуть спричинити теплові контактні опори.

Основна мета використання блоку теплового потоку, щоб полегшити вимір швидкості передачі тепла на стиках модуля без урахування втрат, що мали місце. Більшість попередніх методів дослідження використовували пряме вимірювання швидкості передачі тепла від нагрівачів [23] або рівняння ентальпії для холодної сторони [30]. Потужність, яка подається на нагрівач приймалася як швидкість передачі тепла, яку поглинув модуль. Розрахунок теплових втрат був трудомістким процесом і часто використовуються припущення про мінімальні втрати з належною теплоізоляцією. На підставі аналізу літературних джерел найбільш ефективним засобом ізоляції джерела тепла за допомогою захисних (екранних) нагрівачів навколо головного нагрівача, щоб забезпечити мінімальні тепловтрати, без будь-якої різниці температур між ними, таким чином усуваючи якомога більше конвективні та радіаційні втрати. Проте, кількість вхідної потужності яку слід надати захисному нагрівачеві доведеться зрівняти або надати і більше, ніж основному нагрівачу, щоб забезпечити теплову рівновагу. Це спричинить за собою великі витрати споживаної потужності.

Метод ентальпії може бути використаний, знаючи зміну температури охолоджуючої рідини між випускним входом і входом теплообмінника  $\Delta T$ , швидкістю потоку  $\dot{m}$  і теплоємністю  $c_p$  рідини яка використовується для охолодження. Рівняння (2.8) потім може бути використане для обчислення загального теплового потоку  $Q$  на холодній стороні в стаціонарних умовах і за умови відсутності теплових втрат.

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (2.8)$$

Лічильник тепла який використовується в роботі [23] ґрунтується на цьому ж принципі. Використання даного блоку теплового потоку було набагато простішим підходом, так як втрати не враховуються, і фактичний потік тепла в і з модуля може бути безпосередньо вимірний на основі існуючих вимірювань за допомогою термопари. Із закону Фур'є для провідності і з використанням рівняння (2.5), тепловий потік

$$q'' = \frac{Q}{A_{al}} = -k_{al} \frac{dT(x)}{dx} = -k_{al} \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_{TC}} \right), \quad (2.9)$$

де  $A_{al}$  це площа поперечного перерізу по нормалі до напрямку теплового потоку і  $k_{al}$  теплопровідність блоку потоку тепла з алюмінію. Передача тепла через блок потоку тепла  $Q = q'' A_{al}$ . Для розробленої установки  $k_{al} = 142$  Вт/м·К і  $A_{al} = 30 \times 30$  мм<sup>2</sup>.

Попередні випробування холодних і гарячих джерел з нагрівачем і охолоджувачем показали рівномірну передачу тепла по всьому блоку теплового потоку. Про це свідчить рівномірність температури будь-якого набору із трьох термопар на одному горизонтальному ряді; в стаціонарних умовах вони не відрізнялися не більше ніж  $\pm 0,05$  °С Це додатково підтверджує припущення про однорівномірну теплопередачу через блок теплового потоку.

Для зниження опорів теплових контактів між поверхнями використовувалися рідини з високою теплопровідністю термопасти / мастило, в тому числі між нагрівачами і їх корпусами, а також між термопарами і їх вставками. Також додатково використано спеціальний притискний механізм для подальшого зменшення опору контактів.

### **2.3 Підключення термопари і вибір схеми компенсації температури холодного спаю**

З багатьох причин нелегко перетворити напругу, що генерується термопарою, в точні показники температури: сигнал напруги є досить малим, взаємозв'язок температура-напруга є нелінійною, холодний спай вимагає

компенсації. Найбільш поширені термопари відносяться до типів J, K і T. При кімнатній температурі їх напруга змінюється на 52 мкВ/°C, 41 мкВ/°C і 41 мкВ/°C відповідно. Інші, менш відомі типи мають навіть менший температурний коефіцієнт напруги.

Оскільки сигнал напруги є невеликим, схема обробки сигналу зазвичай потребує підсилення. Більш важким може бути розпізнавання істинного сигналу з перешкод, що збирають виводи термопари, які є довгими.

Щоб виділити сигнал з перешкод, зазвичай поєднують два підходи. Першим є використання підсилювача з диференціальним входом, такого як вимірювальний підсилювач, щоб підсилити сигнал. Оскільки великі перешкоди з'являються на обох проводах (синфазно), диференціальне вимірювання їх усуває. Другим є низькочастотна фільтрація, яка видаляє позасмугових перешкоди. Фільтр низьких частот повинен видаляти і радіочастотні перешкоди (понад 1 МГц), які можуть викликати випрямлення в підсилювачі, і фон 50/60 Гц (джерело живлення). Важливо розташувати радіочастотний фільтр перед підсилювачем (або використовувати підсилювач з відфільтрованими входами). Розташування фільтра 50/60 Гц часто некритично - він може поєднуватися з радіочастотним фільтром, розташовуватися між підсилювачем і АЦП або може бути закладений в програмне забезпечення в якості фільтра усереднення.

Температура еталонного спаю термопари повинна бути відомою, щоб отримати точні значення абсолютної температури. Коли термопари використовувалися вперше, це робили шляхом утримання еталонного спаю у ванні з льодом. Цей метод був використаний для вичерпного дослідження параметрів різних типів термопар, отже, майже всі таблиці для термопар використовують 0 °C в якості еталонної температури.

Однак зберігання еталонного спаю термопари в ванні з льодом є непрактичним для більшості систем вимірювання. Замість цього більшість систем використовують технології, так званої компенсації еталонного спаю (також відому як компенсація холодного спаю). Температуру еталонного спаю

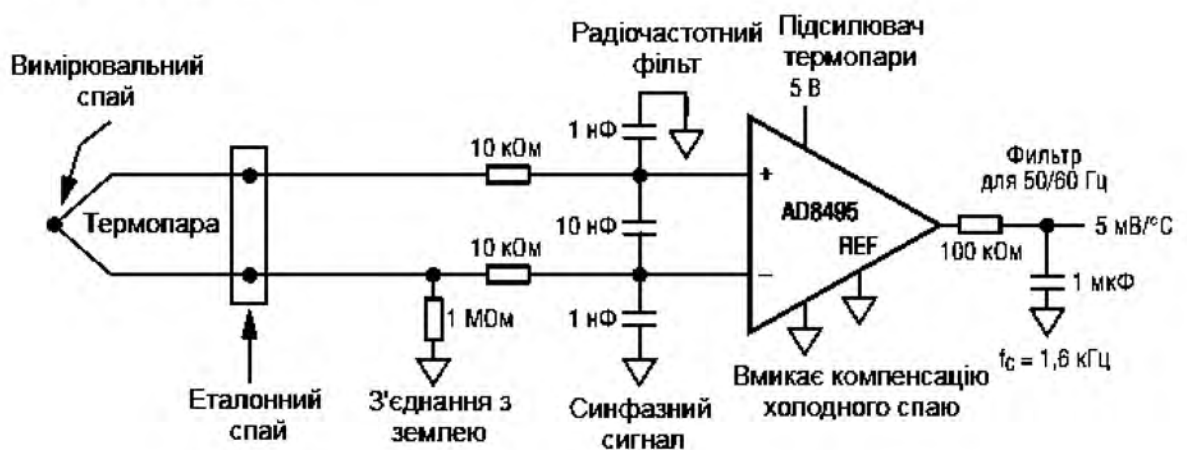
вимірюють за допомогою іншого термочутливого приладу - зазвичай мікросхеми, термістора, діода або RTD (резистивного датчика температури).

Виміряну напругу термопари потім коригують з урахуванням температури еталонного спаю. Важливо, щоб температура еталонного спаю була виміряна якомога точніше. Будь-яка похибка в визначенні температури еталонного спаю відіб'ється на кінцевому відліку показань термопари.

Обробка сигналу термопари є більш складною, ніж обробка інших систем вимірювання. Помилки в обробці сигналу, особливо в частині компенсації вимірювального спаю, можуть привести до більш низької точності. Дві описані нижче схеми присвячені цим проблемам.

Перша описує просте аналогово інтегроване апаратне рішення, що поєднує пряме вимірювання термопари з компенсацією еталонного спаю за допомогою єдиної ІС. Друге рішення детально розглядає схему компенсації еталонного спаю на основі програмного забезпечення, що забезпечує підвищену точність для вимірювання термопари і гнучкість у використанні термопар багатьох типів.

Рішення для вимірювання температури оптимізоване для простоти. Рисунок 2.3 показує схему для вимірювання термопари типу К. Воно ґрунтується на застосуванні підсилювача термопари AD8495, який спеціально розроблений для термопар типу К. Це аналогове рішення оптимізоване для мінімального часу розробки: воно має простий тракт для сигналу і не вимагає написання коду програми.

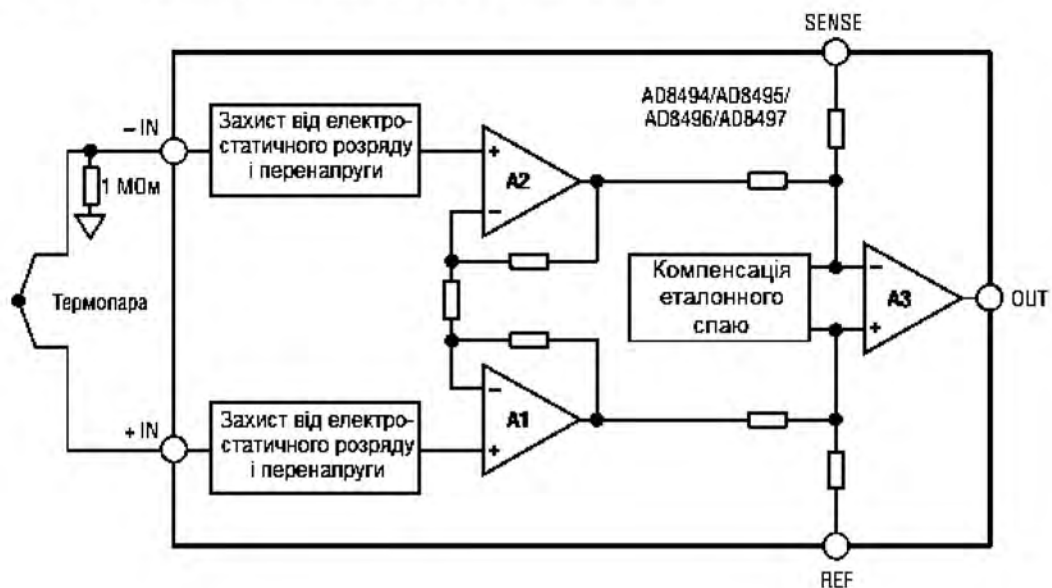


Підсилення і вихідний масштабний коефіцієнт. Малий сигнал термопари посилюється AD8495 в 122 рази, забезпечуючи вихідну чутливість 5 мВ / °С (200 °С / В).

Високочастотні синфазних і диференціальні перешкоди видаляються зовнішнім радіочастотним фільтром. Низькочастотні синфазні перешкоди зменшує вимірювальний підсилювач AD8495. Будь-який шум що залишився видаляється зовнішнім фільтром при подальшій обробці.

Підсилювач AD8495, який містить температурний датчик для компенсації змін навколишньої температури, повинен бути встановлений поблизу еталонного спаю, щоб працювати при тій же температурі для точної компенсації еталонного спаю.

Підсилювач AD8495 відкалібрований для отримання виходу 5мВ / °С на лінійній ділянці графіка термопари К-типу, з похибкою лінійності менш ніж 2 °С в діапазоні температур -25 .. 400 °С. Якщо необхідний більш широкий температурний діапазон, можна застосувати AN-1087 від компанії Analog Devices. Підсилювач AD8495 був спеціально розроблений, щоб забезпечити вимірювання на рівні кількох сотень мілівольт нижче потенціалу землі при використанні одного джерела живлення, як показано на схемі. Якщо очікується велика різниця в потенціалах заземлення, підсилювач AD8495 також може бути використаний з двохполярним джерелом живлення.



## Рисунок. 2.4 – Функціональна блок-схема A08495

Більш докладно про AD8495. Рисунок 2.4 показує структурну схему підсилювача термопари AD8495. Підсилювачі A1, A2 і A3 і показані резистори утворюють вимірювальний підсилювач, який підсилює вихідний сигнал термопари К-типу настільки, щоб відповідати вихідній напрузі 5 мВ/°С. У середині блоку «Компенсація еталонного спаю» знаходиться датчик навколишньої температури. Коли температура вимірювального спаю підтримується постійною, диференціальна напруга від термопари буде знижуватися, якщо температура еталонного спаю зростає за будь-якої причини. Якщо мініатюрний (3,2×3,2×1,2 мм) підсилювач AD8495 знаходиться в тепловій близькості до еталонного спаю, схема компенсації вводить додаткову напругу в підсилювач, з тим щоб вихідна напруга залишалася незмінною, компенсуючи, таким чином, зміна еталонної температури.

### **2.4 Проектування електронного навантаження**

Електронне навантаження працює на принципі стабілізатора напруга яке виконано за допомогою операційного підсилювача. Робиться це в такий спосіб: на неінвертуючий вхід операційного підсилювача (ОП) подається опорна напруга, а на інвертується вхід - падіння напруги на шунті. Операційний підсилювач має таку властивість, що в сталому режимі, різниця напруг на інвертуючому і неінвертуючому входах дорівнює нулю (якщо, звичайно, він не знаходиться в режимі насичення). Вихід операційного підсилювача подається на затвор польового транзистора і, таким чином він управляє ступенем відкриття польового транзистора, а отже і струмом через нього. А чим більший струм через польовий транзистор, тим більше падіння напруги на шунті виходить.

Тобто, якщо в результаті нагрівання характеристики польового транзистора зміняться так, що струм через нього збільшиться, то це викличе збільшення падіння напруги на шунті, з'явиться негативна різниця напруг

(помилка) на входах ОП і вихідна напруга ОП почне зменшуватися (при цьому почне зменшуватися ступінь відкриття польового транзистора і струм через нього), до тих пір, поки помилка не стане рівною нулю. Якщо ж струм через польовий транзистор з яких-небудь причин зменшиться, то це викличе зменшення падіння напруги на шунтах, з'явиться позитивна різниця напруг (помилка) на входах ОП і вихідна напруга ОП почне збільшуватися (при цьому почне збільшуватися ступінь відкриття польового транзистора і струм через нього), до тих пір, поки помилка не стане рівною нулю. Дана схема стабілізує падіння напруги на шунтах - воно після всіх перехідних процесів встановлюється рівним опорній напрузі (яка подається на неінвертуючий вхід).

Змінюючи в даній схемі опорну напругу, можна довільним чином регулювати струм через рольовий транзистор, причому заданий струм виходить стабільним, оскільки залежить тільки від величини опорної напруги і шунтів, і не залежить від параметрів польового транзистора, які можуть дуже сильно змінюватися в результаті нагрівання.

Основні елементи схеми прийняті для розрахунку:

D1 - операційний підсилювач.

T1 - потужний польовий транзистор.

$R_{ii}$  - струмовимірювальні резистори

$R_{nd}$  - резистор, що визначає діапазон задання струму

$R_{kd}$  - резистор, що визначає початковий діапазон задання струму

$R_{gn}$  - резистор для грубого налаштування струму в межах заданого діапазону

$R_m$  - резистор, необхідний для точного підстроювання заданого струму

Отже, тепер розглянемо розрахунок одного каскаду такого навантаження:

$$U_1 = \frac{U_{жс} \cdot (R_{gn} + R_m)}{R_{nd} + R_{kd} + R_m + R_{gn}}, \quad (2.10)$$

де  $U_{жс}$  - напруга живлення,  $U_1$  - напруга на неінвертуючому вході ОП.

$$U_2 = I_n \cdot R_{ii}, \quad (2.11)$$

де  $I_n$  - струм навантаження,  $U_2$  - падіння напруги на струмовимірювальних резисторах (і, відповідно, напруга на вході інвертуючого ОП).

З умови рівності напруг на входах ОП маємо:

$$I_n \cdot R_{ti} = \frac{U_{\text{жс}} \cdot (R_{gn} + R_{tn})}{R_{nd} + R_{kd} + R_{tn} + R_{gn}}, \quad (2.12)$$

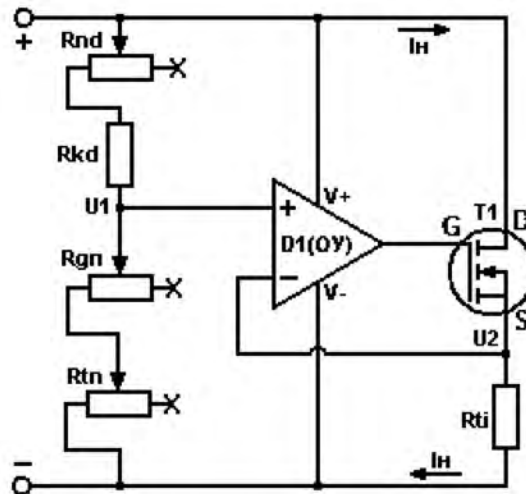


Рисунок 2.5 – Схема одного каскаду електронного навантаження

Звідси знаходимо:

$$I_n = \frac{U_{\text{жс}} \cdot (R_{gn} + R_{tn})}{R_{ti} \cdot (R_{nd} + R_{kd} + R_{tn} + R_{gn})}, \quad (2.13)$$

Підставивши в отриманий вираз номінали резисторів, визначимо діапазони налаштування струму: наприклад при  $R_{nd} = 10\text{кОм}$

$$I_n = \frac{U_{\text{жс}} \cdot 2,33}{0,22 \cdot (2,33 + 10 + 10)} = U_{\text{жс}} \cdot 0,47$$

при  $R_{nd} = 0$  отримаємо

$$I_n = \frac{U_{\text{жс}} \cdot 2,33}{0,22 \cdot (2,33 + 10)} = U_{\text{жс}} \cdot 0,86$$

Тобто, змінюючи опір резистора  $R_{nd}$  від 10 кОм до нуля, ми змінюємо верхню межу діапазону налаштування струму від  $0,47U_{\text{жс}}$  до  $0,86U_{\text{жс}}$ . Це означає, що, наприклад, для живлення + 10V ми зможемо налаштувати стум в

діапазоні 0 ... 4,7 А або 0 ... 8,6 А, в залежності від опору резистора  $R_{nd}$ , а для живлення + 5V - 0. ...2,35 А чи 0 ... 4,3 А.

Є три обмеження. Перше обмеження пов'язане з шунтами. Оскільки цей резистор розрахований на максимальну розсіювану потужність  $P_R$ , то максимальний струм через нього не повинен перевищувати значення, що визначається виразом:

$$I_{max}^2 = P_R / R_{ti} \Rightarrow P_R = I_{max}^2 \cdot R_{ti} \Rightarrow R_{ti} = P_R / I_{max}^2. \quad (2.14)$$

Другі два обмеження пов'язані з транзистором. По-перше, на транзисторі виділяється основна розсіювана потужність. По-друге, транзистор починає відкриватися, коли напруга між затвором і витком ( $U_{gs}$ ) перевищить деяке порогове значення (Threshold Voltage), так що девайс не працюватиме, якщо напруга живлення менше цього порогового значення. Ця ж величина буде впливати і на максимальний можливий струм при заданій напрузі живлення.

## 2.5 Розрахунок елементів імпульсного блоку живлення

Вихідні параметри розрахунку:

1. 220 В – вхідна змінна напруга;
2. 50 Гц – частота вхідної змінної напруг;
3. 72В – вихідна постійна стабілізована напруга;
4. 5А – вихідний струм (струм навантаження) ;

Вхідний мережний випрямляч виконує наступні функції:

- Перетворення роду струму зі змінного в постійний
- Згладжування пульсацій випрямленої напруги.

Найбільш поширені схеми схеми випрямлячів з ємнісними фільтрами що згладжують пульсацій випрямленої напруги представлено на малюнку 2.6.

Розглянемо роботу двохпівперіодної однофазної схеми на ємнісне навантаження (Рисунок 2.6) за допомогою часових діаграм, представлених на рисунку 2.7.

Де  $2\Theta$  - кут відсічення струму вентиля. Відповідно зменшенням пульсації напруги на конденсаторі  $\Delta U_c = U_{cmax} - U_{cmin}$ , зменшується кут  $\Theta$ , а середнє значення напруги  $U_c = (U_{cmax} - U_{cmin})/2$  прямує до амплітуди напруги  $U_{dm} = U_c \cdot \sqrt{2}$ .

З рівня пульсацій визначимо величину ємності  $C_\phi$ :

$$C_\phi = \frac{U_c \cdot I_{ex} (2\pi / p) - \arccos(1 - k_a)}{\pi f_c U_{dm}^2 \cdot k_a (2 - k_a)}, \quad (2.14)$$

де  $I_{ex}$  - середнє значення струму, споживаного від мережного випрямляча;  $f_c$  - частота живлення мережі;  $p$  - число фаз випрямлення;  $k_a = 1 - U_c / U_{cmax}$  - абсолютний коефіцієнт пульсацій напруги на конденсаторі. Для розрахунків задають  $k_a$  в межах 0,1...0,5.

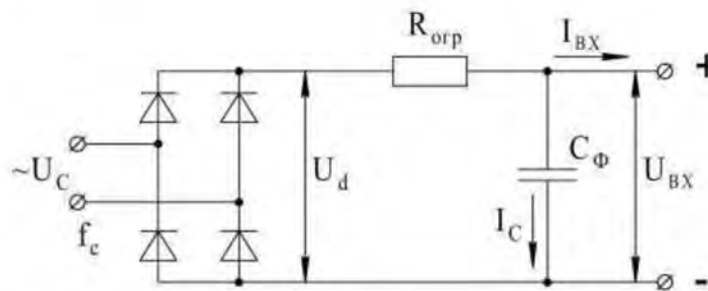


Рисунок 2.6 - Схеми випрямлячів з ємнісними фільтрами, що згладжують

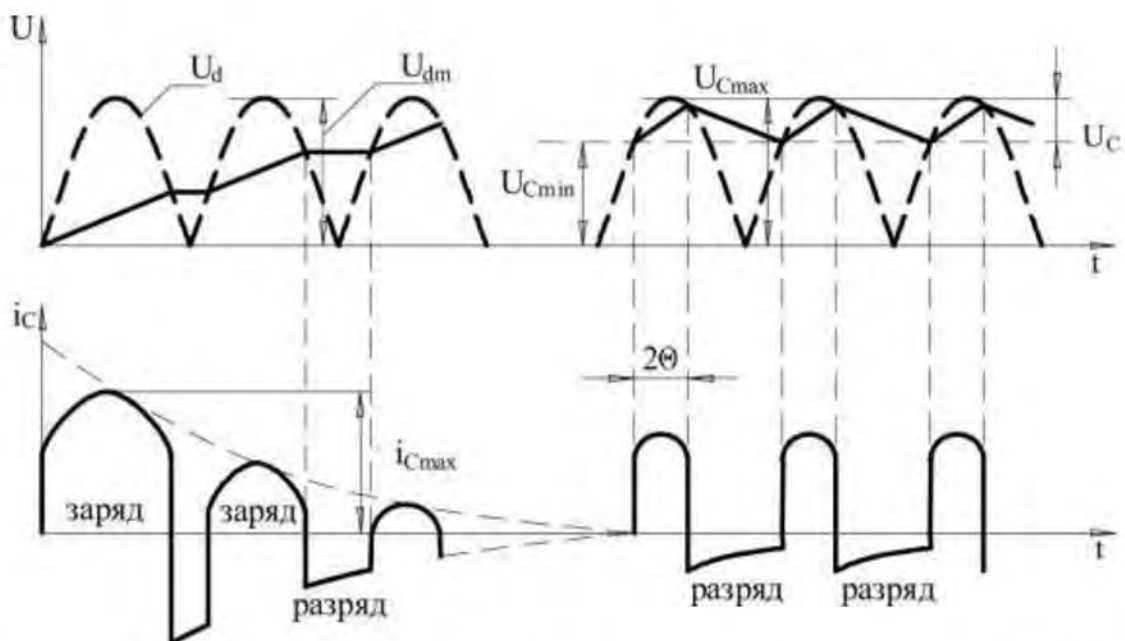


Рисунок 2.7 - Часові діаграми роботи однофазного мостового випрямляча

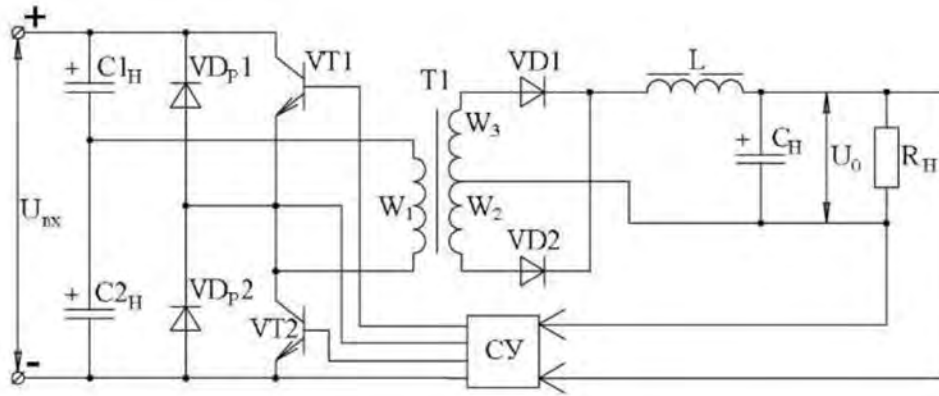


Рисунок 2.8 - Двотактний перетворювач із однофазним двохпівперіодним випрямлячем

Щоб не допустити виходу з ладу випрямних діодів, у схему вводять резистор  $R_{об}$ . Опір резистора визначають для найгіршого випадку, коли напруга мережі максимальною і обмежують  $I_{cmax}$  на рівні декількох десятків ампер. Реально  $R_{об}$  становить від 3 до 15 Ом для блоків живлення з вихідною потужністю 20...200 Вт. При цьому середня потужність, що розсіюється на резисторі, невелика й лежить у межах 1 Ват. При потужності блоків живлення 300 Вт і більше слід передбачати автоматичне шунтування  $R_{об}$  контактами реле.

### 2.5.1 Аналіз схеми перетворювача

Виберемо двотактний перетворювач із однофазним двохпівперіодним випрямлячем рисунок 2.8 і розрахуємо його.

Визначимо амплітудні значення ЕРС первинної  $U_{1m}$  і вторинної  $U_{2m}$  обмоток трансформатора перетворювача у функції напруги первинної мережі  $U_c$  і потужності навантаження  $P_0$  (для перетворювача при двохпівперіодній схемі випрямлення визначається амплітудне значення ЕРС вторинної обмотки).

Щоб визначити  $U_{1m}$  використаємо:

$$U_{1m} = 0,5 \cdot U_{cmin} - \Delta U_{C1} - U_{KE} - \Delta U_1, \quad (2.15)$$

$$\Delta U_{C1} = 0,1 \cdot U_{\text{ex}}, \quad (2.16)$$

$$\Delta U_{C1} = 0,1 \cdot 400 = 40B$$

$$U_{1m} = 0,5 \cdot 376 - 40 - 1,2 - 8 = 139B$$

Щоб визначити  $U_{2m}$  використаємо:

$$U_{2m} = \frac{U_0 + U_{np.VD} + \Delta U_{L1} + \Delta U_2}{\gamma_{max}}, \quad (2.17)$$

$$U_{2m} = \frac{72 + 1 + 8 + 1,2}{0,85} = 96,7B$$

Визначимо необхідний коефіцієнт трансформації  $n_{21}$  трансформатора:

$$n_{21} = U_{2m} / U_{1m} \quad (2.18)$$

$$n_{21} = 97 / 139 = 0,6978$$

Визначимо критичну індуктивність дроселя  $L_{кр}$ .

$$L = L_{кр}$$

$$L_{кр} = U_0(1 - \gamma) / (2f_n \cdot I_{0min}) \quad (2.19)$$

$$L_{кр} = 72(1 - 0,487) / (2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,5) = 940 \text{ мкГн}$$

## 2.5.2 Вибір і розрахунки трансформатора

Трансформатор є одним з основних елементів перетворювача, багато в чому визначальним його енергетичні й масо-об'ємні показники.

Визначимо діюче значення струмів первинної  $I_1$  і вторинної  $I_2$  обмоток трансформатора.

Для перетворювача при двохпівперіодної схеми випрямлення визначаємо діючі значення струму кожної із вторинних обмоток:

$$I_1 = n_{21} \cdot I_{0max} \sqrt{\gamma_{max}} \quad (2.20)$$

$$I_2 = I_{0max} \sqrt{\gamma_{max}} \quad (2.21)$$

$$I_1 = 0,6978 \cdot 15 \cdot \sqrt{0,85} = 9,65A$$

$$I_2 = 0,5 \sqrt{1 + 0,85} = 10,2A$$

Габаритна потужність трансформатора рівна:

$$P_2 = (2\eta + \sqrt{2}) U_{2m} \cdot I_2 \gamma / 2\eta \quad (2.22)$$

$$P_2 = (2 \cdot 0,8 + \sqrt{2}) 97 \cdot 10,2 \cdot 0,85 / 2 \cdot 0,8 = 1584 \text{ Вт}$$

Для вибору густини струму визначимо  $f_n/P_T = 25,25$ . Густина струму  $j=4 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ . Тип і параметри обраного магнітопроводу в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри магнітопроводу

Тип магнітопроводу	Розміри, мм						S <sub>ст</sub> S <sub>ок</sub> , см <sup>2</sup>	Марка ферите	S <sub>ст</sub> , см <sup>2</sup>	S <sub>ок</sub> , см <sup>2</sup>	L <sub>сп</sub> , мм
	L	l <sub>0</sub>	l	B	II	h					
Ш20x28	65	20	44	8	32	32	29,6	2000НМ1	5,7	5,19	144

Визначимо число витків первинної й вторинної обмотки:

$$W_1 = \gamma_{\text{макс}} \cdot U_{1m} / (S_{\text{ст}} \cdot \Delta B \cdot f_n) \quad (2.23)$$

$$W_1 = 0,85 \cdot 139 / (5,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24 \cdot 40000) = 22 \text{ витків}$$

$$W_2 = W_3 = W_1 \cdot n_{21} \quad (2.24)$$

$$W_2 = W_3 = 22 \cdot 0,6978 = 15 \text{ витків}$$

Визначимо поперечний переріз провідників первинної  $q_1$  і вторинної  $q_2$  обмоток трансформатора:

$$q_1 = I_1 / j \quad (2.25)$$

$$q_2 = q_3 = I_2 / j \quad (2.26)$$

$$q_1 = 9,63 / 4 \cdot 10^6 = 2,4 \text{ мм}^2$$

$$q_2 = q_3 = 10,2 / 4 \cdot 10^6 = 2,55 \text{ мм}^2$$

З довідкової таблиці виберемо стандартний переріз провідника, що має найближче значення поперечного перерізу до розрахункового  $d=1,81 \text{ мм}$ .

Зробимо перерахування поперечного перерізу провідника з урахуванням ізоляції ( $q_1'$ ,  $q_2'$ )

$$q_1' = q_2' = \pi(d/2)^2 \quad (2.27)$$

$$q_1' = q_2' = 3,14(1,81/2) = 2,573 \text{ мм}^2$$

За відомими значенням  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $q_1'$ ,  $q_2'$  перевіримо умову розміщення обмотки у вікні магнітопроводу:

$$q_1' (q_1' W_1 + 2 \cdot q_2' W_2) / S_{ок} \leq K_{ок}, \quad (2.26)$$

Якщо дана умова не виконується, то слід обрати більший типорозмір магнітопроводу трансформатора

$$0,2578 \leq 0,3$$

### 2.5.3 Розрахунки елементів силової частини перетворювача

Визначимо необхідне значення вихідної ємності  $C_n$ , ґрунтуючись на заданому значенні амплітуди пульсації вихідної напруги  $U_{вих.м}$ :

$$C_n = U_0 (1 - \gamma) / (16 \cdot f_n^2 \cdot L \cdot U_{вих.м}) \quad (2.27)$$

$$C_n = 72(1 - 0,487) / (16 \cdot (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 940 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05) = 31,2 \text{ мкФ}$$

Конденсатор необхідно вибирати таким чином, щоб ємність була більшою або рівною розрахунковому значенню, номінальна напруга  $U_{роб}$  більше або рівно  $1,5U_0 = 108\text{В}$ , а припустима величина пульсації на частоті перетворення більше  $U_{вих.м}$ .

Припустимий пульсуючий струм частоти 100 Герц -  $I$  (100Гц), перерахуємо в напругу пульсацій такої ж частоти:

$$U(100\text{Гц}) = I(100\text{Гц}) / (2\pi \cdot 100 \cdot C_n) \quad (2.28)$$

$$U(100\text{Гц}) = 151 \cdot 10^{-3} / (2\pi \cdot 100 \cdot 47 \cdot 10^{-6}) = 5,1\text{В}$$

Залежність припустимого діючого значення струму від частоти представлено на малюнку 2.9. За графіком для частоти 40кГц –  $K=1,45$

Знайдемо пульсації напруги більш високої частоти  $f$  при амплітуді пульсацій на частоті 300Гц:

$$U(300\text{Гц}) = K \cdot U(100\text{Гц}) \cdot 100 / f, \quad (2.29)$$

$$U(300\Gamma\text{ц}) = 1,76 \cdot 5,1 \cdot 100 / 300 = 2,482B,$$

де

$$K = I_f / I(100\Gamma\text{ц}) \quad (2.30)$$

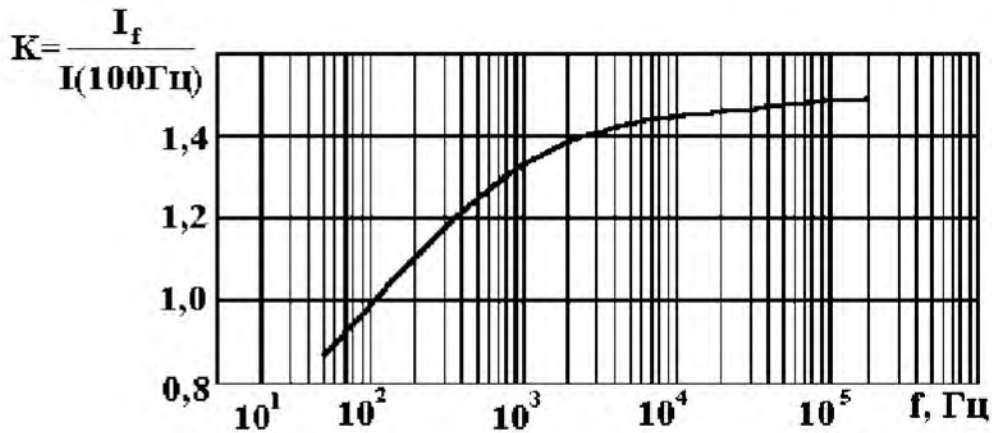


Рисунок 2.9 – Залежність частоти від ефективного струму

$$U_{300} = 2,482 > U_{вихт} = 0,05B$$

Очевидно, що для обраного типу конденсатора  $U_f$  повинне бути більше або рівно  $U_{вихт}$ .

Визначимо збільшення струму дроселя:

$$\Delta I_L = U_0(1 - \gamma_{min}) / (L \cdot f_n) \quad (2.31)$$

$$\Delta I_L = 72(1 - 0,487) / (940 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^3) = 0,98A$$

Визначимо значення максимального струму стоку  $I_{Cmax}$  польових транзисторів VT1 і VT2 за наперед обраним значенням КПД:

$$I_{C1max} = I_{C2max} = (I_{0max} + \Delta I_L / 2) \cdot n_{21} / \eta \quad (2.32)$$

$$I_{C1max} = I_{C2max} = (15 + 0,98 / 2) \cdot 0,6978 / 0,8 = 13,51A$$

Визначимо максимальне значення напруги на закритому транзисторі  $U_{CBmax}$ :

$$U_{CBmax} = U_{exmax} = 424B.$$

Виберемо тип транзистора за значеннями  $I_{Cmax}$ ,  $U_{CImax}$  і заданій частоті перетворення  $f_n$ :

При виборі польового транзистора необхідно, щоб:

$$U_{CB} \geq 1,2U_{CBmax}, I_C \geq I_{C1max}$$

Визначимо опір стік-джерело у відкритому стані ( $R_{cm-дж}$ ) обраного польового транзистора: КП973А його параметри  $U_{CB}=700\text{В}$ ;  $I_{Cmax}=30\text{А}$ ;  $R_{cm-дж}=0,03\text{Ом}$ .

Визначимо максимально припустиму потужність польового транзистора:

$$P_{CTmax} = I_{Cmax}^2 \cdot R_{cm-дж} \quad (2.32)$$

$$P_{CTmax} = 13,51^2 \cdot 0,03 = 5,47\text{Вт}$$

Визначимо параметри діодів VD1, VD2: середнє й максимальне значення струму діодів  $I_{VD1max}$ ,  $I_{VD2max}$  максимальна зворотна напруга на діодах  $U_{VD1max}$ ,  $U_{VD2max}$ . Знаходимо потужність, що розсіюється на діодах  $P_{VD1}$ ,  $P_{VD2}$ .

$$I_{VD1max} = I_{VD2max} = I_{0max} + \Delta I_L / 2 (I_{0max} + \Delta I_L / 2) \quad (2.33)$$

$$I_{VD1max} = I_{VD2max} = 15 + 0,98 / 2 (15 + 0,98 / 2) = 15,5\text{А}$$

$$U_{VD1max} = U_{VD2max} = U_0 / \gamma_{max} \quad (2.34)$$

$$U_{VD1max} = U_{VD2max} = 72 / 0,85 = 84,78\text{В}$$

$$P_{VD1} = P_{VD2} = (U_{np} \cdot I_{np} + f_{II} \cdot U_{VD1max} \cdot I_{VD1max} \cdot 0,01) / f_{np} \quad (2.35)$$

$$P_{VD1} = P_{VD2} = (1 \cdot 7,5 + 40 \cdot 10^3 \cdot 84,7 \cdot 15,5 \cdot 0,01) / 100 \cdot 10^3 = 5,25\text{Вт}$$

Візьмемо діод: КД2997А з параметрами  $U_{звmax} = 200\text{В}$ ,  $I_{npmax} = 30\text{А}$ ,

$P_{срmax} = 30\text{Вт}$ ,  $f_{np} = 100\text{кГц}$ .

## 2.5.4 Розробка схеми управління

На рисунку 3.5 представлена функціональна схема ШИМ- контролера МС34063 призначена для керування двотактними схемами перетворювачів напруги.

ІМС містить:

- комплементарні вихідні каскади DA9-DA10;
- генератор пилкоподібної напруги;
- джерело напруги зсуву DA1 на 1,25 В;

- схему блокування від зниженої напруги живлення DA5;
- джерело опорної напруги на 5,1 В;
- широкосмуговий підсилювач сигналу неузгодженості DA2;
- шім компаратор DA6;
- шім блокування DD3;
- фазорозчеплювач DD5-DD6;
- вузол плавного запуску VT1-VT2-DA7;
- компаратори обмеження струму DA3 і вимикання схеми DA4;
- компаратор контролю величини опорної напруги DA8;
- схему керування вихідними ключами DD7-DD8.

На рисунку 2.10 представлена схема перетворювача постійної напруги в постійну.

Схема зворотного зв'язку по напрузі побудована на елементах DA3, DA4, R5...R8, R9...R11. У даній схемі датчиком вихідної напруги DA4 служить транзисторна оптопара 4N25 яка забезпечує гальванічну розв'язку виходу ІБЖ і кіл ІМС. Залежність струму транзистора оптопарі від струму світлодіода (рисунок 2.12 б) має високу лінійність до струму діода 10 мА. Елемент DA4 мікросхема серії TL431 являє собою трьохвивідний регульований прецизійний паралельний стабілізатор з високою температурною стабільністю.

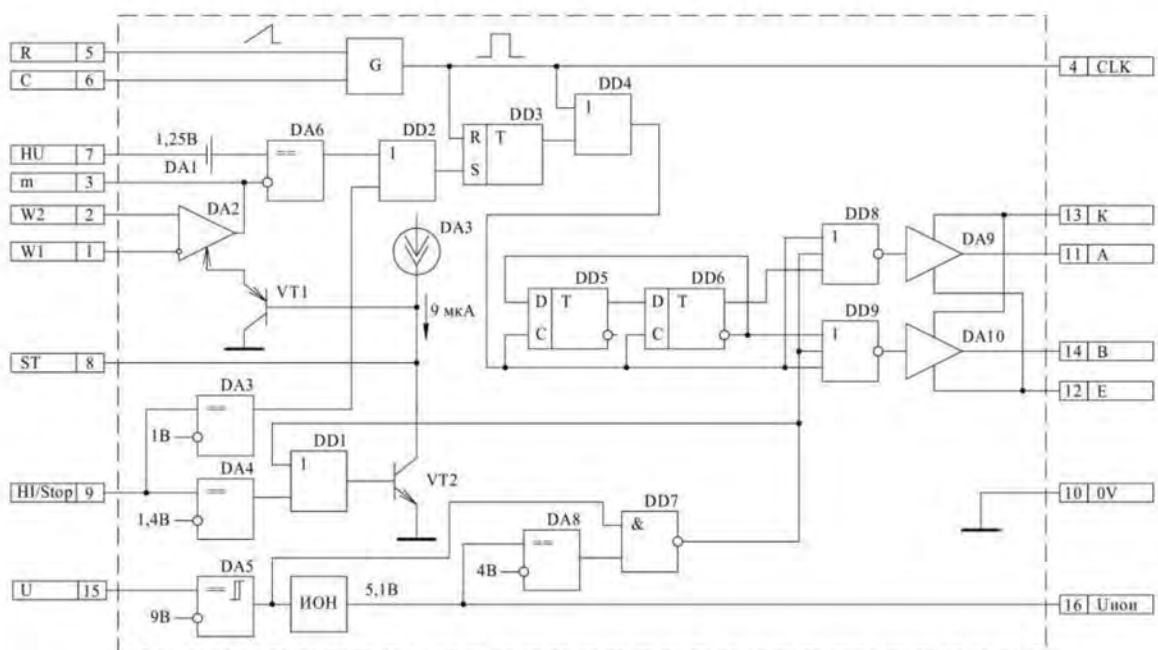


Рисунок 2.10 – Функціональна схема ІМС MC34063

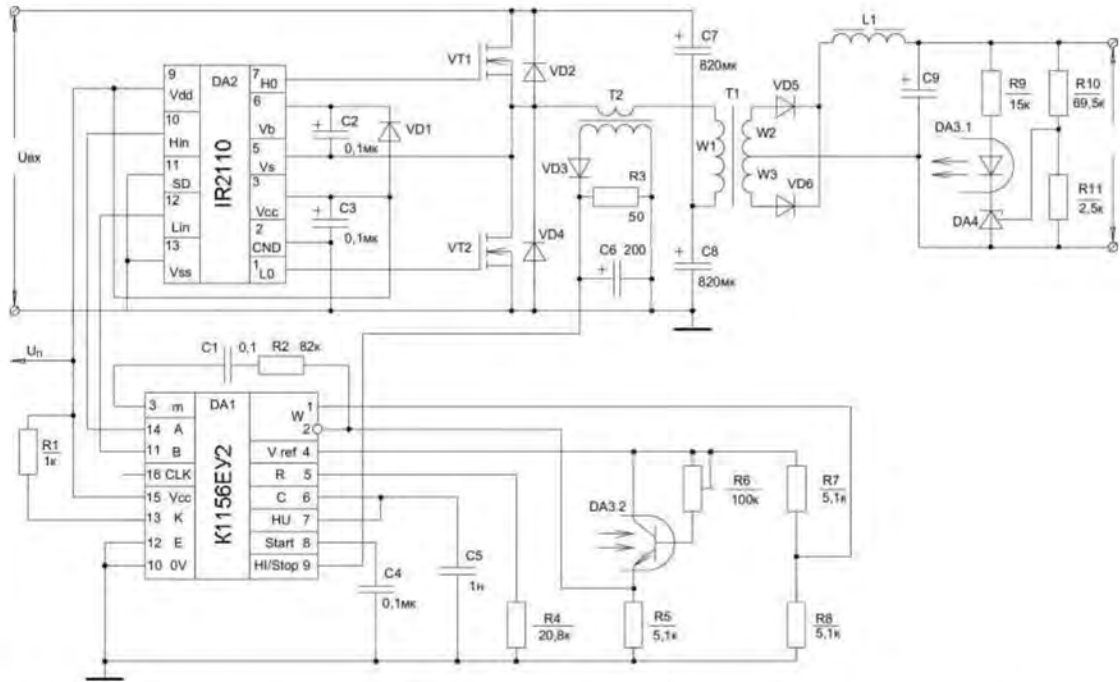
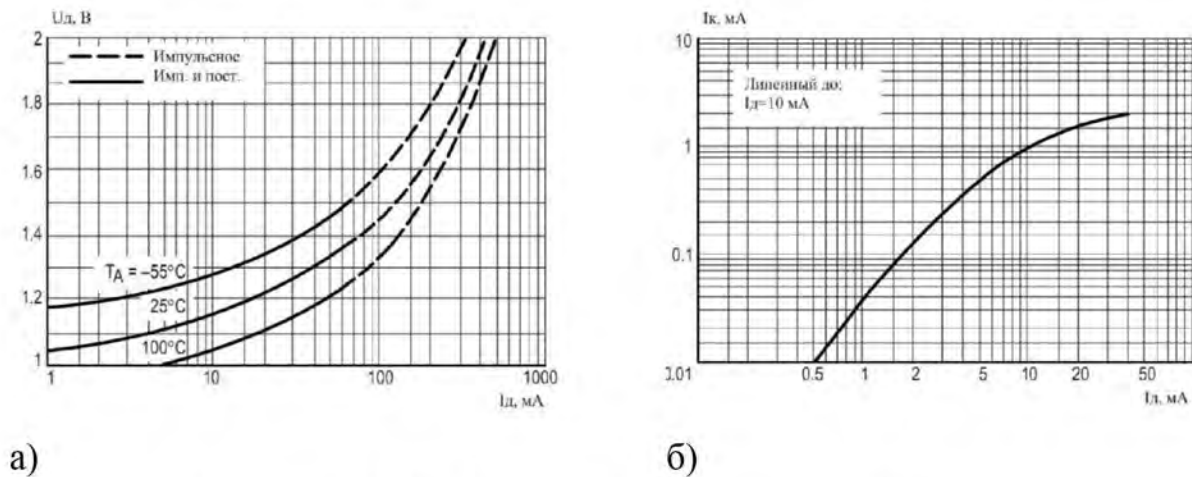


Рисунок 2.11 – Схема розробленого імпульсного блоку живлення



а)

б)

Рисунок 2.12 – Характеристика оптического перетворювача для зворотнього зв'язку

Дільник напруги резистори R10 і R11 задають напругу для програмованого стабілізатора DA4, потрібно 2,495В. Опір R11 визначаємо наступним чином  $R11 = 2,495 / I_{\text{д}} = 2,495 / 0,001 = 2495 \text{ Ом}$ , де  $I_{\text{д}}$  - струм через дільник. Для підтримки опорної напруги потрібний точний опір  $2,495 \text{ кОм} \pm 1\%$ .

Опір R10 визначаємо наступним чином  $R10 = U_{\text{aux}} / I_{\text{д}} - R11 = 72 / 0,001 - 2495 = 69,505 \text{ кОм} \pm 1\%$

Стумообмежуючий резистор  $R9$  у колі оптопарі при струмі 5мА:

$$R9 = (U_{вих} - U_{npDA3.1}) / 0,005 = 14200 \text{ Ом}.$$

Виберемо  $R9$ , з врахуванням того що на світлодіоді буде падати близько 1В,  $R9=15\text{кОм}$ . Опори  $R7$  і  $R8$  ділять еталонну напругу навпіл, і вона подається на інвертуючий вхід, підсилювача помилки, це робиться для того щоб розширити діапазон регулювання. Коло DA3.2-R5 також заживлена від еталонного джерела тому напруга помилки не перевищить 5,1В.

Схема частотної корекції, що підключається між виходом і інверсним входом операційного підсилювача і представляє із себе фільтр низьких частот призначений, для виключення впливу високочастотних перешкод і самозбудження підсилювача помилки із граничною частотою не більш 20 Гц. Прийmemo  $C1 = 0,1$  мкФ:  $R2 = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}) = 79577 \text{ Ом}$ , візьmemo  $R2 = 82 \text{ Ом}$ .

Коло захисту ІБЖ по струму складається із трансформатора струму T2 випрямляча VD3 та резистора R3. Первинна обмотка трансформатора T2 містить 1 виток. Прийmemo коефіцієнт трансформації  $n_{2-1} = 240$ , тоді при максимальному струмі  $I_1 = 9,65\text{А}$  ефективний струм вторинної обмотки буде:

$$I_2 = I_1 / n_{2-1}$$

$$I_2 = 9,65 / 240 = 40,2 \text{ мА}$$

Знайdemo опір R3:

$$R3 = \frac{U_{nadVD} + 1}{0,04} = 50 \text{ Ом}$$

Знайdemo ємність C6:

$$C6 = \frac{2}{R3f},$$

$$C6 = \frac{2}{50 \cdot 40 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-6}, \text{ візьmemo } 100 \text{ мкФ}.$$

Задаючий генератор, розрахований на роботу на частотах до 1МГц, параметри якого визначаються RC-колом (виводи 5 і 6). Частота генератора встановлюється зовнішніми компонентами R4 і C5, підключенням до виходів 5

і 6 мікросхеми відповідно. Щоб частота перетворення була 40 кГц частота генератора повинна бути 80 кГц. На виводі 5 ІМС генерується напруга 3В (номінальне), а струм через R4 передається на вивід 6 у відношенні 1:1. Тому струм заряду ємності C5 визначається з виразу  $I_{C5} = 3/R4$ . "Мертвий час" генератора, що визначає динамічний діапазон контролера, залежить від C5 при його ємності 1нф мертвий час становить 140 нс. Тоді задаючий опір R4 генератора складе:

$$R4 = \frac{3(1/f - 140 \cdot 10^{-9})}{C \cdot \Delta U_g},$$

$$R4 = \frac{3(1/80000 - 140 \cdot 10^{-9})}{1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,8} = 20,6 \text{ кОм},$$

де  $\Delta U_g = 1,8 \text{ В}$  - розмах пили,  $f = 80 \text{ кГц}$  - частота генератора.

Вибираємо номінальний 20,8 кОм.

ІМС DA2 IR2110 двотактний драйвер, який складається із двох незалежних каналів. У схемі застосований бутстрепний метод керування верхнім силовим транзистором. Бутстрепний метод керування ефективно можна застосовувати тільки для MOSFET і IGBT транзисторів, які вимагають незначних витрат потужності які проходять колом керування. На рисунку 2.13 показана схема, що пояснює суть методу бутстрепного живлення.

Під час того коли транзистор нижнього плеча VTн відкритий і через нього протікає струм і конденсатор C<sub>Б</sub> заряджається від джерела живлення драйвера V<sub>д</sub> через діод VD<sub>Б</sub>. Коли транзистор нижнього плеча закривається діод VD<sub>Б</sub> виявляється замкнутим і вся схема живиться від конденсатора C<sub>Б</sub>.

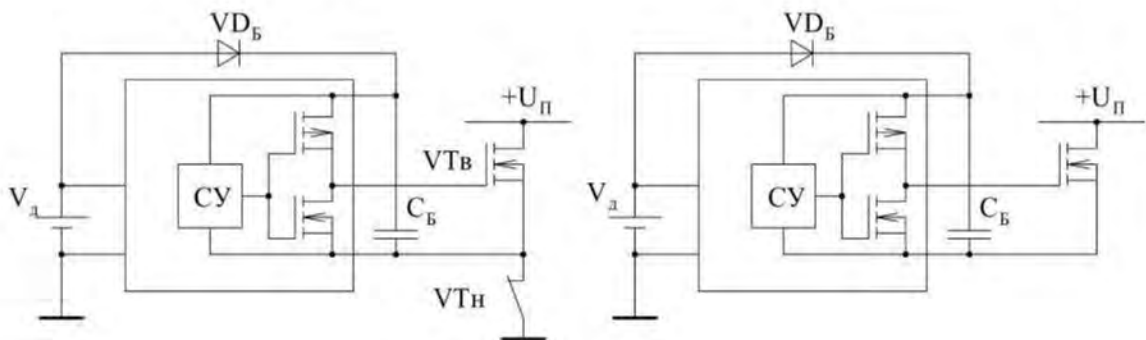


Рисунок 2.13 – Бутстрепний метод керування транзистором верхнього плеча напівмостової схеми

Мінімальна ємність  $C_B$  визначається за формулою:

$$C_B = \frac{2 \left( 2Q_c + \frac{I_{\text{вхк}}}{f} + Q_d \right)}{V_a - \Delta U_a},$$

$$C_B = \frac{2 \left( 2 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} + \frac{2}{40000} + 5 \cdot 10^{-9} \right)}{12 - 1} = 1 \text{ мкФ}, \text{ де}$$

$Q_c = C_c \cdot U_c$  величина заряду затвора транзистора,  $Q_d$  - циклічна зміна заряду драйвера, для даної мікросхеми 5 нКл,  $I_{\text{вхк}}$  - струм споживання вихідного каскаду в статичному режимі.

Дане значення є мінімальним і конденсатор С2 і С3 треба взяти з ємністю на кілька порядків вище.

## **3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І МЕТРОЛОГІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ**

### **3.1. Розробка методики проведення експерименту**

Для отримання достовірних результатів вимірювання слід дотримуватися певної методики проведення експерименту яка представлена на Рис. 2.5

Перший крок в процесі дослідження змонтувати конкретний випробуваний модуль між блоками теплового потоку. Оскільки поверхні блоків теплового потоку мали мікро тріщини і поверхневі дефекти то застосовується термопаста з високою теплопровідністю, щоб зменшити тепловий контактний опір. Випробувальний стенд потім пригвинчується за допомогою гайки, використовуючи динамометрический ключ, щоб переконатися, що всі болти затиснуті з однаковим тиском.

Робиться вибір тестового зразка ТЕГ або ТЕО.

У режимі тестування ТЕГ електронне навантаження підключена до виходів модуля в режимі тестування ТЕО замість електронного навантаження підключається джерело живлення.

При випробуванні ТЕГ опір електронного навантаження встановлюють на потрібне значення. В цьому режимі електронне навантаження діє як змінний резистор. В якості альтернативи, електронне навантаження здатне працювати в режимі постійної напруги, постійного струму і постійної потужності. Електронна навантаження для ТЕГ в даних режимах буде визначати постійну напругу, струм або значення потужності відповідно.

Наступний етап визначення температури площини, до якої нагрівач і охолоджувач будуть підтримувати тестовий зразок в той час як генерується потужність. Системам управління потрібно від 20 до 40 хвилин, щоб досягти стану стійкої рівноваги.

Було визначено, що великі перепади температури через модуль (ТЕГ) або більш високі вхідні значення потужності (ТЕО) приведуть до збільшення часу очікування. Стаціонарні умови були апроксимовані шляхом перевірки діаграми

форми сигналу, яка показує показники температури в залежності від часу. Коли значення температури залишалося незмінним (в межах  $\pm 0,1$  °C) приблизно 2 хвилини після чого умови стаціонарного режиму були досягнуті і почнетися запис даних з файлу в таблицю.

Більшість виробників ТЕГ надають свої криві продуктивності при відповідних значеннях опору навантаження, так як ця величина буде давати максимальну вихідну потужність. Початкове значення заданого опору відповідає опору навантаження яке було отримано з використанням аналітичного підходу (з використанням ефективних властивостей матеріалу). Опір навантаження потім змінювалося (збільшується і зменшується) від початкового значення до істинного узгодженого значення опору ТЕГ що давало максимальну потужність) був визначений. Переміщення в великому діапазоні опорів для визначення відповідних умов навантаження займало б надто багато часу, без початкового його значення.

Слід зазначити, що опір змінному струму для ТЕГ модуля не може бути вимірною безпосередньо з використанням звичайного омметра, але змінна напруга рекомендується для використання на практиці. Це необхідно тому, що подача постійного струму на модуль може викликати падіння температури на модулі, що призводить до зростання напруги Зеебека, яка буде генеруватися в протилежному напрямку від прикладеної напруги. Це, в свою чергу, дасть похибку на вимірювання опору і зробить його значення більшим, ніж насправді. Для того, щоб протистояти цьому ефекту слід застосовувати змінну напругу високої частоти, оскільки полярність змінюється кожен півперіод і викличе компенсацію напруги Зеебека.

Процес збору даних повторюють до тих пір поки не отримають достатню кількість точок даних, для побудови графічних залежностей. Ці дані потім порівнюють з аналітичним підходом і даними, отриманими від виробників.

Залишки термопаста між блоками теплового потоку і модулем видаляється, коли модуль виймається за допомогою 91% ізопропілового спирту.

Слід звернути увагу що надмірне накопичення теплопровідної пасти негативно погіршить теплообмін між поверхнями, а не покращить його і призведе до помилкових показників температури та розрахунків теплового потоку.

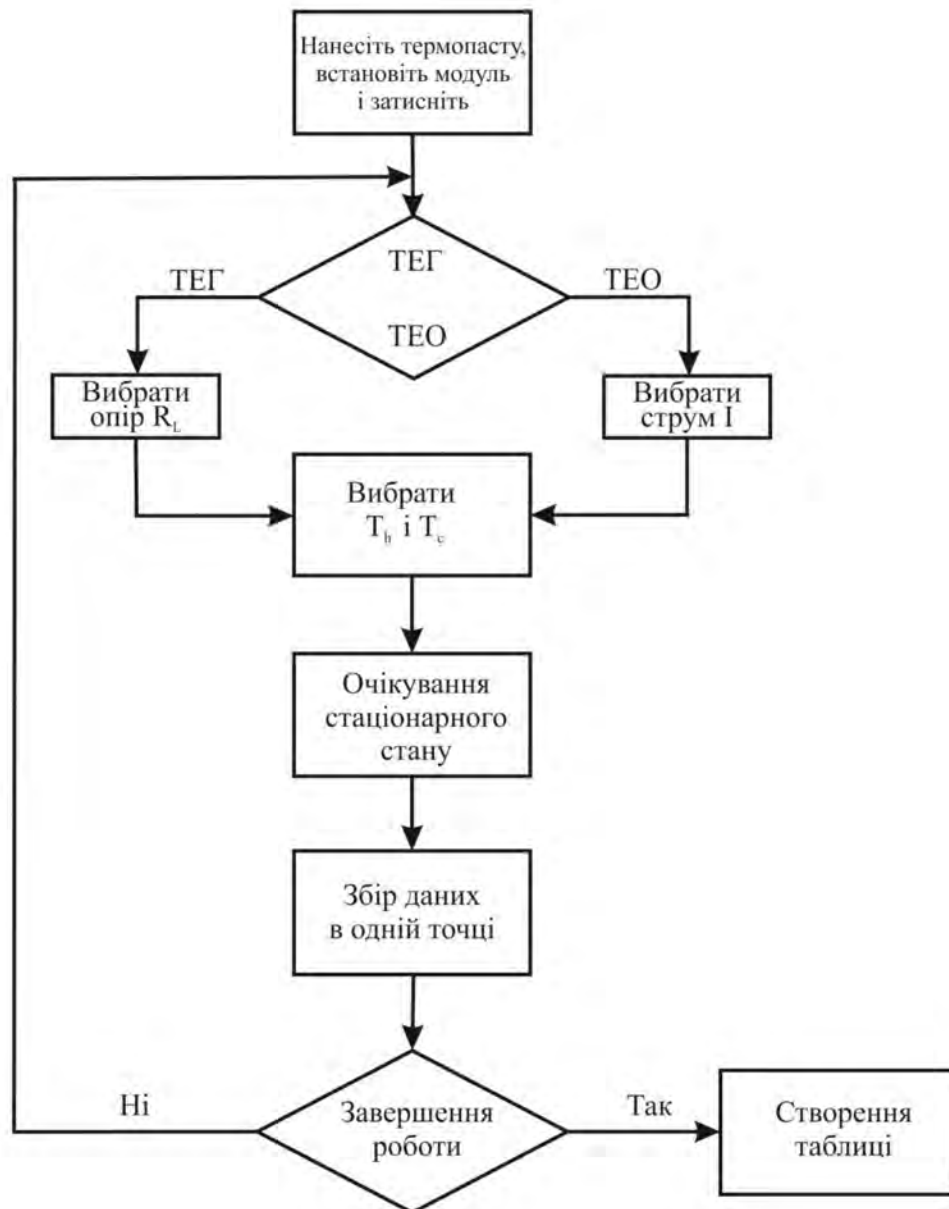


Рисунок 3.1 Блок-схема процесу експериментальної оцінки ефективності термоелектричних модулів

### 3.2 Розрахунок властивостей матеріалу ТЕГ з отриманих експериментальних даних

Так як термоелектричні модулі містять одну або більше термоелектричних пар, їх число  $n$  є важливим параметром для розгляду в ідеальних рівняннях. Використовуючи визначення параметрів модульного тег з рівнянь (1.60) і (1.65) і рівняння (1.46) і (1.56), відповідно, максимальна вихідна потужність модуля і його напруга

$$(W)_{mmax} = \frac{n\alpha^2(T_z - T_x)^2}{4R} \quad (3.1)$$

$$(U)_{mmax} = n\alpha(T_z - T_x) \quad (3.2)$$

Максимальний струм  $I_{max}$  не залежить від кількості пар і був визначений в рівнянні (1.54)

$$I_{max} = \frac{\alpha(T_z - T_x)}{R} \quad (1.54)$$

Для подібних р- і n- типу матеріалів в кожних ідентичних парах модуля опір модуля  $(R)_n$  і теплопровідність  $(K)_n$ , приведено в рівняннях (1.64) і (1.66), відповідно, може бути перевизначена як

$$(R)_m = nR = n\rho\left(\frac{L}{A}\right) \quad (3.3)$$

$$(K)_m = nK = nk\left(\frac{A}{L}\right) \quad (3.4)$$

Тепер є два способи отримання ефективного електричного опору модуля  $(R)_n^*$  від максимальної вихідної потужності в рівнянні (3.1): або з використанням максимального струму або напруги. Використовуючи максимальний струм і шляхом спостереження і порівняння рівнянь (3.1) і (1.54) було встановлено, що

$$(R)_m^* = \frac{4(W)_{mmax}}{(I_{max})^2} \quad (3.5)$$

З іншого боку, при використанні максимальної напруги, рівняння (3.1) і (3.2) отримаємо

$$(R)_m^* = \frac{((U)_{mmax})^2}{4(W)_{mmax}} \quad (3.6)$$

Якщо геометричний коефіцієнт (елемент площа поперечного перерізу  $A$  по довжині  $L$ ), відомо, і передбачається, що модуль має однакові пари віток р- і п-типу, що мають однакову геометрію ефективний електричний опір може бути обчислено. Для подібних р- і п- типу матеріалів і з використанням рівняння (3.3), рівняння (3.5) і (3.6) відповідно, отримаємо

$$\rho^* = \frac{4\left(\frac{A}{L}\right)(W)_{mmax}}{n(I_{max})^2} \quad (3.7)$$

$$\rho^* = \frac{\left(\frac{A}{L}\right)((U)_{mmax})^2}{4n(W)_{mmax}} \quad (3.8)$$

Ефективний коефіцієнт Зеебека  $\alpha^*$ , отриманий з використанням максимального струму від рівняння (1.54) і (3.7), є

$$\alpha^* = \frac{4(W)_{mmax}}{nI_{max}(T_z - T_x)} \quad (3.9)$$

Використовуючи максимальну напругу модуля рівняння (3.2) ефективний коефіцієнт Зеебека також може бути отриманий як

$$\alpha^* = \frac{(U)_{mmax}}{n(T_z - T_x)} \quad (3.10)$$

Різниця температур переходу  $(T_z - T_x)$ , яка використовується в рівняннях (3.9) і (3.10) повинна бути температурами, при яких були отримані максимальні параметри. Крім того, ефективний коефіцієнт Зеебека не залежить від геометрії, але залежить від числа пар  $n$ . Якщо інформація про кількість пар відсутня то обчислюється модульний ефективний коефіцієнт Зеебека  $\alpha_n^*$ . Використання максимального струму і максимальної напруги модуля, відповідно можна обчислити

$$\alpha_n^* = n\alpha^* = \frac{4(W)_{max}}{I_{max}(T_2 - T_x)} \quad (3.11)$$

$$\alpha_n^* = n\alpha^* = \frac{(U)_{max}}{n(T_2 - T_x)} \quad (3.12)$$

Ефективний показник термоелектричної добротності  $Z^*$  може бути отриманий з максимальної ефективності перетворення для ТЕГ, наведеної в рівнянні (1.52). Використовуючи визначення середньої температури переходу  $\bar{T}$  з рівняння (1.49) і деяких алгебраїчних перетворень

$$\eta = \frac{2}{T_x \left[ 1 + \left( \frac{T_x}{T_2} \right)^{-1} \right]} \left[ \frac{\left( 1 + \left( \frac{\eta_{max}}{\eta_c} \right) \left( \frac{T_x}{T_2} \right) \right)^2}{1 - \left( \frac{\eta_{max}}{\eta_c} \right)} - 1 \right] \quad (3.13)$$

де  $\eta_c = 1 - \frac{T_x}{T_2}$  - це ефективність Карно. Рівняння (3.13) є зручним для використання в нормалізованій формі, яка використовує співвідношення температур  $\left( \frac{T_x}{T_2} \right)$ , холодна температура переходу  $T_x$  і відношення максимальної теплової ефективності до максимально можливої (Карно) ефективності  $\left( \frac{\eta_{max}}{\eta_c} \right)$ . Це співвідношення відоме ще як закон другої ефективності. Температура холодного спаю як правило, базова температура для системи ТЕГ через механічні обмеження. Найчастіше рівняння (3.13) не можуть бути застосовні, так як виробники не можуть забезпечити максимальну ефективність перетворення, але замість цього вони дають ефективність при максимальній потужності, визначеної в рівнянні (1.47). Після алгебраїчних перетворень визначимо

$$Z^* = \frac{\frac{4}{T_x} \left( \frac{T_x}{T_2} \right)}{\eta_c \left( \frac{1}{\eta_{mp}} + \frac{1}{2} \right) - 2} \quad (3.14)$$

При використанні або рівняння (3.13) або (3.14) ефективна модульна теплопровідність  $(K)_n^*$  може бути отримана шляхом визначення коефіцієнта термоелектричної добротності з рівняння (1.4)

$$(K)_m^* = \frac{\alpha_m^{*2}}{(R)_m^* Z^*} \quad (3.15)$$

Якщо інформація про геометрію елемента і загальну кількість пар доступні ефективна теплопровідність  $k^*$  з рівняння (3.15), з використанням рівняння (3.4)

$$k^* = \frac{(\alpha^*)^2}{\rho^* Z^*} \quad (3.16)$$

Таким чином, всі три властивості термоелектричного матеріалу або властивостей модуля можуть бути легко обчислені за допомогою цих ефективних значень.

### 3.3 Оцінка похибки розробленого пристрою

Якість вимірювальних засобів та отриманих результатів зазвичай оцінюється за допомогою показників похибок. Похибка вимірювання визначається як різниця між отриманим значенням і фактичним (істинним) значенням величини, що вимірюється. Через те, що причини виникнення похибок і форми їх прояву можуть бути дуже різними, на практиці прийнято класифікувати похибки за окремими типами, кожен з яких має свою назву. Основні типи похибок включають: інструментальні, методичні, основну та додаткову, статичну й динамічну, систематичні й випадкові, а також абсолютну, відносну і приведену похибки.

Інструментальні похибки — це похибки, притаманні конкретному вимірювальному приладу. Вони можуть бути виявлені під час проведення випробувань цього засобу вимірювання та зафіксовані в його технічному паспорті.

Окрім інструментальних похибок, під час вимірювань можуть виникати похибки, які не стосуються самого вимірювального приладу, а пов'язані з обраною методикою проведення вимірювання. Такі похибки називають методичними. Часто вони виникають у ситуаціях, коли під час організації вимірювання доводиться визначати не ту фізичну величину, яка підлягає вимірюванню, а іншу — схожу, але не ідентичну. Подібна заміна — поширений підхід, який дозволяє значно спростити конструкцію приладів і спростити сам процес вимірювання, що робить їх більш універсальними та зручними у використанні. Проте, якщо такий метод вже закладений у принцип роботи приладу, то відповідні похибки мають бути оцінені, задокументовані і вказані в технічному паспорті. Після цього, незалежно від джерела їх виникнення, з погляду користувача всі ці похибки вважаються інструментальними.

Характерною рисою методичних похибок є те, що їх неможливо виявити виключно шляхом дослідження самого вимірювального приладу. Для їхнього визначення необхідно побудувати математичну модель або застосувати методи імітаційного моделювання об'єкта дослідження.

Основною вважається така похибка засобу вимірювання, яка виникає під час його використання в умовах, визначених нормативно-технічною документацією як стандартні або нормальні. Вона переважно обумовлена інструментальними чинниками, зумовленими обмеженнями конструктивних рішень або фізичними принципами, на яких ґрунтується робота засобу вимірювання.

Похибки, що з'являються у вимірювальному приладі внаслідок відхилення умов його експлуатації від встановлених стандартних, називають додатковими. Наприклад, такі похибки можуть виникнути внаслідок:

неточного встановлення приладу, тобто, коли стрілковий вимірювач розміщено не строго горизонтально або при відхиленні зовнішніх впливів (температури, вологості тощо) від рекомендованих значень;

недосконалості методики вимірювання, що може бути зумовлено спрощеннями в математичних моделях чи застосуванням наближених розрахункових формул;

людського фактора, який проявляється через індивідуальні особливості експериментатора — втому, обмеження зору, тенденцію систематично завищувати або занижувати результати вимірювань тощо.

Експлуатаційною похибкою називають відхилення, яке виникає під час використання вимірювального приладу в реальних умовах. Вона включає в себе як основну похибку, так і всі додаткові похибки, що виникають через відхилення умов експлуатації від нормованих. У результаті цього фактична похибка може суттєво перевищувати значення основної.

Статичні та динамічні похибки виникають як у вимірювальних приладах, так і в отриманих результатах, і класифікуються залежно від того, чи впливає на них швидкість зміни вимірюваної величини з часом. Якщо похибка не залежить від цієї швидкості, її називають статичною. У свою чергу, динамічна похибка з'являється лише тоді, коли вимірювана величина починає змінюватися з певною швидкістю, і вона зростає зі збільшенням цієї швидкості; при практично сталому значенні (тобто нульовій швидкості зміни) така похибка відсутня.

Систематичні похибки – це такі відхилення, які мають сталі закономірності змін і залежать від певних чинників або параметрів. Їх характерною особливістю є те, що вони піддаються прогнозуванню, а отже, можуть бути майже повністю усунені шляхом внесення відповідних коригувань у результати вимірювань. Основна загроза таких похибок полягає в складності їх виявлення, особливо коли вони залишаються сталими протягом усього процесу вимірювання.

Випадкові похибки — це такі відхилення у вимірюваннях, які не мають визначеного напрямку або розміру, тобто їх неможливо передбачити. Вони проявляються як розкид результатів при багаторазовому повторенні одного й того самого вимірювання. Аналіз та опис таких похибок здійснюється за допомогою методів математичної статистики та ймовірнісного підходу.

Абсолютна похибка  $\Delta x$  - це різниця між вимірюваною величиною  $x_{\text{ном}}$  (показником приладу  $x_n$ ) і дійсним значенням  $x$  вимірюваної величини, тобто для вимірювання  $\Delta x = x_{\text{ном}} - x$ , а для приладу  $\Delta x = x_n - x$ .

Різниця між реальною і номінальною характеристиками при заданому значенні  $x$ , тобто  $\Delta y = y_p - y_n$ , або при заданому значенні  $y$ , тобто  $\Delta x = x_n - x_p$  є абсолютними похибками, так як вони виражаються відповідно в одиницях величин  $x$  і  $y$ . Знак абсолютної похибки приймається додатнім, якщо реальна характеристика знаходиться вище номінальної.

Абсолютна похибка не може сама по собі бути показником точності вимірювань. Для характеристики точності результатів вимірювання ввели поняття відносної похибки  $\gamma = \frac{\Delta x}{x} \approx \frac{\Delta y}{y}$ , яка виражається у відносних одиницях або у відсотках ( $x$  і  $y$  текучі значення вхідної і вихідної величини засобу вимірювань).

Однак вказана відносна похибка не завжди підходить для нормування похибки засобу вимірювань, для нормування похибки використовують приведену похибку  $\gamma_{np}$ , яка визначається як відношення абсолютної похибки, вираженої в одиницях вхідної  $\Delta x$  чи вихідної  $\Delta y$  величин, до діапазону зміни відповідної вхідної  $x_k$  чи вихідної  $y_k$  величин засобу вимірювань і виражається у відносних одиницях або у відсотках, тобто  $\gamma_{np} = \frac{\Delta x}{x_k} = \frac{\Delta y}{y_k}$ . Приведена похибка зручна тим, що для багато діапазонних засобів вимірювань вона має одне і те ж значення як для всіх точок кожного піддіапазону, так і для всіх його піддіапазонів, тобто є досить зручною для нормування засобів вимірювань.

Поточні стандарти визначають поняття абсолютної, відносної та приведеної похибок лише щодо засобів вимірювання. Проте ці характеристики зручно застосовувати і для оцінювання самих результатів вимірювань.

Термін "невизначеність" (uncertainty) за змістом відображає сумнів, тому в загальному розумінні "невизначеність вимірювання" трактується як рівень сумніву щодо точності отриманого результату. Формально це поняття визначається як параметр, що супроводжує результат вимірювання і описує розсіювання значень, які можуть бути обґрунтовано віднесені до вимірюваної величини.

Невизначеність результату вимірювання свідчить про обмеженість знань щодо істинного значення вимірюваної величини. Навіть після внесення поправок на відомі систематичні впливи, результат вимірювання залишається лише наближеним значенням, оскільки він усе ще містить невизначеності, зумовлені випадковими чинниками та неточністю врахування систематичних похибок.

Навіть після врахування поправок результат вимірювання може дуже точно наближатися до справжнього значення вимірюваної величини, тобто мати незначну похибку, незважаючи на високу невизначеність. Отже, невизначеність не варто ототожнювати з залишковою похибкою, яка залишається невідомою.

Оскільки точне значення похибки вимірювання не може бути відоме або визначене однозначно, то пов'язані з нею невизначеності — як ті, що спричинені випадковими чинниками, так і ті, що зумовлені систематичними ефектами — можуть лише бути оцінені. Однак навіть малі значення оціненої невизначеності не гарантують, що похибка вимірювання також є незначною. Це пояснюється тим, що в процесі внесення поправок або через обмеженість знань деякі систематичні впливи можуть залишитися непоміченими і, відповідно, не врахованими. Отже, невизначеність результату не обов'язково свідчить про його наближеність до істинного значення вимірюваної величини — вона лише відображає ступінь довіри до результату згідно з наявною на момент вимірювання інформацією.

Невизначеності вимірювань можуть бути класифіковані за різними ознаками, зокрема за способом оцінювання вони діляться на два типи:

- невизначеність, що оцінюється за типом А (невизначеність типу А) - невизначеність, яку оцінюють статистичними методами,
- невизначеність, що оцінюється за типом В (невизначеність типу В) - невизначеність, яку оцінюють нестатистичні методами.

Відповідно пропонується і два методи оцінювання:

- оцінювання за типом А – отримання статистичних оцінок на основі результатів ряду вимірювань,

• оцінювання за типом В – отримання оцінок на основі апіорної нестатистичної інформації.

Отже розглянемо джерела невизначеностей для розробленої нами установки рис 3.2

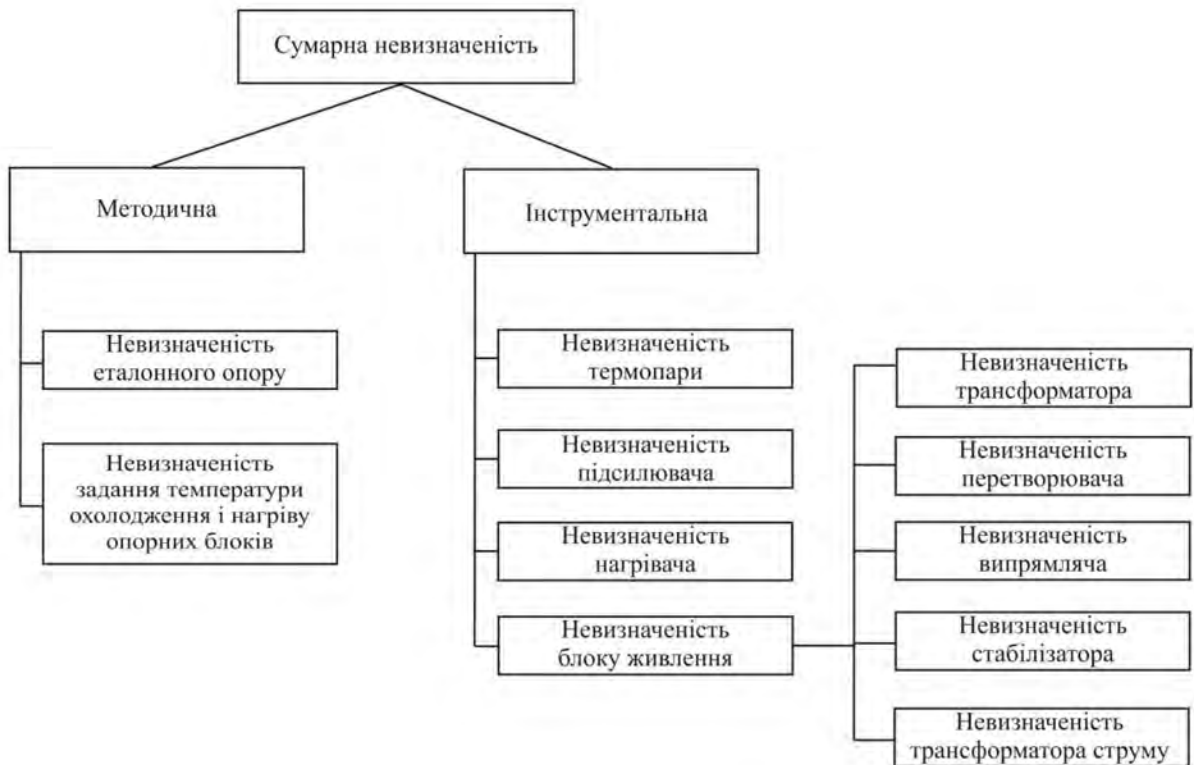


Рисунок 3.2 – Джерела невизначеностей для розробленого пристрою

Методичну невизначеність визначимо згідно

$$U_M = \sqrt{u_{et.on}^2 + u_{zd.tem}^2} \quad (3.17)$$

$$U_M = \sqrt{1,2^2 + 1,5^2} = 1,92.$$

Інструментальну невизначеність визначимо згідно

$$U_i = \sqrt{u_{n.m}^2 + u_n^2 + u_n^2 + u_{б.жс}^2}, \quad (3.18)$$

в свою чергу невизначеність блоку живлення  $u_{б.жс}$  буде складатися з таких складових

$$u_{б.жс} = \sqrt{u_{тр.}^2 + u_n^2 + u_{випр.}^2 + u_{ст.}^2 + u_{тр.стр.}^2} \quad (3.19)$$

$$u_{б.жс} = \sqrt{0,7^2 + 0,6^2 + 0,4^2 + 0,5^2 + 0,4^2} = 0,71\%$$

$$U_i = \sqrt{1^2 + 0,3^2 + 0,6^2 + 0,71^2} = 0,97\%.$$

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов праці

Основна мета заходів по охороні праці - ліквідація травматизму і професійних захворювань. Проведення заходів по підвищенню умов праці дає значний економічний ефект - підвищується продуктивність праці, знижуються затрати на відновлення втраченої працездатності.

Міри безпеки праці повинні передбачатися при проектуванні, будівництві, виготовленні і впровадженні в дію об'єктів і устаткування.

Всі заходи по охороні праці проводяться з метою захисту учасників трудового процесу від впливу шкідливих факторів, які характеризують умови його проведення.

Забезпечення безпечних і здорових умов праці на виробництві можливе тільки при строгій трудовій дисципліні всіх працюючих, точному виконанні ними правил, інструкцій по техніці безпеки. Крім знання технологій робітники повинні дотримуватись трудової дисципліни на робочому місці, виконувати свої обов'язки таким чином, щоб не допустити виникнення небезпеки і шкідливості, а також знати, що робити для їх ліквідації, якщо вони виникли.

Газова суміш (газ, конденсат, нафта, вода), що видобувається, пожежно і вибухонебезпечна, і при неправильній організації технологічного процесу або недотриманні певних вимог безпеки загоряється, горить, викликає вибухи. Тому видобувна промисловість повинна забезпечуватись всім необхідним для попередження вище сказаного.

Всі робітники проходять певні види інструктажів, здають екзамени на знання правил і вимог техніки безпеки, проводять практичні заняття по планах ліквідації аварії. Технологічний об'єкт оснащений вогнегасниками різних систем, звуковою і світловою сигналізацією при порушенні технологічного режиму і небезпечних ситуаціях. На установках об'єкту встановлені сигналізатори до вибухових компенсацій. У виробничих приміщеннях постійно

працює припливно-витяжна вентиляція. Всі апарати і обладнання заземляються для захисту від статичних розрядів.

Складність завдань, що стоять перед охороною праці, вимагають використання досягнень багатьох наукових дисциплін, що безпосередньо чи опосередковано зв'язані з задачами створення здорових та безпечних умов праці. В першу чергу це відноситься до соціально-правових наук, а також до досліджень в галузі наукової організації праці, технічної естетики, ергономіки, соціальної та інженерної психології. Так як головним об'єктом охорони праці є, звичайно, людина в процесі праці, то при розробці вимог виробничої санітарії використовують результати досліджень ряду медичних та біологічних дисциплін. Питання охорони праці також тісно пов'язані з розробкою заходів по попередженню пожеж та вибухів.

В процесі життя і виробничої діяльності людина неминує вносить в середовище, що її оточує, певні зміни. Вони стосуються як хімічного, біологічного складу середовища, так і його фізичних характеристик. Серед факторів, які можуть несприятливо впливати на здоров'я людини, розрізняють етіологічні, тобто причинні, що безпосередньо обумовлюють розвиток і вираженість патологічного процесу, і фактори ризику, які не є причиною захворювання, але сприяють, посилюють дію етіологічних факторів.

Створюють негативний вплив такі психофізичні фактори, як розумове перенапруження, перенапруження зорових і слухових аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження, які приводять до стомлення і зниження працездатності.

Під виробничою небезпекою розуміють можливість несприятливого впливу на організм працівників реальних умов праці. Система організаційних заходів і технічних засобів, що забезпечують відсутність небезпеки виробничого травматизму, названа технікою безпеки. Ускладнення функціональної структури діяльності в зв'язку з застосуванням електронно-обчислювальних систем, відео терміналів пред'являє підвищені вимоги до працівників, робота яких пов'язана з ЕОМ [31].

## **4.2 Забезпечення безпеки при роботі з вимірювальною системою**

При роботі з установкою, для запобігання нещасним випадкам слід користуватися таким правилами техніки безпеки.

Корпуси цифрових приладів, пускоприймальних пристроїв, повинні бути надійно заземлені.

В цілях безпеки експлуатаційну установку без заземлення не включати.

Монтаж і ремонт електрообладнання проводити згідно вимогам правил техніки безпеки електроустановок споживачів.

Ремонт, випробування і налагодження системи збору і обробки вимірювальної інформації проводити, відключивши її від 220В.

Перед початком роботи проводити візуальний огляд електроустановки, та змонтованих вимірювальних перетворювачів.

## **4.3 Забезпечення нормальних умов праці**

На робочому місці оператор перебуває під впливом таких шкідливих факторів

- недостатнє освітлення;
- шум працюючого обладнання;
- небезпека ураження електричним струмом;
- пожежна безпека.

Необхідно розробити засоби захисту від цих факторів. Оскільки передбачається робота оператора з персональним комп'ютером, то при виборі приміщення для обладнання операторської потрібно враховувати деякі особливості.

При виборі робочих місць в приміщеннях з ЕОМ необхідно враховувати, що вікна можуть давати відблиски на екранах дисплеїв і викликати осліпленість, особливо літом і в сонячні дні. Тому для розміщення робочих місць найбільш придатні з одnobічним розміщенням світлових отворів які обов'язково мають бути обладнані сонцезахисними пристроями. Площа

заскління не повинна перевищувати 25% від площі стіни з вікнами. Вікна повинні бути орієнтовані на північ, північ-захід або південь-схід. Необхідно забезпечити відповідне оформлення інтер'єру приміщення. Всі поверхні навколо оператора повинні мати невисокі коефіцієнти відбивання. Світлий блискучий одяг користувачів ЕОМ вкрай небажаний. Коефіцієнти відбивання 0,1 (підлога) до 0,6 (стеля) [32].

Розвитку втомлюваності оператора сприяють такі фактори:, як неправильна ергономічна організація робочого місця, нераціональні зони розміщення обладнання.

В приміщенні повинен бути встановлений мікроклімат, який відповідає вимогам ДСТУ-

Таблиця 4.1 - Оптимальні значення метеорологічних умов в робочих зонах виробничих приміщень [33]

Назва приміщення	Категорія важкості фізичних робіт	Період року	Температура °С	Відносна вологість %	Швидкість руху повітря м/с
Лабораторія	Легка 1б	Теплий	21-23	40-60	0,2
		Холодний	22-24	40-60	0,3

Для підтримання необхідного мікроклімату в приміщенні встановлюється пристрій опалювання та вентиляції, які відповідають вимогам СніП 2.04.05-86 та СН 245-71. В приміщенні використовують водяну систему опалення з нагрівними приладами підвіконних панелей.

При налагодженні електроустаткування необхідно дотримуватися правил техніки безпеки.

Також при обладнанні робочого місця потрібно не забувати про засоби індивідуального захисту, перелік яких наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Засоби індивідуального захисту працюючих

Шкідливий виробничий фактор	Засіб захисту	Технічні характеристики
Загроза ураження електричним струмом	Індивідуальні засоби	Діелектричні калоші, боти, рукавиці, монтерський інструмент з ізолюючими ручками, захисні заземлення і спецодяг.
Отруєння випарами хім. речовин	Захист внутрішніх органів	Протигази, респіратори.

#### 4.3.1 Розрахунок штучної вентиляції

Системи опалення та системи кондиціонування необхідно встановлювати так, щоб ні тепле, ні холодне повітря не направлялося на людей. На виробництві рекомендується створювати динамічний клімат з визначеними перепадами показників. Температура повітря на поверхні підлоги і на рівні голови не повинна відрізнятись більше, ніж на 5 градусів. В даній лабораторії передбачено припливно-витяжну вентиляцію [35].

Для розрахунку вентиляційних систем прийемо наступні розміри робочого приміщення:

- Довжина  $B = 7$  м;
- Ширина  $A = 3$  м;
- Висота  $H = 2,5$  м.

Відповідно об'єм приміщення рівний:

$$V_{np} = A \cdot B \cdot H \quad (4.1)$$

$$V_{np} = 7 \cdot 3 \cdot 2,5 = 52,5 \text{ м}^3$$

Необхідний об'єм повітря для поглинання надлишкового тепла визначаємо виходячи з рівняння теплового балансу:

$$L_{вент} \cdot c(t_{вих} - t_{прих}) \cdot \rho = 3600 \cdot \sum Q_{надл} \quad (4.2)$$

де  $Q_{\text{надл}}$  – надлишкове тепло (Вт),  $t_{\text{вих}}, t_{\text{прих}}$  – температура повітря, що виходить та приходить ( $t_{\text{прих}} = 18^{\circ}\text{C}$ ),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  - густина повітря ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) ( $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ );  $c$  - питома теплоємність повітря ( $c = 1,0056 \text{ кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ).

Температура повітря, що виходить визначається за формулою:

$$t_{\text{вих}} = t_{\text{рм}} + (H - 2) \cdot t \quad (4.3)$$

де  $t = 1 - 5$  градусів - збільшення температури на 1 м висоти приміщення;  $t_{\text{рм}}$  - температура на робочому місці ( $t_{\text{рм}} = 21^{\circ}\text{C}$ ).

$$t_{\text{вих}} = 21 + (2,5 - 2) \cdot 2 = 22^{\circ}\text{C}$$

Знаходимо надлишкове тепло в приміщенні за формулою:

$$\sum Q_{\text{надл}} = Q_{\text{надл1}} + Q_{\text{надл2}} + Q_{\text{надл3}} \quad (4.4)$$

де  $Q_{\text{надл1}}$  - надлишок тепла від електрообладнання і освітлення (Вт).

$$Q_{\text{надл1}} = E \cdot p \quad (4.5)$$

де  $E$  - коефіцієнт втрат електроенергії на тепловідвід ( $E = 0,55$  для освітлення);  $p$  - потужність обладнання,  $p = 500 \text{ Вт}$ .

$$Q_{\text{надл1}} = 0,55 \cdot 500 = 275 \text{ Вт}$$

$Q_{\text{надл2}}$  – поступлення тепла від сонячної радіації (Вт).

$$Q_{\text{надл2}} = m \cdot k \cdot Q_c \quad (4.6)$$

$Q_{\text{надл2}} = 0$ , оскільки в нашому приміщенні немає вікон.

$Q_{\text{надл3}}$  - тепловиділення від людей (Вт).

$$Q_{\text{надл3}} = n \cdot q \quad (4.7)$$

де  $q = 150 \text{ Вт}/\text{люд}$ , - енерговитрата для категорії 1б;  $n = 1$  - кількість людей.

$$Q_{\text{надл3}} = 1 \cdot 150 = 150 \text{ Вт}$$

$$\sum Q_{\text{надл}} = 275 + 0 + 150 = 425 \text{ Вт}$$

З рівняння теплового балансу випливає:

$$L_{\text{вент}} = \frac{3600 \cdot 425}{1006 \cdot 1,2 \cdot 4} = 316 \text{ м}^3$$

Оптимальним варіантом є кондиціонування повітря кондиціонером LG G24LHT, тобто автоматичне підтримання його стану в приміщенні у

відповідності з певними вимогами (задана температура, вологість, рух повітря) незалежно від зміни стану зовнішньої температури та умов в самому приміщенні.

#### **4.4 Забезпечення безпеки роботи з установкою для дослідження властивостей термоелектричних модулів**

Загальні вимоги безпеки при роботі з установкою:

1) Знімати кришку або виконувати ремонтні роботи ПЕОМ дозволяється тільки при вимкненому живленні.

2) Установка і корпус ПЕОМ повинні бути заземлена до загального контуру заземлення. Для підключення до мережі ПЕОМ і принтера повинні бути використані трьохполюсні розетки, які мають заземлення.

3) Проводити профілактичні і ремонтні роботи на установці, повітродувці дозволяється тільки за умови від'єднання їх від мережі живлення.

4) Перед перевіркою термоелектричного генератора слід перевірити його цілісність, цілісність електричної ізоляції його проводів.

5) До роботи на установці допускаються тільки особи, які ознайомлені з технікою безпеки і пройшли інструктаж на робочому місці.

Вимоги безпеки при роботі з ПЕОМ:

1) Відповідно до правил електробезпеки в службовому приміщенні повинен здійснюватись постійний контроль стану електропроводки, запобіжних щитів, шнурів, за допомогою яких включаються в електромережу комп'ютери, освітлювальні прилади, інші електроприлади.

2) Залежно від категорії приміщення необхідно вжити певних заходів, що забезпечують достатню електробезпеку при експлуатації та ремонті електроустаткування.

3) Приміщення ПЦ, їх розміри (площа, об'єм) повинні в першу чергу відповідати кількості працюючих і розміщеному в них комплект технічних засобів. У них передбачаються відповідні параметри температури, освітлення, чистоти повітря, забезпечують ізоляцію, від виробничих шумів і т.п. Для

забезпечення нормальних умов праці санітарні норми СН 245-71 встановлюють на одного працюючого, обсяг виробничого приміщення не менше  $20 \text{ м}^3$ , площа приміщення вигороджених стінами або глухими перегородками не менше  $4,5 \text{ м}^2$ , мінімальна площа  $6 \text{ м}^2$ .

4) Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документу повинна бути 300-500 лк, також допускається встановлення світильників місцевого освітлення для підсвічування документів, але з такою умовою, щоб воно не створювало відблисків на поверхні екрану і не збільшувало освітленість екрана більш ніж на 300 лк.

5) Електробезпека будівель та приміщень, де розміщені робочі місця операторів, повинна відповідати вимогам Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98).

6) За способом захисту людини від ураження електричним струмом ЕОМ з ВДТ і ПП мають відповідати I класу захисту згідно з ГОСТ 25861-83 або мають бути заземлені відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01.

#### **4.5 Пожежна безпека**

Пожежі на виробництві - це велика небезпека для робітників, крім того вони можуть принести великі матеріальні втрати. Безпека при пожежах, а також скорочення можливої шкоди від них досягається забезпеченням пожежної безпеки виробничих об'єктів.

Під пожежною безпекою розуміють такий стан об'єкту при якому з найбільшою вірогідністю виключається можливість виникнення пожежі або у випадку її виникнення забезпечують найбільш ефективний захист людей від небезпечних і шкідливих факторів пожежі і збереження майна та матеріальних цінностей [34].

Система попередження пожеж розробляється по кожному конкретному випадку із розрахунку, що нормативна вірогідність виникнення пожеж приймається рівною  $10^{-6}$  в рік з розрахунку на один окремий пожежонебезпечний вузол (елемент).

Пожежна безпека забезпечується правильним вибором ступені вогнестійкості об'єкту і границею вогнестійкості окремих елементів і конструкцій; обмеженням поширення вогню в випадках виникнення осередку пожежі; забезпеченням швидкої і безпечної евакуації людей; застосуванням засобів пожежної сигналізації, повідомленням про пожежі і гасіння пожеж; організація пожежної варти об'єктів.

Відповідно СНіП будівельні матеріали поділяються на матеріали, які горять, та матеріали які не горять. Як правило конструкції будівель промислових підприємств, а також житлові приміщення виконуються з матеріалів, які не горять (цегла, бетон, скло, сталь і інші).

До причин виникнення пожеж відносяться:

- розряди атмосферної електрики (блискавки);
- коротке замикання, що виникає через недопустиме перегрівання провідників;
- використання несправного електроустаткування і опалювальних пристроїв, залишених без нагляду;
- самозапалення твердого мінерального палива; куріння в заборонених місцях.

Також не можна залишати на робочому місці легкозаймисті речовини, бо випадкова іскра, яка попаде в них, може викликати пожежу. Ємності з бензином, маслом, соляркою, балони зі зрідженим газом необхідно ставити у спеціально відведені місця.

Щоб запобігти виникненню пожеж слід взяти комплекс захисних мір:

1. Організаційні (правильне утримання приміщень, протипожежний інструктаж, видання наказів з питань пожежної безпеки).
2. Технічні (дотримання протипожежних правил, норм при встановленні електроустаткування, опалення, вентиляції, освітлення).
3. Режимні (заборона куріння у невстановлених місцях, проведення пожежонебезпечних робіт в приміщеннях, де проведено монтаж елементів ІВС безпосередньо на технологічному трубопроводі).

4. Експлуатаційні (своєчасний профілактичний огляд приміщень, ремонт устаткування).

При пожежі електроустаткування в приміщеннях використовуються вуглекислотні вогнегасники типу ВВ-2,5, ВВ-8 ємністю 2,5 і 8 літрів, які призначені для гасіння пожеж всіх видів. Для гасіння твердих речовин, що горять, легкозаймистих речовин з відкритою поверхнею використовують пінні вогнегасники типу ВХП 10. Також невелику ділянку пожежі можна локалізувати методом пониження доступу кисню в осередок вогню до 16%, накинувши на нього азбестове полотно або грубу шерстяну тканину (кошму).

## ВИСНОВКИ

Одним із основних завдань даної бакалаврської роботи було забезпечення розробників і інженерів які хочуть використати термоелектричні модулі у своїх конструкціях методикою оцінки продуктивності певного термоелектричного модуля. Метою роботи послужила невідповідність характеристик та даних наданих різними виробниками термоелектричних модулів, що перешкоджало б розробникам які хотіли порівнювати модулі різних виробників.

З огляду на мету роботи було проведено аналіз літературних джерел і визначено найкращі і ефективні методи для визначення і дослідження параметрів термоелектричних генераторів. Спираючись на зроблений огляд методів було розроблено конструкцію вимірювальної комірки для дослідження параметрів термоелектричних генераторів, а також електричну схему установки для вимірювання параметрів.

На основі теоретичного розгляду визначив, які необхідно складові частини для роботи приладу, а також складено структурну схему.

Було здійснено аналіз небезпечних факторів при проведенні досліджень і розроблено заходи щодо охорони праці.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА**

1. S. Kim et al., "Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas," *Journal of Electronic Materials*, vol. 40, no. 5, pp. 778-784, 2011.
2. V. V. Gusev, A. A. Pustovalov, N. N. Rybkin, L. I. Anatyshuk, B. N. Demchuk, and I. Y. Ludchak, "Milliwatt-power radioisotope thermoelectric generator (RTG) based on plutonium-238," *Journal of Electronic Materials*, vol. 40, no. 5, pp. 807-811, May 2011.
3. D. Kraemer et al., "High performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration," *Nature*, vol. 10, no. 7, pp. 532-537, July 2011.
4. K. McEnaney, D. Kraemer, and Z. and Chen, G. Ren, "Modeling of concentrating solar thermoelectric generators," *Journal of Applied Physics*, 2011.
5. A. Attar, H. Lee, and S. Weera, "Optimal design of automotive thermoelectric air conditioner (TEAC)," *Journal of Electronic Materials*, vol. 43, no. 2, pp. 1-9, January 2014.
6. L. B. Ershova and G. G. Gromov, "Optimal thermoelectric cooling in laser diode sub-assemblies," RMT Ltd., Moscow, 2010.
7. G. J. Snyder, M. Soto, R. Alley, D. Koester, and B. Conner, "Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers," in *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, Dallas, 2006, pp. 135-15.
8. T. J. Seebeck, *Magnetic polarization of metals and minerals*, *Abhandlungen der Koniglichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* ed. Berlin, Germany, 1822.
9. G. S. Nolas, J. Sharp, and H. J. Goldsmid, *Thermoelectrics*. Heidelberg, Germany: Springer, 2001.
10. H. Lee, *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
11. G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," *Nature*, vol. 7, no. 2, pp. 105-114, February 2008.

12. H. Alam and S. Ramakrishna, "A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials," *Nano Energy*, vol. 2, pp. 190-212, October 2012.
13. Thermoelectrics California Institute of Technology. [Online], <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/index.html>
14. B. Poudel et al., "High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys," *Science*, vol. 320, no. 5876, pp. 634-638, May 2008.
15. H. Lee, "The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers," *Energy*, vol. 56, pp. 61-69, 2013.
16. E. J. Sandoz-Rosado, "Investigation and Development of Advanced Models of Thermoelectric Generators for Power Generation Applications," Rochester Institute of Technology, Rochester, Master Thesis UMI Number: 1469748, 2009.
17. F. L. Tan and S. C. Fok, "Methodology on sizing and selecting thermoelectric cooler from different TEC manufacturers in cooling system design," *Energy Conversion & Management*, vol. 49, pp. 1715-1723, January 2008.
18. H. Lee, A. Attar, and S. Weera, "Performance evaluation of commercial thermoelectric modules using effective material properties," in 2014 International Conference on Thermoelectrics, Nashville, 2014, pp. 1-5.
19. J. D'Angelo and T. Hogan, "Long term thermoelectric module testing system," *Review of Scientific Instruments*, vol. 80, pp. 1-3, October 2009.
20. J. Vazquez, R. Palcios, M. A. Sanz-Bobi, and A. Arenas, "Test bench for measuring the electrical properties of commercial thermoelectric modules," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 589-593.
21. L. Rauscher et al., "New approach for highly accurate efficiency determination of thermoelectric generator," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 508-511.
22. L. Rauscher, S. Fujimoto, H. T. Kaibe, and S. Sano, "Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow," *Measurement Science and Technology*, vol. 16, pp. 1054-1060, March 2005.

23. L. I. Anatyshuk and M. V. Havrylyuk, "Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules," *Journal of Electronic Materials*, vol. 40, no. 5, pp. 1292-1297, March 2011.
24. H. Takazawa et al., "Efficiency measurement of thermoelectric modules operating in the temperature difference of up to 550K," in *2006 International Conference on Thermoelectrics*, 2006, pp. 189-192.
25. E. J. Sandoz-Rosado and R. J. Stevens, "Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation," *Journal of Electronic Materials*, vol. 38, no. 7, pp. 1239-1244, 2009.
26. K. Chen and S. B. Gwilliam, "An analysis of the heat transfer rate and efficiency of TE (thermoelectric) systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 20, pp. 399-417, 1996.
27. B. J. Huang, C. J. Chin, and C. L. Duang, "A design method of thermoelectric cooler," *International Journal of Refrigeration*, vol. 23, pp. 208-218, 2000.
28. T. Leephakpreeda, "Experimental determination of the thermoelectric-module parameters and modeling for cooling/heating control design," *Experimental Techniques*, vol. 36, pp. 13-20, 2012.
29. Y. Kraftmakher, "Simple experiments with a thermoelectric module," *European Journal of Physics*, vol. 26, pp. 959-967, 2005.
30. A. Y. Faraji and A. Akbarzadeh, "Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules," *Journal of Electronic Materials*, vol. 42, no. 7, pp. 1535-1541, November 2013.
31. Безпека життєдіяльності: підручник. / [О. І. Запорожець, Б. Д. Халмурадов, В. І. Применю та ін.] - К.: «Центр учбової літератури», 2013.-448 с.
32. ДБН В.2.5-28:2018 Природне та штучне освітлення.
33. ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва

34. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги

35. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид,- К.: Центр учбової літератури, 2011. - 280 с.