

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка термоелектричного  
ХОЛОДИЛЬНИКА на базі каскадного  
елемента Пельтьє

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

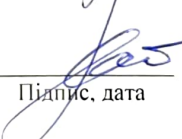
Шифр МРМА 22.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
3 курсу група ЕТм-21-1

  
Підпис

АНТОНЮК М.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

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

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Льукhin С.С.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

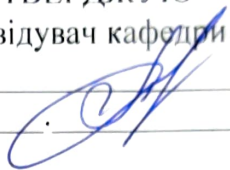
д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

\_\_\_\_\_ 2022 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ФІТН  
Кафедра МАЕЕС  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань Електроніка і механіка  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Спеціалізація Та електромеханіка  
Освітня програма Електроенергетика механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри МАЕЕС



2020р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Антоніона Максима Володимирівна

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка термодендричного коловолокна на базі керамічного елемента Пельте

керівник роботи Скиба М. Б, д.т.н, професор

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

Затверджено наказом ректора університету від 1 07 2022 р. № 83

2. Строк подання студентом роботи на кафедру

3. Вихідні дані до роботи Технологічні параметри роботи термодендричного коловолокна

Примітки - аналіз з термодендричним елементам

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

1. Аналіз термодендричних елементів та устаткування для отримання коловолокна з фот. приміток елемента

2. Розробка термодендричного коловолокна на базі керамічного елемента Пельте

3. Розробка конструкції термодендричного коловолокна

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

1. Малюнок та аналіз технології термодендричного коловолокна

2. Малюнок пристроїв-аналогів, 3. Схема функціонування термодендричного коловолокна, 4. Схема керування термодендричним елементом, 5. Графіки залежностей

родини термодендричних елементів, 6. Схема керування коловолокном, 7. Схема конструкції керамічного елемента Пельте

8. Заголовок виміру термодендричного коловолокна.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз термометричних даних та улаштування для отримання калоричного термометричного ефекту	1.09 - 1.10	
2. Розробка термометричного калориметра на базі каскадної системи Пельтьє	1.10 - 1.11	
3. Розробка конструкції термометричного калориметра на базі каскадної системи Пельтьє.	1.11 - 1.12	

Студент

 Підпис  
 Ніколаєв М.В. Ініціали, прізвище

Керівник роботи

 Підпис  
 Смига М.Б. Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові Антонюк Максим Володимирович

2. Тема магістерської роботи Розробка термосенсорного каскадного елемента на базі каскадного елемента Пельтье

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 78

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: \_\_\_\_\_

1. Аналіз термосенсорних елементів та устаткування для отримання сигналу з допомогою термосенсорного елемента

2. Розробка термосенсорного каскадного елемента на базі каскадного елемента Пельтье

3. Розробка конструкції термосенсорного каскадного елемента на базі каскадного елемента Пельтье

Підпис студента 

" 20 " 12 2022 р.


## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол №3 від 20 " 12 2022 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4,5/5

Рекомендації ЕК впровадити у виробництво

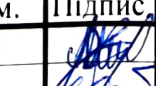

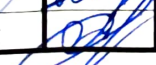

Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар 

" 23 " 12 2022 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналіз термоелектричних явищ та устаткування для отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту.....	7
1.1 Теоретичні передумови отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту .....	7
1.2. Аналіз інформаційних джерел термоелектричних холодильних агрегатів	16
1.3 Висновки до розділу Ж.....	29
2 Розробка термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє .....	30
2.1 Теоретичні передумови розробки термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє .....	30
2.2 Розрахунок термоелектричних однокаскадних та багатокаскадних модулів Пельтьє .....	41
2.3 Розрахунок термоелектричного модуля в режимі холодопродуктивності та максимального холодильного коефіцієнта.....	43
2.4 Висновки до розділу .....	52
3 Розробка конструкції термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє.....	53
3.1 Розробка функціональної схеми роботи термоелектричного холодильника.....	53
3.2 Розробка електричної схеми термоелектричного холодильника.....	54

МРМА 22.00.00.000 ПЗ				
м.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
виконав		Антонюк		
перевір.		Скиба		
контр.		Пундик		
затвер.		Поліщук		
Розробка термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє			Літера	Аркуш
			у	4
ХНУ. гр. ЕТМ-21				

## ВСТУП

Актуальність магістерської розробки. Аналіз існуючих приладів теплового термоелектричного охолодження показав, що в основному усі пристрої містять холодильник і термоелектричну батарею з холодними спаями, прилеглими до стінок холодильника, гарячі спаї, які оснащені вентилятором і радіатором.

Однак у всіх відомих термоелектричних холодильниках на охолодження камери працює тільки одна термобатарея, а додаткова термобатарея малоефективна, недостатня теплоізоляція між теплообмінниками, малоефективний тепловідвід від гарячих спаїв і, як наслідок, низька холодопродуктивність та велике споживання електроенергії. Всі вищеперераховані фактори негативно значно знижують холодильний коефіцієнт холодильного агрегату, знижують холодопродуктивність нашого холодильника.

Одним з відомих термоелектричних холодильників на охолодження камери є тільки одна тепла термоелектрична батарея, а батарея охолодження додаткова малоефективна, теплоізоляція між теплообмінниками неякісна, низький ККД теплоізоляції теплообмінниками, неефективне тепловідведення від гарячих спаїв в результаті цього низька холодопродуктивність та значне споживання електроенергії. Всі ці фактори значно знижують холодильний коефіцієнт термоелектричного холодильника, знижують його холодопродуктивність.

Мета магістерської розробки. Вивчення теоретичних передумов отримання холоду за допомогою термоелектричного ефекту, визначення оптимальних параметрів роботи термоелектричної батареї у різних режимах роботи, розробка додаткової системи охолодження та схеми керування її роботою.

Розробка термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє для підвищення холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта, покращення теплоізоляції між теплообмінниками та визначення оптимальної товщини теплоізоляції холодильника, підвищення ефективності тепловідведення від гарячих спаїв термоелектричних батарей.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

# 1 АНАЛІЗ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ЯВИЩ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХОЛОДУ ПРИ ДОПОМОЗІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ

## 1.1 Теоретичні передумови отримання холоду при допомозі термоелектричного ефекту

Термоелектричне перетворення енергії, як метод прямого перетворення теплової енергії в електричну, засноване на електронних переходах, що виникають у твердих тілах (ефект Зеебека, Пельтьє, Томсона тощо).

Виняткові властивості термоелектричних джерел енергії, це такі як відсутність рухомих частин, перспектива використання низькопотенційної теплової енергії, абсолютна екологічна чистота та особлива зручність в керуванні, визначили незаперечливі переваги належного використання термоелектричного охолодження в промисловості та побуті.

Ефект термоелектричного охолодження був вперше відкритий та описаний Пельтьє. Це явище полягає в тому, що при протіканні електричного струму через електричний ланцюг, що складається з двох різнорідних напівпровідників, у місці з'єднання напівпровідників поглинається чи виділяється певна кількість теплової енергії. Тобто місце спаю у ланцюзі охолоджується або нагрівається, залежно від напрямку струму.

Наступні дослідження пояснювали природу явища Пельтьє і показали, що кількість поглиненого, в місці з'єднання, тепла пропорційна силі струму, часу його протікання у ланцюзі та коефіцієнту добротності, що залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу провідників з яких складається ланцюг. При цьому, роль речовини, що відповідає за отримання холоду в термоелектричній холодильній машині, відіграє електронно-дірковий газ напівпровідників. Незважаючи на те, що явище термоелектричного ефекту було відкрито давно, широке його розповсюдження та практичне використання відбулось за останні кілька десятиліть та зараз набуває актуального значення в умовах розвитку альтернативних засобів

									Арк.
									7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

отримання енергії та холоду.

Відновлення інтересу до застосування термоелектричного охолодження також пов'язане із екологічними проблемами, що виникають при використанні традиційних методів отримання холоду (руйнування озонового шару, парниковий ефект тощо). Термоелектричні холодильники зовсім безпечні з екологічної точки зору, не мають зношуваних парт тертя; безшумні у роботі, характеризуються відсутністю вібрацій, здатні працювати тривалий час.

Термоелектричні перетворювачі енергії мають інакші переваги:

- можливість охолодження та нагрівання, залежно від технічних параметрів;
- надійність компонентів, що виробляють холод;
- можливість швидкого охолодження при застосуванні новітніх термоелектричних модулів;
- висока точність регулювання температури та можливість термостатування напрямом зміни струму живлення (величини);
- незалежність параметрів термоелектричних модулів від фізичних впливів на них та дуже мала чутливість до механічних навантажень;
- відсутність необхідності в складному технічному обслуговуванні.

У роботі термоелектричної батареї можна спостерігати одночасно три термоелектричні явища це: ефект Пельт'є, явище Томпсона та явище Зеебека,

Суть явища Зеебека - що в ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різних матеріалів, коли вільні кінці та місце контакту мають різну температуру, то на вільних кінцях виникає напруга, або термоелектрорушійна сила (термоЕРС). У такому випадку ланцюг складається з двох різнорідних матеріалів, до прикладу А та Б, які утворюють термоелемент або термопару. Величина напруги (термоЕРС), що виникає на вільних кінцях, залежить від фізичних властивостей матеріалів А та Б та градієнту температур спаю (контактів) та вільних кінців. Це твердження можна виразити формулою:

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

$$E = \alpha_{1,2}(T_2 - T_x) \quad (1.1)$$

де  $E$  - величина напруги (термоЕРС), мкВ;  $\alpha$  - коефіцієнт термоЕРС, рівний різниці потенціалів на  $1^\circ\text{C}$  різниці температур між холодним та гарячим спаєм;  $T_2, T_x$  - відповідно температура гарячого і холодного спаїв (спаю та вільних кінців).

Явище Томсона заключається у тому, що якщо уздовж напівпровідника (провідника) існує градієнт температур, то при проходженні через провідник постійного струму, в його об'ємі, крім теплоти Джоуля, виділяється чи поглинається, деяка кількість тепла, що залежить від напрямку струму.

$$Q_\tau = \tau(T - T_0)I. \quad (1.2)$$

де  $\tau$  - коефіцієнт Томсона;  $I$  - величина постійного електричного струму.

Суть ефекту Пельт'є полягає в тому, що при проходженні постійного струму через термоелемент, на одному боці буде виділятися, а на другому буде поглинатися певна кількість тепла, залежно від напрямку сили струму на холодному спаї термоелемента поглинається кількість тепла:

$$Q_n = P \cdot I \quad (1.3)$$

де  $P$  - коефіцієнт Пельт'є.

Коефіцієнти Пельт'є та Зеєбека зв'язані у співвідношенні:

$$P = \alpha_{1,2}T_0 = (\alpha_1 - \alpha_2)T_0, \quad (1.4)$$

де  $\alpha_{1,2}$  - коефіцієнти термоЕРС, що залежить від матеріалу вільних кінців термоелементів.

						Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Слід зауважити, що предметний зміст термоелектричних явищ досить складна. Він пов'язаний з різною атомарною будовою речовин та різними умовами проходження через них величини електричного струму.

У будь-якому термоелектричному охолоджуючому приладі лежить елементарна термобатарея, що має дві з'єднані напівпровідникові гілки (рис.1.1), одна з яких вбачає електронну ( $n$ ) - інша дірчасту ( $p$ ) проникність.

При проходженні крізь термоелемент постійного електричного струму, в певному напрямі, між пластинами комутаційними 1 і 2, що створюють спаї термобатареї, появляється різниця температур, що обумовлюється виділенням (на спаї 1) та вбиранням (на спаї 2) теплоти Пельть'є. При відповідному струмі та відповідному охолодженні спаю 2 температура спаю 1 знизиться. Величина пониження температури спаю 2, залежить від теплового навантаження на ньому. Це навантаження складається: із теплового притоку від навколишнього середовища, що охолоджується; тепла, що надходить від спаю 1, що обумовляється теплопровідністю вільних кінців термоелемента; теплоти Джоуля, що виділяється в кінцях термоелемента при проходженні через них струму (рис.1.1).

Визначальний вплив на роботу термоелемента робить теплота Джоуля. Дійсно, якщо поглинання теплоти Пельть'є, пропорційно першому ступеню сили струму, тобто,

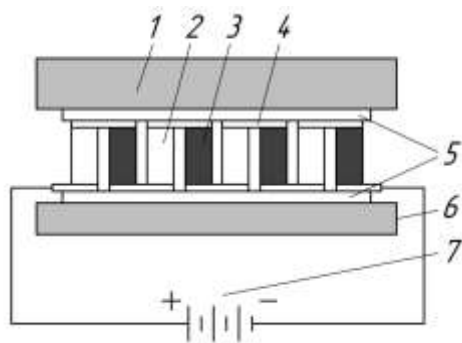
$$-Q_{\Pi} = P \cdot I .$$

Виділення теплоти Джоуля, пропорційно квадрату сили струму на опір термоелемента, тобто вона задлежить від матеріалу, з якого складається термоелемент.

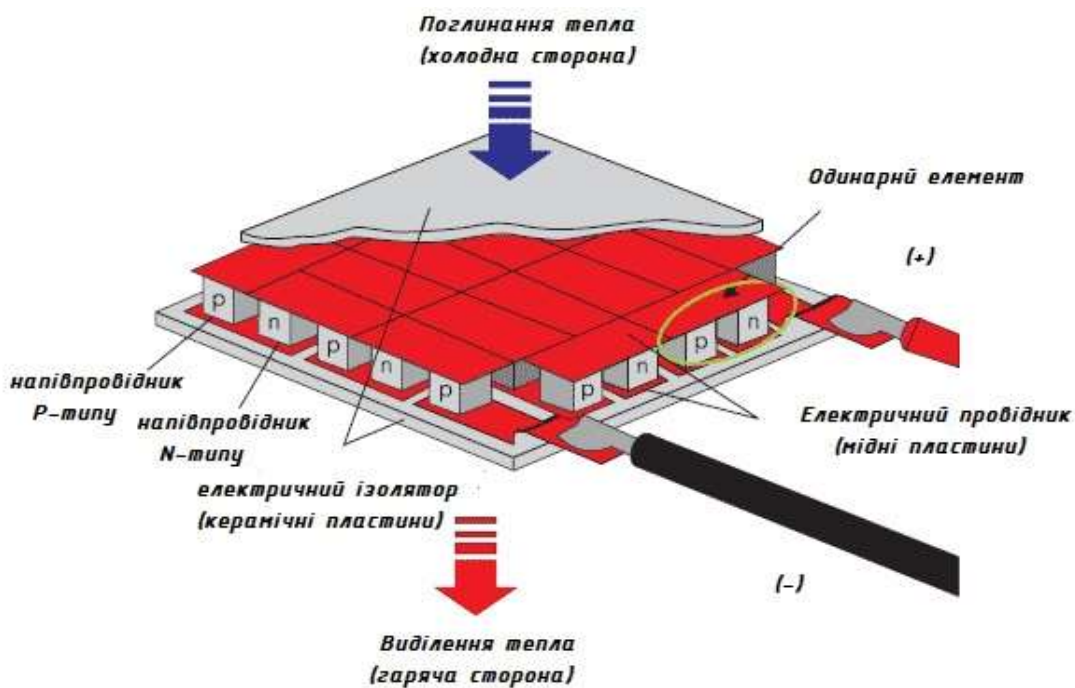
$$+ Q_{Дж} = I^2 R \quad (1.5)$$

Формула показує, що близько половини теплоти Джоуля, що виділяється припадає на холодний спай термоелемента, що значно зменшує ефект охолодження.

						Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



а



б

а - будова термоелектричного елемента Пельтьє; б – будова типового термоелектромодуля; 1 - об'єкт охолодження; 2, 3 - напівпровідники різного типу; 4 - електропровідники; 5 - електроізолятор;  
 б - нагрітий елемент; 7 - джерело живлення

Рисунок 1.1 - Схема елементарного термоелемента

На рисунку 1.2 приведена залежність тепла, що припадає на холодний спай термоелемента за рахунок ефекту Джоуля ( $Q_{дж}$ ) та відведеного від спаю за рахунок ефекту Пельть'є ( $Q_{пел}$ ) від величини струму, що живить термоелемент.

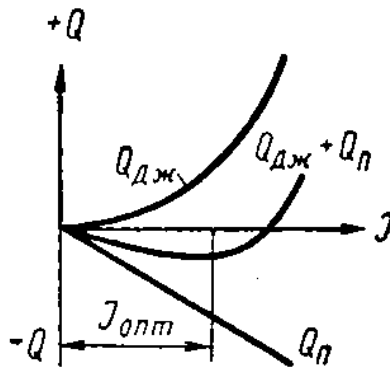


Рисунок – 1.2. Кількість теплоти Джоуля ( $Q_{дж}$ ) і Пельтьє ( $Q_{п}$ ), що виділяється на холодному спаї термоелемента в залежності від струму ( $I$ )

Оскільки обидва ефекти присутні в одному -холодному спаї, то складаючи їх, отримаємо результуючу криву, що характеризує тепловий баланс термоелемента при різних значеннях постійного струму.

Результуюча крива має мінімум, що відповідає оптимальному струму  $I_{опт}$ , при якому досягається граничне зниження температури на холодному спаї термоелемента. Завдяки пологому мінімуму результуючої кривої, зміна сила струму плавно впливає на максимальне охолодження, що створюється термоелементом. Втім помітне перевищення значення сили струму у термоелементі, над оптимальним - призводить до зменшення ефекту охолодження. Тобто значення теплоти Джоуля переважає над теплою Пельтьє, відповідно охолодження спаю перейде у нагрів.

Для знаходження величини оптимального струму приведено вираз для холодопродуктивності термоелемента, що складається із теплоти Джоуля та теплоти Пельтьє, що поглинаються та виділяється на холодному спаї термоелемента за час проходження струму по елементу:

$$Q_0 = P \cdot I - \frac{1}{2} I^2 R \quad (1.6)$$

де  $\Pi$ - коефіцієнт Пельт'є термоелемента;  $R$  - опір термоелемента.

Диференціюючи (1.6) по струмові та прирівнюючи до нуля, знаходимо значення оптимальної сили струму  $I_{opt}$ .

$$\frac{dQ_0}{dI} = \frac{d}{dI}(\Pi I - 0,5I^2R) = \Pi - I_{opt}R = 0; I_{opt} = \frac{\Pi}{R}. \quad (1.7)$$

Підставивши значення  $I_{opt}$  у вираз (1.6), знайдемо максимальне значення холодопродуктивності  $Q_{0max}$ .

$$Q_{0max} = \Pi \frac{\Pi}{R} - \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R^2} R = \frac{\Pi^2}{R} - \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R} = \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R} \quad (1.8)$$

де  $Q_{0max}$  - максимальна кількість тепла, що відбирається холодними спаями з навколишнього середовища (холодопродуктивність).

З формули 1.8 випливає, що чим менший опір термоелемента  $R$ , тим більше кількість тепла  $Q_{0max}$ , яке може поглинатись на холодному спаї, тобто тим більша його холодопродуктивність.

Омічний опір  $R$  термоелемента визначається за формулою. Він залежить від матеріалу термоелемента, площі поперечного перерізу та довжини термоелемента.

$$R = l \left( \frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right) \quad (1.9)$$

де  $l$  - довжина термоелемента;  $S_1$  та  $S_2$  – відповідно площі поперечного перетину гілок термоелемента;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  - питомі опори матеріалу напівпровідників з яких складається термоелемент.

Омічний опір термоелемента  $R$  можна зменшити за рахунок збільшення перетину або зменшення довжини гілок. Однак при збільшенні  $S$  і зменшенні  $l$ , значно зростає теплопровідність термоелемента та подток тепла по його гілках.

								Арк.
								13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				

Відповідно ці величини  $S$  та  $l$  мають оптимальні значення, які визначаються шляхом підбору експериментальному шляхом.

Визначимо умови за яких термоелемент виробляє максимальне пониження температури.

Теплота, що поглинається на холодному спаї термоелементом рівна тепловому навантаженню, яке складається з теплопритоку від гарячих спаїв термоелемента за рахунок теплопровідності напівпровідників  $Q_x$  і теплового притоку на холодний спай з навколишнього середовища  $Q_0$ .

$$Q = Q_x + Q_0 \quad (1.10)$$

Гранично низька температура холодного спаю буде досягнута при його теплоізоляції від навколишнього середовища, тобто  $Q_0 = 0$ .

З урахуванням чого, запишем,

$$Q = Q_x = X(T_2 - T_x), \quad (1.11)$$

або

$$T_2 - T_x = \frac{Q}{\varepsilon}.$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт теплопровідності термоелемента.

$$\varepsilon = \frac{1}{l}(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2), \quad (1.12)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  - питома теплопровідність матеріалів для гілок термоелемента.

Підставивши значення  $Q_{0\max}$  з (1.8) у вираз (1.11) знаходимо:

$$(T_2 - T_x)_{\max} = \frac{Q_{0\max}}{\varepsilon} = \frac{P^2}{2R\varepsilon} \quad (1.13)$$

Підставляючи у формулу 1.13 значення для  $R$  та  $\varepsilon$  із формул (1.9) та (1.12) та враховуючи, що,

$$P = (\alpha_1 - \alpha_2)T_0, \quad (1.14)$$

Отримаємо вираз для різниці температур для холодного та гарячого спай термо-батареї:

$$(T - T_0)_{\max} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T_0^2}{2(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) \left( \frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right)} = Z \frac{T_0^2}{2} \quad (1.15)$$

де  $Z = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) \left( \frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right)}$  - характеристика ефективності термоелементів (добротність термоелементів).

Вираз (1.15) показує, що максимальне пониження температури визначається параметрами матеріалів термоелементів, температурою холодного спаю  $T_x$  і співвідношенням перетинів гілок  $\frac{S_2}{S_1}$ .

Обчислення показують, що величина добротності  $Z$  досягає максимального значення при співвідношенні гілок термоелемента:

$$\frac{S_2}{S_1} = \sqrt{\frac{\lambda_1 \rho_1}{\lambda_2 \rho_2}} \quad (1.16)$$

При розгляді умов, в яких термоелемент забезпечує максимальне зниження температури, було зроблене припущення, що теплове навантаження на холодний спай - відсутнє. Однак, в реальних умовах між холодними спаями термо-батареї та навколишнім середовищем існує теплообмін. Величина його визначається призначенням та конструкцією термоохолоджуючого приладу. Термоелектрична

батарея повинна відводити деяку кількість тепла  $Q_0$ , що надходить на її холодні спаї від охолоджуваного об'єкту. Важливим параметром, що характеризує ефективність роботи термоелектричної батареї (елемента) є холодильний коефіцієнт  $\varepsilon$ . Він визначається відношенням кількості тепла  $Q_0$ , що відводиться за одиницю часу від термобатареї, до витраченої електроенергії  $W$ .

Підставляючи значення  $Q_0$  та  $W$  в формулу 1.17 одержуємо новий вираз для визначення холодильного коефіцієнта:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)T_x I - \frac{1}{2}I^2 R - \varepsilon(T_2 - T_x)}{I^2 R + (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_x)I}. \quad (1.18)$$

Слід зазначити, що холодильний коефіцієнт залежить від різниці температур  $T_2 - T_x$ , що створюється термоелектричним елементом, сили струму  $I$  та величиною добротності елемента  $Z$ . З виразу (1.18) випливає, що із збільшенням перепаду температур холодильний коефіцієнт термобатареї зменшується. Тому застосовувати термоелементи доцільно при незначному перепаді температур. При  $T_2 - T_x$  більше чи рівне  $15^\circ\text{C}$ , холодильний коефіцієнт термобатареї може перевищити холодильний коефіцієнт холодильника компресійного.

## 1.2. Аналіз інформаційних джерел термоелектричних холодильних агрегатів.

Відомі термоелектричні холодильники, в яких охолодження робочих камер здійснюється при допомозі термоелектричних блоків на основі модулів Пельтьє. Відбирання тепла від гарячих спаїв цих пристроях здійснюється, переважно при допомозі повітряних вентиляторів та рідинних теплообмінників. Пристрій складається з холодильної камери, яка контактує з термоелектричним блоком, що теплоізований від навколишнього середовища. Його теплові радіатори, у свою чергу, охолоджуються потоком навколишнього повітря, що створюється електричними вентиляторам.

Такі холодильники характеризуються значним споживанням електроенергії, і не дозволяють виконувати інші функції, такі як очищення або зволоження повітря в приміщеннях, в яких вони знаходяться. Пропонований термоелектричний побутовий холодильник, на основі зовнішньої захисної оболонки, ізольованої холодильної камери та термоелектричного блоку охолодження, холодна сторона якого, термічно з'єднана з радіатором холодної камери, а гаряча – із радіатором за допомогою вентилятора, що міститься в потоці повітря, очищувачі або зволожувачі навколишнього повітря. [1].

Цей пристрій забезпечує нове рішення для термоелектричних побутових холодильників на основі зовнішньої захисної оболонки, ізольованої холодильної камери та термоелектричної холодильної установки. Радіатор охолодження вентилятора містить ефект повітряного потоку в потоку для очищення або зволоження навколишнього повітря [1].

Промислове використання приладу не вимагає спеціальних технологій і матеріалів, і може бути реалізовано на діючих підприємствах приладобудівного напрямку. На рисунках 1.3, 1.4, 1.5 наведені схеми пропонованих побутових термоелектричних холодильників, наприклад конструкції холодильників з окремими очисниками навколишнього повітря (рис. 1.3) або зволожувачами (рис. 1.4) і конструкції холодильників, що містять як очисники, так і зволожувачі (рис. 1.5).

Перший варіант цього пристрою (рис. 1.3) складається із зовнішнього захисного металевого чи пластикового кожуха 1, теплозахисного шару з пінополіуретану 2, який теплоізолює холодильну камеру 3 із нержавіючої сталі. Камера термічно з'єднана з охолоджуючим радіатором 4 термоелектричного блоку 5 на основі модуля Пельтьє, до прикладу з кристала Bi-Te-Se-Sb, який містить тепловідвідний тепловідвід 6. Радіатор 6 охолоджується повітрям електровентилятором 7. У нижній частині ребра охолодження 4 в холодильній камері 3 встановлена пластикова пластина 8, а на пластині 8 встановлена трубка для збору конденсату. На задній стінці захисного кожуха 1 в обсязі теплоізоляційного шару 2, виконано безліч повітровідвідних каналів 9 для відводу повітряного потоку,

									Арк.
									17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

створюваного вентилятором 7, що обдуває ребра охолодження 6. Електростатичний або гідравлічний повітроочисник 10, розташований на місці вентилятора 7 в межах його повітряного потоку [1].

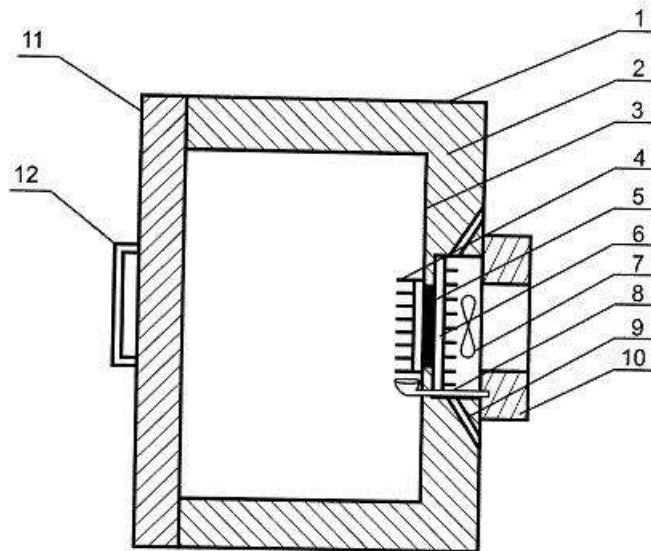


Рисунок 1.3 - Конструкція холодильника із очищувачем повітря

Другий запропонований варіант пристрою (рис. 1.4) складається із зовнішнього захисного металевого чи пластикового кожуха 1, теплозахисного шару 2 з пінополіуретану, який ізолює холодильну камеру 3 з нержавіючої сталі. Камера термічно об'єднана із радіатором охолодження 4 термоелектричного блоку 5 на основі модуля Пельтьє, відповідно до якого входить тепловідвідний тепловідвід 6.

Тепловідвідний радіатор 6, охолоджується за допомогою електровентилятора 7. У нижній частині радіатора 4 камери 3, розташований пластиковий піддон 8 з патрубками для збору води. На задній стінці корпусу 1 в обсязі ізоляційного шару 2, виконано безліч випускних каналів 9, які призначені для відведення повітряного потоку, створюваного вентилятором 7. На місці вентилятора 7, в межах його повітряного потоку, закріплений зволожувач повітря 10, до прикладу електромеханічний.

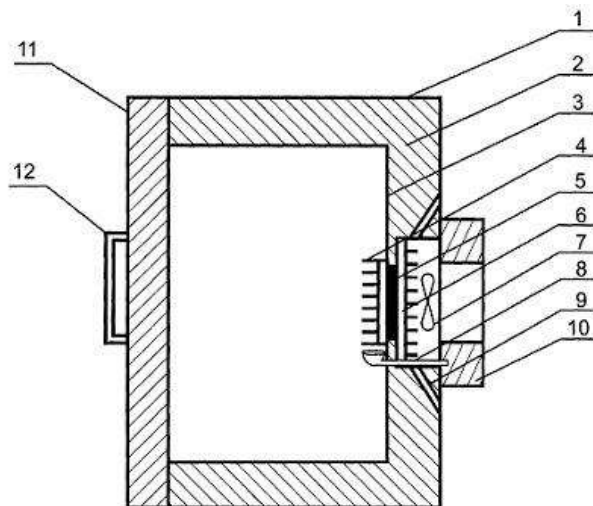


Рисунок 1.4 - Конструкція холодильника зі зволожувачем

Третій запропонований варіант пристрою аналогічного поверхню складається з основного корпусу 1, ізоляційного шару 2 з пінополіуретану, ізольованої холодильною камерою 3 із нержавіючої сталі. Камера термічно об'єднана із радіатором 4 модуля 5 на основі термоелементів Пельє, відповідно до якого входить тепловідвід 6 (рис. 1.5).

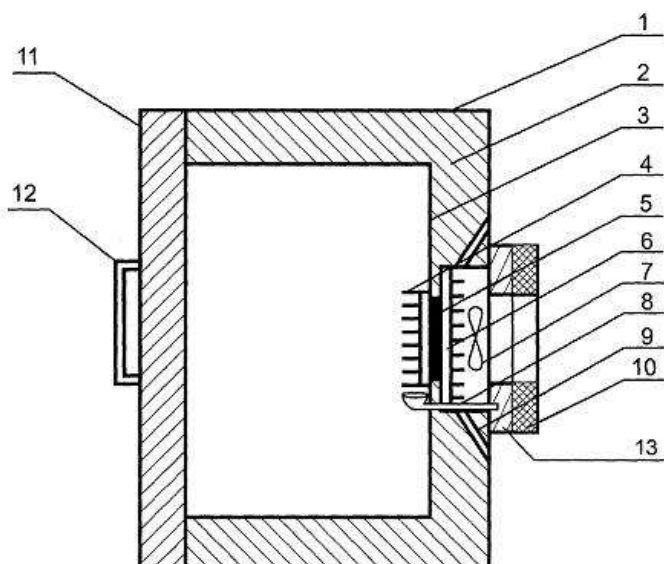


Рисунок 1.5 - Конструкція холодильника, що містить очищувач та зволожувач

Теплорадіатор 6 охолоджується вентилятором 7. Під радіатором 4 в камері 3 розташований піддон 8 з трубками. Задня стінка корпусу 1 виконана в обсязі теплоізоляційного шару 2, з низкою вихідних каналів 9, призначених для відводу повітряного потоку, створюваного вентилятором 7. На шляху вентилятора 7, в зоні дії його повітряного потоку знаходяться очисник 10 повітря і зволожувач 11.

Пропонований пристрій працює так. Коли струм пропускається через блок холодильника, який містить очищувач (рис.1.3) або зволожувач (рис.1.4) окремо або очищувач і зволожувач разом (рис.1.5), радіатор 4 і камера охолоджуються. Вони охолоджуються потоком повітря за допомогою вентиляторів 7. У той же час ці потоки проходять через конструкцію очищувача або зволожувача чи разом очищувача і зволожувача. Це призводить до взаємодії повітря з відповідними конструктивними елементами очищувача або зволожувача, що призводить до необхідного ступеня очищення або зволоження навколишнього повітря або їх комбінації.

Попередні випробування цього пристрою показали температуру холодильного приміщення 270–275 К при температурі навколишнього середовища 295 К. За 3 години роботи чистота повітря у приміщенні, де був розміщений запропонований прилад, підвищилася в 3-3,5 рази, а вологість - з 26% до 56%.

Особливості запропонованої конструкції - холодильник і очищувач або зволожувач повітря окремо або комбінований холодильник і очищувач та зволожувач повітря разом вдома, офісу та на роботі – дозволяє підвищувати комфорт і поліпшувати умови праці і перебування, при одночасному економному споживанні електроенергії.

Є холодильник [2], де запропоновано принципово нове рішення для термoeлектричних охолоджувачів. Його основою є зовнішній корпус з шаром ізоляції та внутрішня термостатична камера з блоком охолодження, що складається з двох радіаторів і термоелектричного модуля, що має генераторний модуль. Промислове використання цього пристрою не вимагає спеціальних технологій і матеріалів і можливе його впровадження на діючих підприємствах-виробниках обладнання.

На рисунку 1.6 показана принципова конструкція одного з можливих варіантів заявленого термоелектричного холодильника. Пристрій складається із зовнішнього металевого або пластикового захисного кожуха 1 і внутрішнього шару ізоляції Ceramisol 2, що ізолює холодну камеру 3 з харчової нержавіючої сталі. З одного боку камери 3, розташований тепловий блок, що складається з термоелектричного модуля 6, на робочій поверхні якого розміщені радіатори зовнішнього тепловідводу 7, і внутрішнього охолодження 4, які є вентиляторами 5 та 8.

Вище теплового блоку, розташовано реакторний термоелектричний генератор на основі перетворюючого боку 9, що складається з термоелектричних модулів та реакторної камери з паливом. Зовнішній корпус перетворювача 9 виконано з матеріалу, що повністю поглинає будь-яке випромінювання, яке виділяється паливом.

Конвертер 9 кріпиться до бічної частини холодильника через ізоляційний шар 11 на основі керамізолу, з відповідними захисними наповнювачами. З іншого боку перетворювача, всередині якого знаходиться термоелектричний модуль, розташований радіатор 10 тепловіддачі зовнішнього повітря, який обдувається вентилятором 8. Тут в якості палива використовується ізотоп з значним періодом напіврозпаду, що визначається робочою температурою і часом роботи термоелектричного генератора на базі ТЕМ Пельтьє.

						Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

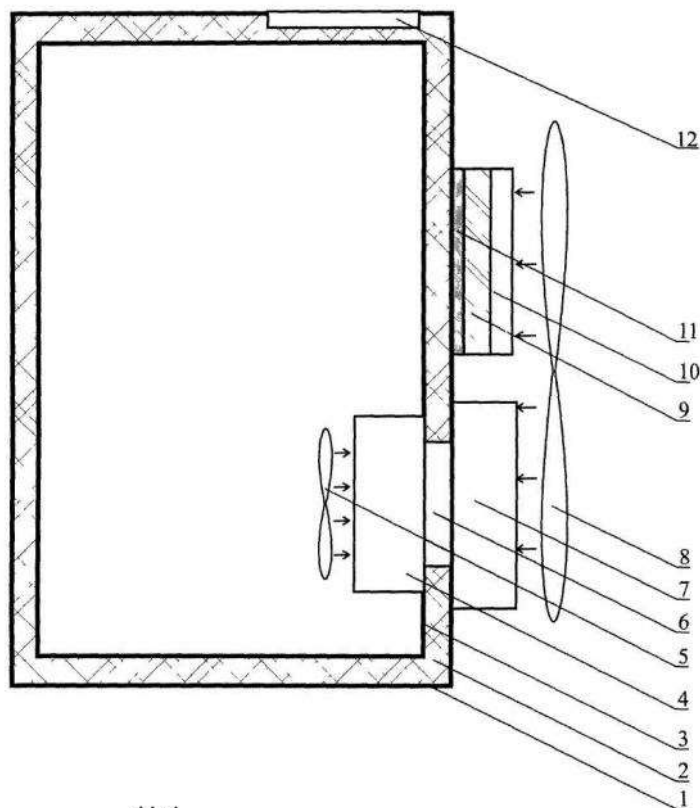


Рисунок 1.6 - Конструкція термоелектричного холодильника.

Управління роботою термоелектричного блоку реакторного генератора здійснюється за допомогою пульта керування 12. Включення та встановлення вибраного теплового режиму через пульт управління 12, який розташований на зовнішній поверхні холодильника, через який проходять електричні клеми реакторного генератора та тепловий блок холодильника. Принцип роботи запропонованого термоелектричного холодильника полягає в наступному. За допомогою пульта управління 12 вмикається струм, що створюється реакторним генератором на основі перетворювача 9 з радіатором 10, який далі переходить через термоелектричні модулі 6.

При цьому відбувається охолодження внутрішньої камери 3 термоелектричного охолоджувача. За допомогою пульта 12 також можна встановити потрібну полярність робочого струму для забезпечення обраного режиму роботи (охолодження чи нагрівання внутрішнього об'єму порожнини) і температуру внутрішньої порожнини 3 .

Існує модель термоелектричного холодильника [3], де запропоновано принципово нове рішення, яке полягає в тому, що його корпус у вигляді приліжкової тумбочки з шухлядками і полицками містить блок термоелектричного охолодження та/або нагріву з послідовно розташованими зовнішнім теплорозсіюючим радіатором, модулем Пельтьє і термостатованих футлярів з пляшками та має у своєму складі блок живлення з регулятором температури.

Промислове застосування запропонованого пристрою, не вимагає застосування спеціальних технологій і матеріалів і може бути реалізоване на діючих приладобудівних підприємствах.

На рисунку 1.7 показано, як міг би виглядати можливий варіант запропонованого холодильника.

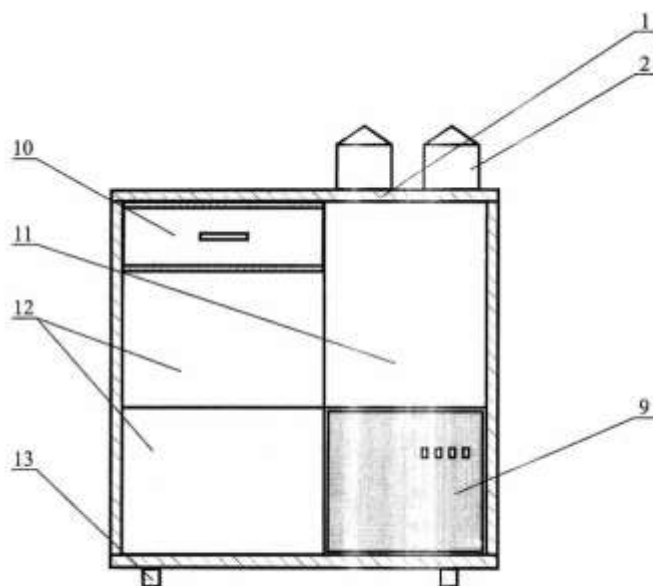


Рисунок 1.7 – Схема термоелектричного холодильника

Він складається з корпусу 1 у вигляді тумбочки, до наприкладу дерев'яної, на лицьовій стороні якої розміщені дверцята 4. На верхній кришці основного корпусу 1, в правому куті, розташована пластина 3 з двома кришками 2 з матеріалу з малою теплопровідністю для теплоізоляції пляшки. Уздовж задньої сторони кришки передбачені вентиляційні отвори для виведення гарячого повітря із зовнішнього теплообмінного радіатора 5. Ліва частина внутрішнього простору корпусу холодильника містить висувний ящик 10 і відділення для дрібних пред-

метів 12, відділення з правого боку ящика 1 відокремлено полицею, а порожня частина містить відділення 11 для зберігання більших речей.

Термоелектричний блок для термостатичної пляшки складається з термоелектричного модуля 6, робоча сторона якого знаходиться в тепловому контакті із дисипативним тепловідвідником 5, а друга робоча сторона якого знаходиться в тепловому контакті з двома термостатичними металевими корпусами 8 для пляшки. З метою зменшення тепловтрат, кожна оболонка 8 захищена певної товщини ізоляційним шаром 7 з пінополіуретану. Термоелектричний модуль Пельтьє 6 живиться від блоку живлення з терморегулятором 9, розташованого в правій нижній частині корпусу 1. На нижній зовнішній стороні корпусу є чотири підставки 13.

Пропонований приліжковий холодильник працює наступним чином. Струм, що проходить через термоелектричні модулі Пельтьє 6, викликає певний тепловий потік між радіатором 5 і кожним корпусом 8, напрямком якого визначається конкретним напрямком струму, що проходить через ці модулі. Це, у свою чергу, призводить до індивідуального охолодження або нагріву кожного бака 8. Глибина, на яку вони нагріваються або охолоджуються, визначається і підтримується електричним струмом, значення якого встановлюється термостатом. Це дає можливість нагріти відповідну пляшку, розташовану в корпусі 8, з конкретною рідиною до заданого рівня температури. Оскільки ребра радіатора 5 розташовані вертикально, - це сприяє його ефективній взаємодії з зовнішнім повітрям у ламінарному режимі.

Даний холодильний пристрій у вигляді приліжкової тумбочки дозволяє зберігати на своїх полицях 10, 11 і 12 необхідні речі, ліки, книги тощо.

Запропонований холодильник-тумба, характеризується відсутністю робочого шуму, наявністю внутрішнього джерела живлення від зовнішньої мережі, підвищеними експлуатаційними зручностями тощо. Він може застосовуватись в лікарнях, офісах, дитячих установах, готелях для звичайного зберігання речей в тумбочці та одночасного термостатування пляшок з рідиною у різних заданих

									Арк.
									24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

режимах.

Існує термоелектрична холодильна установка [4]. Термоелектрична холодильна установка містить охолоджуючий 1 та проміжний циркуляційний контур теплоносія. Він має насос 2, зовнішній теплообмінник 3 з вентилятором 4, який розміщується в охолоджувану камеру 1, термоелектричний агрегат з модулями охолодження 5, що включають теплопоглинальні 6 і тепловиділяючі 7 спаї. Натомість агрегат складається із охолоджувальної камери 1, виконаної у вигляді теплопровідної труби 8, всередині якої встановлений з зазором теплопровідний канал каналу 9 і вихідна труба 10.

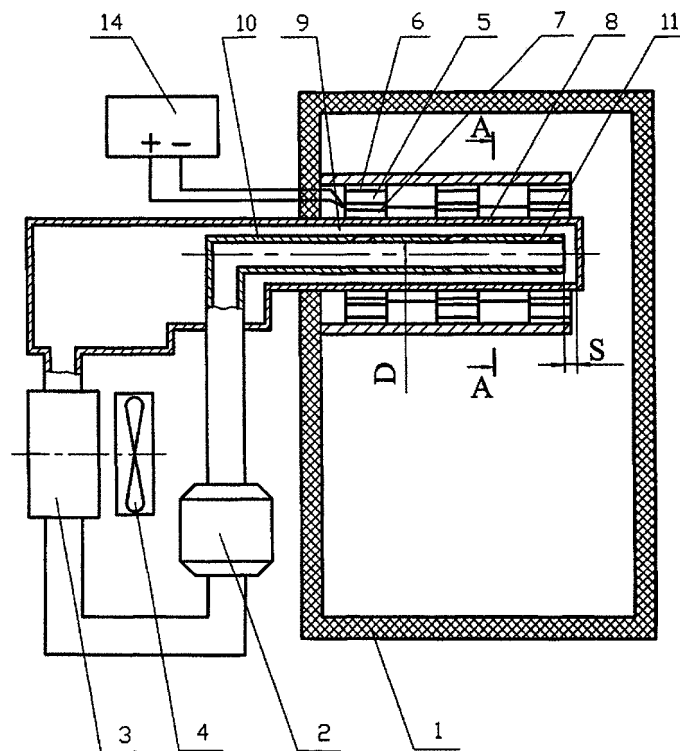


Рисунок 1.8 - Термоелектрична холодильна установка

Термоелектричні модулі 5 із тепловидільними спаями 7, рівномірно встановлені на зовнішню поверхню труби 8. Теплопоглинаючі спаї 6, розміщені в охолоджуваному середовищі охолоджувальної камери 1. Вихідна труба 10, підключена до входу у насос 2. Він підключений до входу у теплообмінник 3, який у

свою чергу підключений до труби 8. Зовнішня поверхня тепловідвідної труби 8 може бути циліндрична або ребриста. Площа поперечного перерізу кільцевого тепловідвідного каналу 9, не менше площі поперечного перерізу вихідної труби 10. Величина зазору  $S$ , між вхідним перетином вихідної труби 10 та дном труби 8 становить не менше 0,25 від внутрішнього діаметра  $D$  вихідної труби 10. В стінці труби вихідної 10, в зоні розташування термоелектричних модулів 5, виконані похилі отвори 11, у бік напрямку течії потоку вихідної труби 10. На теплопоглинаючі спаї 6 термоелектричних модулів 5, встановлюються голчасті 12 чи пластинчасті радіатори 13. Термоелектричні модулі виконуються у вигляді окремих плоских чи кільцевих модулів. Джерело живлення живляться термоелектричні модулі.

Термоелектрична холодильна установка працює так. Напруга подається на термоелектричні модулі охолодження 5 через зовнішнє джерело живлення 14. Електрична енергія за допомогою елементів Пельтьє перетворюється у теплову. За допомогою холодних спаїв здійснюється охолодження камери 1, а тепло від гарячих спаїв передається по теплопровідній трубці 8. Інтенсифікація відведення тепла відбувається за допомогою пластинчастого 13 чи голчастого 12 радіаторів. Тепло, яке відводиться від спаїв 7, передається по теплопровідній трубці 8 та відводиться назовні за допомогою проміжного циркуляційного контуру теплоносія. Насос 2 подає теплоносій у зовнішній теплообмінник 3 та охолоджується за допомогою вентилятора 4. Охолоджений теплоносій, із зовнішнього теплообмінника 3, надходить у кільцевий тепловідвідний канал 9, де відбирає тепло з тепловідвідної труби 8. При цьому, частка нагрітого теплоносія надходить у вихідну трубу 10 через отвори. Інша частина – через зазор  $S$  між торцем вихідної труби 10 і дном труби 8. З вихідної труби 10, нагрітий теплоносій надходить на вхід насоса 2, який подає нагрітий теплоносій для охолодження в зовнішній теплообмінник 3.

Термоелектричний пристрій для контактного охолодження поверхонь [5] містить: теплоізольований корпус 1, дно 2, контактний диск 3, охолоджувач 4, теплообмінник 5. Охолоджувач 4 складається з блоків термомодулів 6 і 7, які

									Арк.
									26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

змонтовані на опорах концентратора температури 8. Концентратор 8 виготовлений у формі усіченого конуса чи піраміди, що збігається з віссю корпусу 1. На нижніх опорах 9 концентратора 8, холодною стороною кріпиться термомодуль 6. На верхніх опорах 10, закріплені термомодулі 7 з гарячої стороною [5].

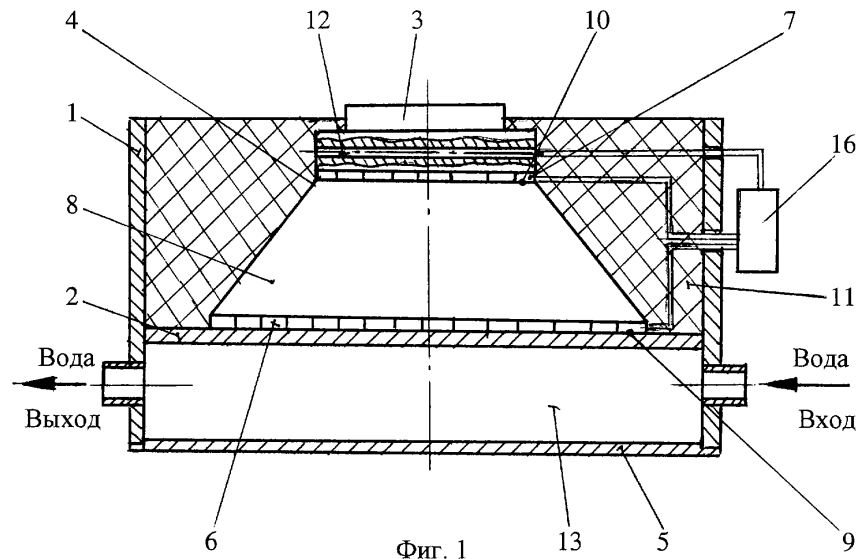


Рисунок 1.9 - Термоелектричний пристрій для контактного охолодження поверхонь

За допомогою спіненого поліуретану, концентратор 8 фіксується у корпусі 1. Пінополіуретан служить і теплоізолятором корпусу 1 та герметизатором блоків термомодулів 6 та 7. Для контролю температури служить вбудований датчик температури 12 що вмонтований в контактний диск 3. Теплообмінник 5 може бути у вигляді водяного радіатора 13, охолоджуваного проточною холодною водою і закріпленого на дні 2 корпусу. Для живлення використовується блок 16, який перетворює напругу електромережі 220 В, 50 Гц в постійну напругу величиною 12 ... 24 В.

Працює пристрій термоелектричний для контактного охолодження поверхонь. Термоелектричний пристрій, встановлюють контактним диском на плоску охолоджувану поверхню об'єкта. Через блок живлення 16 напруга подається на блоки термомодулів 6 і 7, при цьому на холодній стороні блоків виникають від'ємні температури, а на гарячій стороні - плюсові температури, які знімають-

ся на блоці 6 теплообмінником 5. Завдяки виконанню концентратора 8 у вигляді усіченого конуса чи піраміди до блоку 7 температура верхньої опори усіченої піраміди знижується, що дозволяє отримати на контактному диску 3 нижчі температури, та знизити енергетичні витрати на їх отримання. Концентратор 8, дно 2 та контактний диск 3 корпусу 1 виготовляються з теплопровідного матеріалу, переважно на основі міді або алюмінію.

### 1.3 Висновки до розділу

Проаналізовано теоретичні передумови отримання холоду при допомозі термоелектричного ефекту Пельтьє. Зроблено огляд та аналіз термоелектричних холодильників, що працюють на базі термоелектричних модулів. Зроблено висновки, що приведені конструкції мають ряд недоліків у своїх конструкціях, що пов'язані із системою охолодження, конструкціями самих термобатарей, системою керування роботи при різних складових термоелектричних модулів.

						Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА БАЗІ КАСКАДНОГО ЕЛЕМЕНТУ ПЕЛЬТЬЄ

### 2.1 Теоретичні передумови розробки термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє

Головними вихідними даними для розрахунку термоелектричних батарей є холодопродуктивність агрегата та параметри джерела живлення холодильника, тобто сила струму. При цьому потрібна холодопродуктивність термоелектричної батарей визначається: за калоричним розрахунком, залежно від заданого об'єму холодильної камери; необхідним рівнем охолодження; умовами роботи термоелектричного холодильника.

Розрахунок термоелектричної батареї починається із вибору матеріалів та геометричних розмірів термоелементів, враховуючи умови досягнення максимальної холодопродуктивності, технологічності конструкції та економічного ефекту від застосування. При заданому перепаді температур гарячих та холодних спаїв визначається холодопродуктивність одного термоелемента, потім підібрати необхідну кількість термоелементів для забезпечення максимальної холодопродуктивності термоелектричної батареї. В подальшому, здійснюється розробка моделі конструкції термоелектричної батареї, розрахунок елементів електроживлення, що забезпечують роботу термоелектричного холодильника в установлених режимах із оптимальною холодопродуктивністю.

Аналіз ефективності і коефіцієнтів охолодження показує, що ККД термопар залежить від співвідношення площ поперечних перерізів відгалужень, коефіцієнта термоЕРС, електропровідності та теплопровідності двох напівпровідникових елементів. Завдання пошуку ефективних матеріалів для термопар можна підсумувати наступним чином:

- по-перше, штучно створити у цих матеріалах концентрацію носіїв струму (n-p), яка максимізує значення коефіцієнта термоерс ( $\alpha$ ) і електропровідності

									Арк.
									29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

$$\left(\rho = \frac{1}{\sigma}\right).$$

- по-друге, створити напівпровідниковий матеріал з найменшою теплопровідністю. Це досягається шляхом введення в напівпровідниковий матеріал нейтральних включень. Це посилює розсіювання пружних хвиль - поширення теплопровідності.

Серед багатьох напівпровідникових матеріалів телурид вісмуту ( $Bi_2 Te_3$ ), селенід вісмуту ( $Bi_2 Se_3$ ) і телур сурми ( $Se_2 Te_3$ ) найчастіше використовуються у виробництві термопар. Телурид вісмуту ( $Bi_2 Te_3$ ) був обраний для розробки термоелектричного автомобільного холодильника, оскільки він має відповідні властивості.

Відомо, термоелектричні батареї працюють тільки при живленні від постійного струму, що отримуються від випрямляча або батареї живлення. Коли термоелектрична батарея живиться випрямленим струмом, коефіцієнт пульсації стає важливим, оскільки присутність змінної складової вивільняє Джоулеву теплоту в термоелектричній батареї, знижуючи її ефективність охолодження.

Кращим випрямлячем для живлення (охолодження) термоелементів є двополуперіодний випрямляч з нульовим виходом на вторинній обмотці трансформатора. В якості випрямних елементів використовуються кремнієві чи германієві діоди.

Споживання електроенергії є одним з ключових показників якості побутової техніки. Низька енергоефективність термоелектричних холодильників є кардинальною причиною, чому термоелектричні холодильники ще не мають широкого практичного використання в нашому повсякденному житті, незважаючи на їх численні переваги.

Форма та розміри термопари визначаються обраним матеріалом, формою охолоджувальної поверхні та умовами теплопередачі.

Оптимальне співвідношення ( $t$ ) перерізів гілок термоелемента, насправді відмінне від одиниці. Розміри підбираються відповідно до необхідної площі

									Арк.
									30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

оохолодження. Вона має, зазвичай уніфіковані розміри та має квадратний переріз. Висота термопар (мінімальна) обмежена лише умовами природного теплообміну від гарячого спаю до холодного. За цих умов висота термопар не перевищує 5 мм.

Оптимальний розподіл (розповсюдження) термоелементів батареї на поверхні оохолодження визначається з умов, які забезпечують оптимальний теплообмін між холодним та гарячим спаями за допомогою зовнішнього радіатора, зменшуючи різницю температур між спаями.

Ступінь розсіювання термопар характеризується щільністю пакування, яка визначається зв'язаністю сумарної площі всіх секцій термопар до площі теплообмінної поверхні термопар. Зменшення щільності пакування термопар (дисперсії) також сприяє зменшенню використання напівпровідникового матеріалу. Відомо, що зі зменшенням відстані між комутуючими пластинами термоелектричної батареї, тепловіддача від гарячого спаю до холодного зростає за рахунок перетинань термопар і зазорів між ними.

Така ситуація перешкоджає широкому застосуванню термопар і скороченню використання напівпровідникових матеріалів. Така конструкція термоелемента (рис. 2.1) дозволяє зменшити висоту термопар до 2 мм, підвищивши ККД термоелементу без ускладнення конструкції холодильника. Оптимальна щільність пакування для термопар із безповітряним зазором між ними та природною конвекцією знаходиться в межах 0,15-0,17, як показали дослідження зразків невеликих побутових холодильників (місткість 5-7 л).

При цьому, максимальне спрощення конструкції холодильника, досягається без використання побічної циркуляції повітря на гарячому спаю. Оптимальна щільність пакування може відрізнятись для холодильників більшої ємності.

Елементи з'єднуються зі змінною пластиною м'якою пайкою. При цьому, гілки термопар попередньо залужують спеціальним припоєм з низькою температурою плавлення.

Для теплових термобатарей батарей, що працюють в різних режимах (охо-

									Арк.
									31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

лодження та нагрівання) з великими перепадами температур, між термопарою і друкованою платою, встановлюється свинцевий демпфер для зменшення температурних навантажень. З цією ж метою, поточна пластина виконана так, щоб не перешкоджати термічній деформації. При цьому, можуть бути використані тонкі гнучкі перемикаючих пластини або пластини з проміжками в просторі між термопарами.

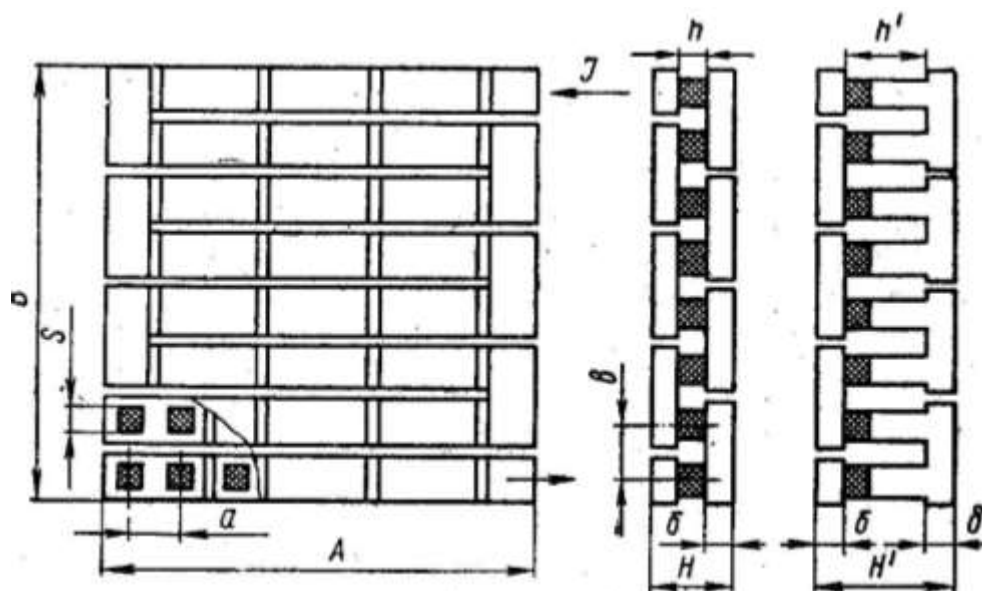


Рисунок 2.1 - Конструктивна схема термобатареї

Електрична ізоляція комутуючих пластин теплової батареї (термобатареї) від теплових перехідних процесів, зазвичай, досягається шляхом покриття зовнішньої поверхні анода електроізоляційною плівкою. Електроізоляційні поверхні змащуються спеціальним термокомпаундом для забезпечення кращої тепловіддачі. Ізоляційним середовищем між тепловими елементами батареї, зазвичай, є повітря, яке заповнює щілини. Однак, цілком можливе використання пластикової штучної ізоляції, яка також потребує електроізоляції.

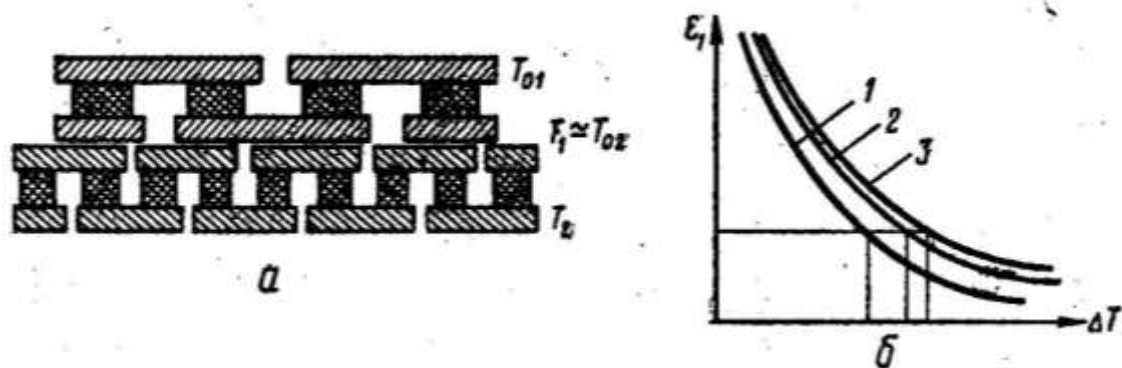
Оскільки із зменшенням перепаду температур гарячих і холодних спаїв холодильний коефіцієнт термоелектричної батареї підвищується, то одним із способів підвищення економічності термоелектричного охолодження слід вважати зниження температури гарячих спаїв за рахунок ефективного відводу від них тепла. Температура гарячих спаїв може бути знижена, якщо до них приєдна-

ти холодні спаї другої термоелектричної батареї.

Оскільки коефіцієнт охолодження термоелектричної батареї збільшується, коли різниця температур між гарячим і холодним спаями зменшується, то одним із способів підвищення ефективності термоелектричного охолодження є зниження температури гарячого спаю шляхом ефективного відведення тепла. Слід розглянути можливість зниження температури холодних спаяв, якщо до них під'єднати холодний спай другого термоелектричного елемента.

При цьому формується (двоступенева) термоелектрична батарея, другим ступінь якої призначений для підняття ефективності першого ступеня термоелемента або зниження температури холодного спаю, таким чином підвищуючи ефективність охолодження першого ступеня. Для чого можуть бути призначені триступеневі та багатоступінчасті термоелектричні батареї, причому кожен наступний ступінь охолоджує тепловий спай попереднього ступеня.

Якщо всі ступені триступеневої термоелектричної батареї живляться оптимальним струмом ( $I_{\text{опт}}$ ) режиму максимального енергозбереження, то орієнтовна залежність коефіцієнта охолодження залежить від різниці температур при однаковому значенні  $Z$  в одно-, дво- і триступеновому термоелементі відображена на рисунку 2.2.



1 - одноступенева термобатарея; 2 – двохступенева термобатарея;

3 - триступенева термобатарея

Рисунок 2.2 - Схема двоступеневої термобатареї (а) і графік залежності холодильного коефіцієнта від перепаду температур  $\delta T$ (б)

Аналіз цих діаграм показує, що ефективність програми знижується зі збільшенням кількості ступенів термоелементів. Тому, переважно, використовуються тільки дво- і триступеневі термоелектричні елементи.

Розглянемо ефективність охолодження та економічні показники триступеневої термоелектричної комірки з незалежними схемами джерела живлення для кожного ступеня термоелемента.

Якщо кількість тепла, що виділяється з гарячого спаю  $Q_2$ , перевищує тепло, що поглинається холодним спаєм за рахунок споживаної потужності, то верхня пластина називається холодним спаєм (температура  $T_x$ ), а нижня пластина називається гарячим спаєм (температура  $T_2$ ).

$$Q_2 = P + Q_0 . \quad (2.1)$$

де  $Q_0$  – холодопродуктивність термоелемента;  $P$  – потужність, що споживається термопарою.

Потужність  $P$  витрачає на здійснення роботи  $A$  по переміщенню зарядів при різниці електричних потенціалів, що виникає на вільних кінцях при різниці температур холодного та гарячого спаю відповідно  $T_x$  та  $T_2$  відповідно до ефекту Зеєбека. Тоді робота буде визначатись виразом,

$$A = Q_2 - Q_x = \alpha T_2 I - \alpha T_x I = \alpha I (T_2 - T_x) \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС, який залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу та його температури;  $I$  – величина сили струму, що підводиться до термобатареї.

Коефіцієнт охолодження для зворотного циклу термопари, в якому роль робочої речовини виконує електронний газ і немає незворотних втрат, визначається рівнянням:

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{A} = \frac{\alpha T_x I}{\alpha I (T_2 - T_x)} = \frac{T_x}{T_2 - T_x} \quad (2.3)$$

Значення  $\varepsilon$  узгоджується з холодильним коефіцієнтом зворотного циклу Карно, оскільки тепло відводиться при постійній температурі  $T_2$  і додається до джерела тепла при постійній температурі  $T_x$ .

Робота термопари включає два типи незворотних втрат: поширення струму вздовж провідника викликає джоулеві втрати  $Q_{дж}$ , а теплопровідність змушує тепло безперервно надходити від гарячого спаю до холодного спаю вздовж провідників, які складають ланцюг.

Джоулеві втрати визначаються таким співвідношенням:

$$Q_{дж} = I^2 R, \quad (2.4)$$

де  $R$  – опір гілок термоелемента пристрою.

Можна з великою точністю припустити, що половина тепла, що розсіюється в контурі, у вигляді джоулевих втрат, виходитиме на холодний спай, а половина — на гарячий.

Потік тепла від гарячого спаю до холодного виражається формулою:

$$Q_m = \lambda (T_g - T_x), \quad (2.5)$$

де  $\lambda$  – середня питома теплопровідність гілок термопари.

Отже, з урахуванням втрат, холодопродуктивність термоелемента пристрою визначається за формулою:

$$Q_0 = \alpha T_x I - 0,5 I^2 R - \lambda (T_2 - T_x) \quad (2.6)$$

Для багатоступеневих термобатарей використовуємо формули.

Щоб кожен ступінь термоелектричної батареї повністю використовував своє призначення, охолоджувальна здатність кожного наступного ступеня повинна бути більшою, ніж у попереднього ступеня, на величину кількості енергії, споживаної цим ступенем.

$$Q_{02} = Q_{01} + W_1 = Q_{01} \left(1 + \frac{1}{E_1}\right), \quad (2.7)$$

$$Q_{03} = Q_{02} + W_2 = Q_{01} \left(1 + \frac{1}{E_1}\right) \left(1 + \frac{1}{E_2}\right). \quad (2.8)$$

Якщо кожен ступінь термоелемента має однаковий коефіцієнт охолодження, то третій ступінь матиме таку холодопродуктивність:

$$Q_{03} = Q_{01} \left(1 + \frac{1}{E_1}\right)^3, \quad (2.9)$$

Загалом холодопродуктивність багатокаскадних термоелементів має визначатись виразом:

$$Q_{0n} = Q_{01} \left(1 + \frac{1}{E_1}\right)^{n-1}. \quad (2.10)$$

У результаті постає залежність, де показник ступеня термобатареї на одиницю менший за кількість ступенів. Тобто холодопродуктивність першого ступеня не враховується. Наприклад, якщо всі ступені мають коефіцієнт охолодження, що дорівнює 0,5, то другий ступінь повинен мати втричі більшу охолоджувальну здатність першої ступені, а третій ступінь — у дев'ять разів за перший. Коефіцієнт охолодження високочастотної багатоступеневої термоелектричної батареї визначається відношенням охолоджувальної здатності першого сту-

пеня до сумарної потужності, що створюється всіма ступенями.

Кількість теплоти, що відводиться від гарячого спаю:

$$Q_2 = \alpha T_2 I - 0,5 I^2 R - \lambda (T_2 - T_x) \quad (2.11)$$

Реальна робота циклу термоелемента з урахуванням втрат на нагрівання зовнішнього середовища:

$$A_{y,d} = Q - Q_0 = \alpha I (T_2 - T_x) \quad (2.12)$$

Холодильний коефіцієнт реального циклу термоелектричного холодильного агрегата з врахуванням втрат на нагрівання повітря навколишнього середовища:

$$\varepsilon = \frac{\alpha T_x - 0,5 I^2 R - \lambda (T_2 - T_x)}{I^2 R + \alpha I (T_2 - T_x)} \quad (2.13)$$

Отже, коефіцієнт охолодження залежить від величини струму, що подається на термоелемент. Видно, що максимальне значення коефіцієнта охолодження відбувається при струмі.

$$I = \frac{\alpha (T_a - T_o)}{R \left( \sqrt{1 + 0,5 Z (T_a - T_o)} - 1 \right)} \quad (2.14)$$

де  $Z$  - добротність термоелектричного елемента.

Матеріали термоелектричних перетворювачів (термоелектричних елементів) характеризуються добротністю  $Z$ . Цей параметр визначається фізичними властивостями термо-електропровідності  $\sigma$ , теплопровідності  $k$  і коефіцієнта терморухлившої сили  $\alpha$ , які пов'язані між собою рівнянням:

$$Z = \sigma \alpha^2 / k \quad (2.15)$$

Введемо у розрахунки додатковий коефіцієнт  $M$

$$M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_2 - T_x)} \quad (2.16)$$

Тоді, підставивши у формулу 2.16 формули (2.10) в (2.9), отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{T_x}{T_2 - T_x} = \frac{M - T_2 / T_x}{M + 1} \quad (2.17)$$

Важливо відзначити, що коефіцієнт охолодження залежить від різниці температур ( $T_2 - T_x$ ), створюваної термоелектричним елементом, і значення  $Z$ , що характеризується властивостями термоелектричної батареї. Коефіцієнт охолодження досягає максимального значення  $\varepsilon_{\max}$ , при  $Z \rightarrow \infty$ . Таким чином, основним завданням, термоелектричного матеріалознавства є підвищення коефіцієнта якості використуваних матеріалів.

Вибір матеріалу та конструкція термоелектричних модулів. Термоелектричний модуль із шести або більше батареї складається з термопар, розміщених між двома тепловими спаями, зазвичай зробленими з керамічних пластин. Матеріал, з якого виготовлені такі панелі, повинен бути хорошим електроізолятором, мати досить високу механічну міцність і високу теплопровідність, порівнянну з міддю (386 Вт/м К). Оскільки, поверхня блоку термопар займає тільки 40% поверхні пластини, розмір керамічної пластини визначає геометричні параметри всього модуля.

В якості керамічних теплопереходів в основному використовується матеріал на основі оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) з теплопровідністю порядку 25 Вт/м К. Оксид берилію має набагато більш високу теплопровідність - 250 Вт/м К, але він є занадто дорогим сьогодні, і, крім того, токсичним. Прекрасними властивостями-

						Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ми і дуже високою теплопровідністю - 180 Вт/м К, характеризується нітрид алюмінію (AlN). Вартість цього матеріалу, яка кілька років тому була порівняно високою, в даний час знижується у зв'язку з масовим його виробництвом, і це вже досить поширений матеріал.

Як керамічні теплообмінники, в основному, використовуються матеріали на основі оксиду алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) з теплопровідністю близько 25 Вт/мК. Оксид берилію має набагато вищу теплопровідність (250 Вт/мК), але сьогодні він надто дорогий і є токсичним. Нітрид алюмінію (Al N) характеризується відмінними властивостями та дуже високою теплопровідністю (180 Вт/м·К). Відносно висока вартість матеріалу не дозволяла впроваджувати його у виробництво, а зараз це досить поширений матеріал.

Модулі, виготовлені без керамічних теплообмінників, більш компактні, оскільки елементи, в модулі, розділені лише тонким шаром електроізоляції товщиною близько 0,1 мм. Такі модулі потребують електричної ізоляції між мідними контактами та теплообмінником. В основному, для цього використовуються тонкі органічні ізолятори, такі як Mular або Кеерон. Ефективність термоелектричних модулів, в основному, залежить від якості напівпровідникових матеріалів, і менше, від теплопровідності ізоляторів, які є керамічними або органічними ізоляційними матеріалами.

Тепловий опір термобатареї (модульний інтерфейс). Мінімальним тепловим опором володіє паяний інтерфейс. Сьогодні виробники термоелектричних холодильних пристроїв модулі з керамікою за допомогою так званої "термосмоли" (епоксидна смола) - порошку оксиду цинку в рідкому склі.

Тепловий опір батареї. Термічний опір спаяного інтерфейсу мінімальний. Сьогодні виробники термоелектричних кулерів використовують модулі з керамікою під назвою «Термосмола» (епоксидна смола) це порошкоподібний оксид цинку в рідкому склі.

Також є термопрокладка. Таке з'єднання забезпечує великий тепловий потік, і значно знижує поверхневий тепловий опір між керамічними пластинами та металевим теплообмінником. Це приблизно 0,35 К см<sup>2</sup>/Вт. Термічний опір кера-

						Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

міки, на основі оксиду алюмінію товщиною 0,6 мм становить 0,24 К см<sup>2</sup>/Вт (порядок опору розділу). Фольга Кеерон товщиною 50 мкм має опір 0,5 К см<sup>2</sup>/Вт і має дві поверхні розділу з опором 0,35 К см<sup>2</sup>/Вт кожна.

Розрахунок ККЕ матеріалів термоелектричного модуля. Термоелектричні перетворювальні матеріали характеризуються добротністю  $Z$  напівпровідникових матеріалів. Як уже зазначалося, цей параметр визначається фізико-хімічними властивостями матеріалу (електропровідність  $\sigma$ , теплопровідністю  $k$  і коефіцієнтом термоЕРС  $\alpha$ ), що показані у рівнянні (3.11). Чим вищий  $Z$ , тим кращі термоелектричні властивості, тим вищий ККЕ, і тим вищий максимальний перепад температури на спаях. Коефіцієнт охолодження прямує до максимального значення  $\varepsilon$  карно для  $Z \rightarrow \infty$ . Тому головним завданням у термоелектричному матеріалознавстві є пошук чи створення матеріалів із максимально можливими значеннями добротності. Провідність пропорційна концентрації носіїв заряду  $n$ , а термоелектрична сила наближається до нуля зі збільшенням  $n$ . Теплопровідність  $k$  складається з двох частин ( $k = k_p + k_e$ ): теплопровідність кристалічної решітки ( $k_p$ ), яка практично не залежить від  $n$ , і електронна теплопровідність ( $k_e$ ), пропорційна  $n$ .

У термоелектричному матеріалознавстві, основною метою є пошук матеріалів з максимально можливим значенням безрозмірного параметра  $ZT$ , і для цього важливо знати, як він залежить від властивостей матеріалу. У загальному випадку, вираз для безрозмірного параметра  $ZT$  має вигляд:

$$ZT = F(B, E_G/k_B T), \quad (3.18)$$

де  $B$  – фактор якості, що містить значну кількість параметрів, в тому числі хімічний потенціал, значення валентності хімічного зв'язку атомів, густину матеріалу та його молярну концентрацію);  $k_B$  – постійна Больцмана,  $E_G$  – ширина забороненої зони напівпровідника (робоча температура).

						Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Розрахунок термоелектричних однокаскадних та багатокаскадних модулів Пельтьє

Вибір стандартного термоелектричного модуля для конкретного проєктованого холодильника ґрунтується, принаймні, на трьох параметрах. Зокрема, це температура гарячого  $T_г$  і холодного спаю  $T_х$  термоелектричного модуля; теплове завантаження  $Q_0$  (холодопродуктивність).

Розрахунок температури гарячих спаїв модуля.

Гаряча сторона модуля – це сторона, з якої розсіюється тепло під час подачі постійного струму на термоелемент. З цього боку встановлений теплообмінник (радіатор). Якщо використовується повітряне охолодження (природний або примусовий теплообмін), температуру на гарячій стороні можна розрахувати за формулою:

$$T_г = T_{н.с} + R_г Q_г, \quad (2.19)$$

де  $T_{н.с}$  – температура навколишнього середовища, °С,  $R_г$  – тепловий опір теплообмінника гарячої сторони термомодуля, °С / Вт;  $Q_г$  - теплота, що виділяється на гарячих спаях термоелемента, Вт.

$$Q_г = P + Q_0, \quad (2.20)$$

де  $P$  – споживана потужність, Вт.

Наявність теплового опору в теплообміннику, призводить до того, що температура на гарячій стороні дещо перевищує температуру навколишнього середовища. Якщо термічний опір невідомий, це значення можна оцінити для різних випадків теплообміну, наприклад: природна конвекція – 20...40 °С, примусова конвекція – 10...15 °С, рідинне охолодження – 2...5 °С (вище температури теплоносія).

Розрахунок температури холодного спаю модуля

						Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Теплообмінник є ключовим компонентом цієї конструкції. Якщо поверхня теплообміну недостатня, тоді бажане охолодження може бути не досягнуто.

Розрахунок температури холодного спаю модуля. Холодна сторона термоелектричного модуля - це сторона, яка поглинає тепло при проходженні у ланцюзі постійного струму через термопару. Температура  $T_x$  холодної сторони повинна бути нижчою за температуру  $T_{об}$  об'єкта того, що потрібно охолодити, особливо якщо немає прямого теплового контакту.

$$T_x = T_{об} - R_x Q_0. \quad (2.21)$$

Розрахунок необхідної потужності охолодження (холодопродуктивності). Оскільки необхідно враховувати всі теплові навантаження, дуже важливо розрахувати теплове навантаження, яке необхідно зняти з холодної сторони модуля, щоб знизити температуру об'єкта, що охолоджується, на певну величину. З цих навантажень необхідно вказати:

1) Безпосередню теплоту, яку необхідно відібрати від охолодженого тіла, щоб на певний розмір знизити його температуру:

$$Q = i G \quad (2.22)$$

де  $i$  – ентальпія охолоджуваного матеріалу;  $G$  - його масова витрата, кг / с;

2) Тепловий потік від гарячої сторони модуля за рахунок теплопровідності.

3) Теплота, що виділяється провідником при протіканні по ньому струму (з високою точністю вважається, що половина Джоулевої теплоти  $I^2 R$  йде в холодну сторону, а половина — в гарячу);

4) Тепловий потік через шар ізоляції.

$$Q_{прит} = \lambda \Delta T S / \delta, \quad (2.23)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність ізоляції, Вт/м К;  $\delta$  – товщина теплозахисного покриття, м;  $\Delta T$  – перепад температур по товщині шару, ° К ;  $S$  – площа ізоляції, м;

5) Витрата «холодного повітря» на охолодження будівельних матеріалів (теплообмінників, підвідних ліній тощо).

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

За приведеної методикою розрахунків та з урахуванням вихідних даних для стандартних однокаскадних термоелементів визначимо параметри термоелектричного пристрої за максимальною холодопродуктивністю та максимальним холодильним коефіцієнтом залежно від перепаду температур на термоелемент.

Графіки залежності параметрів термоелектричного модуля Пельтьє MT2-1,13-127S FM411.361 (науково-виробнича фірма «Модуль» [www.spf-modul.com](http://www.spf-modul.com)): холодопродуктивності від різниці температур холодного і гарячого спаю; холодопродуктивності від струму; напруги від струму; коефіцієнта ефективності від струму при температурі гарячого спаю при температурі 27 °С та 50 °С приведені на рисунках 2.3 та 2.4.

Дані графіків ми будемо використовувати, в подальшому, при розрахунках та підборі трикаскадних термоелектричних елементів Пельтьє для розробки моделі термоелектричного холодильника.

Робота будь-якого термоелектричного модуля характеризується параметрами  $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $Q_{max}$  і  $\Delta T_{max}$  при певному значенні  $T_p$ . Робота при максимальних значеннях струму щодо неефективна внаслідок високих значень Джоулевого тепла. Тому, зазвичай, працюють при значеннях струму, яке складає від 25 до 80% його максимальної величини. Споживана потужність визначає температуру гарячої сторони і холодопродуктивність при даній потужності та силі струму.

Для будь-якого термоелектричного охолоджувача (термоелемента) зна-

						Арк.
						43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

чення  $Q_{max}$  відповідає  $I_{max}$  і  $V_{max}$  при нульовій різниці температур. Значення  $\Delta T_{max}$  відповідає максимальній різниці температур між холодним та гарячим спаєм термоелектричного модуля для  $I_{max}$  і  $V_{max}$  при відсутності впливу навколишнього середовища, тобто  $Q_{н.с} = 0$ .

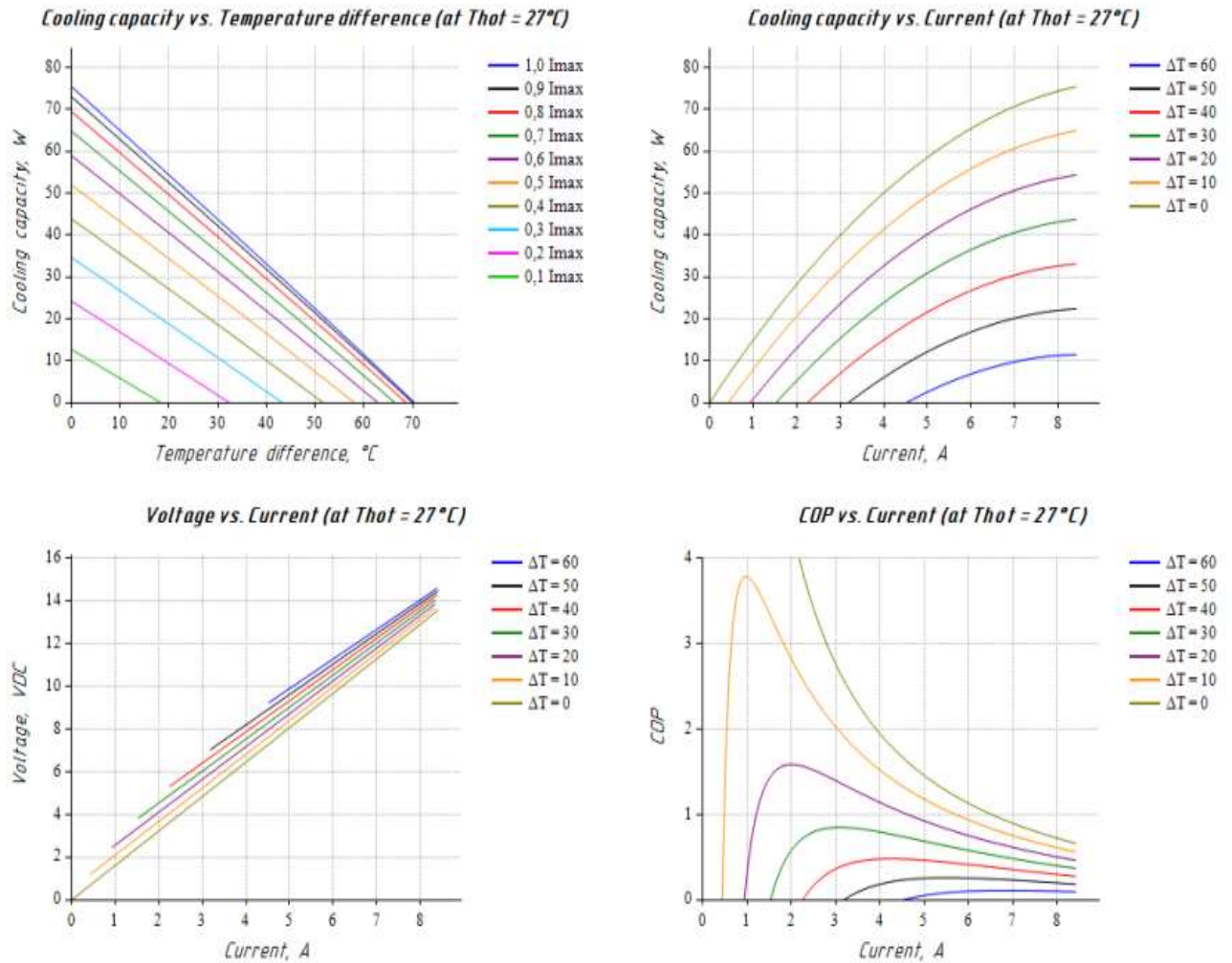


Рисунок 2.3 - Графіки залежності параметрів термоелектричного модуля Пельтьє MT2-1,13-127S FM411.361 (науково-виробнича фірма «Модуль» [www.spf-modul.com](http://www.spf-modul.com)): холодопродуктивності від різниці температур холодного і гарячого спаю; холодопродуктивності від струму; напруги від струму; коефіцієнта ефективності від струму при температурі гарячого спаю  $27^\circ\text{C}$

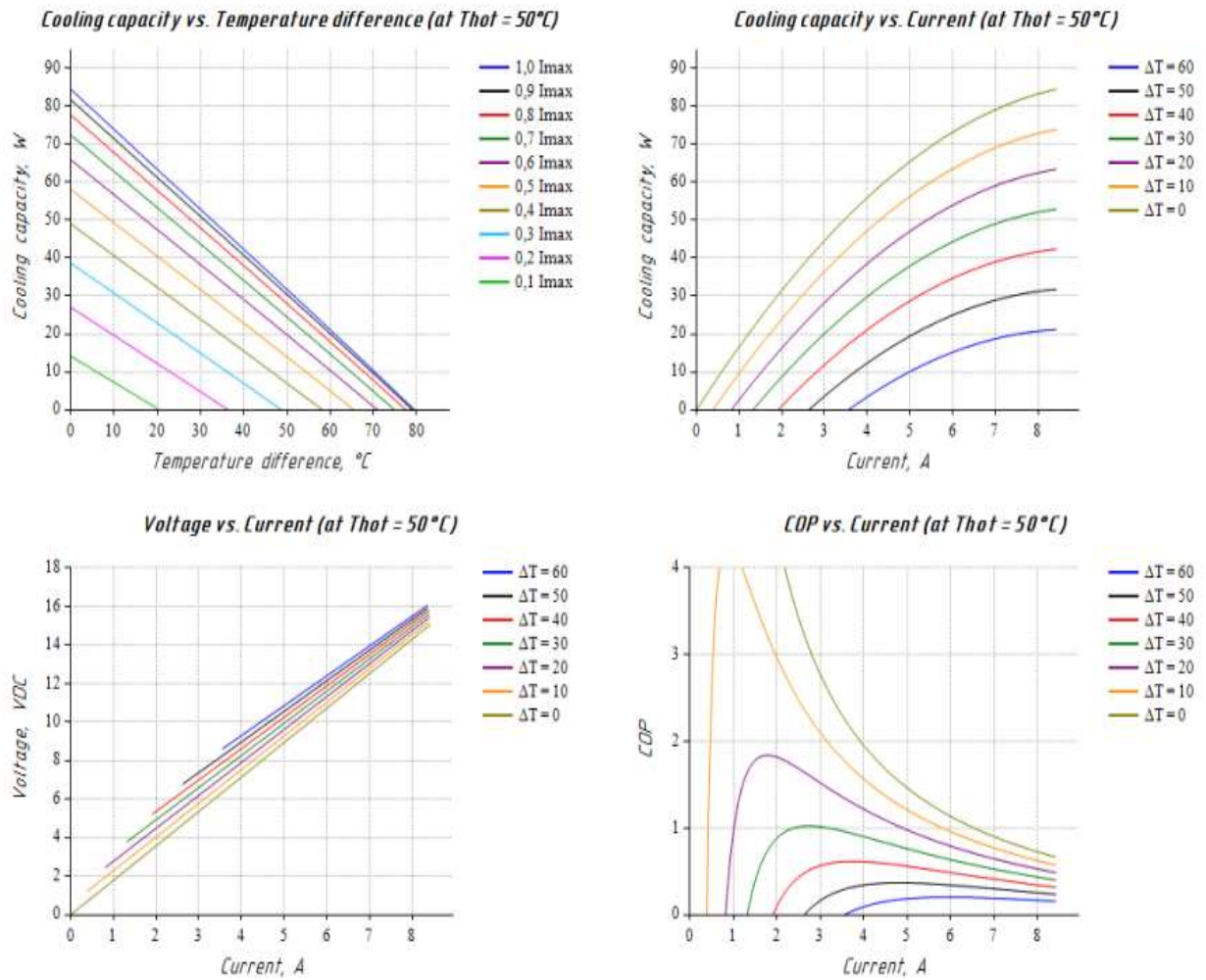


Рисунок 2.4 - Графіки залежності параметрів термоелектричного модуля Пельтьє MT2-1,13-127S FM411.361 (науково-виробнича фірма “Модуль” [www.spf-modul.com](http://www.spf-modul.com)): холодопродуктивності від різниці температур холодного і гарячого спаю; холодопродуктивності від струму; напруги від струму; коефіцієнта ефективності від струму при температурі гарячого спаю  $50^\circ\text{C}$

Розробляється система охолодження повинна мати холодопродуктивність від 22 до 80 Вт; теплообмінник з конвективним теплообміном примусового типу, з тепловим опором  $0,15^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ; об'єкт, що необхідно охолодити до  $5^\circ\text{C}$  (знаходиться в прямому тепловому контакті з холодною поверхнею); температура навколишнього середовища до  $25^\circ\text{C}$ .

За базовий приймаємо термоелектричний модуль з функціональними ха-

рактиками:  $I_{\max}=6,3$  А;  $Q_{\max}=65,0$  Вт;  $V_{\max}=16,7$  В;  $\Delta T_{\max}=74^{\circ}\text{C}$ .

Потрібно визначити, чи може бути застосований такий модуль для холодильника, що розробляється з температурою всередині камери  $T_x = 5^{\circ}\text{C}$ . Для термоелемента даного типу температуру на  $10^{\circ}\text{C}$  вище температури навколишнього середовища, тобто  $T_2 = 35^{\circ}\text{C}$ .

Оскільки вхідна потужність невідома, точне значення  $T_2$  не може бути визначено. Тоді, наближено враховуємо  $\Delta T = 35 - 5 = 30^{\circ}\text{C}$ .

На рисунку 2.5 та 2.6 представлені робочі криві залежностей градієнта температур від напруги і холодопродуктивності відповідно для попередньо вибраного модуля при температурі гарячої сторони  $35^{\circ}\text{C}$ .

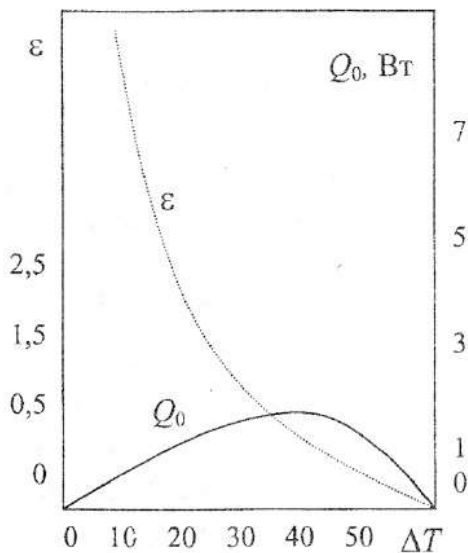


Рисунок 2.5- Залежність холодильного коефіцієнта  $\varepsilon$ . і холодопродуктивності  $Q_0$  від різниці температур для режиму максимального холодильного коефіцієнта

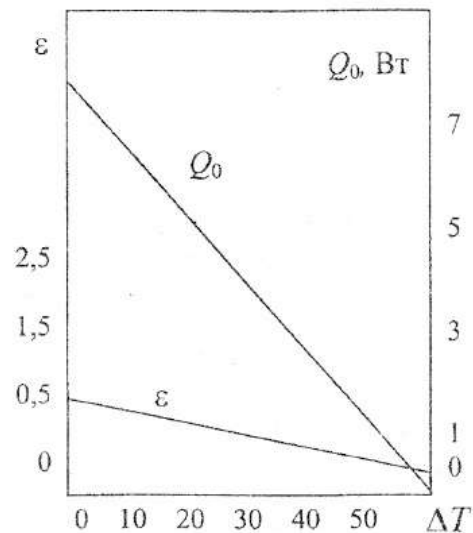


Рисунок 2.6 - Залежність холодильного коефіцієнта  $\varepsilon$ . і холодопродуктивності  $Q_0$  від різниці температур для режиму максимальної холодопродуктивності

Як видно з графіків на рисунку 2.3, 2.4, перетин ліній  $\varepsilon$  і  $Q_0$  показує, що даний термоелектричний модуль здатний виробляти від 22 до 80 Вт холоду при різниці температур  $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$  зі значенням вводиться струму 3А.

Значення струму було визначене орієнтовно при  $T_2 = 35^\circ\text{C}$ .

Потужність, що витрачається на отримання потрібної холодопродуктивності, є добуток струму на напругу. Значення необхідних величин для обчислення напруги можна отримати, використовуючи рисунок 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, на якому перетину ліній струму в 3А і різниці температур в  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  дає значення напруги приблизно в 8 В.

Підставляючи цифрові значення у рівняння, що представлені у розділі для розрахунків термоелектричної батареї відносно  $T_2$ , отримуємо:

$$Q_{2\text{max}} = 22 + 31 = 53 \text{ Вт};$$

$$T_2 = 25 + 8.0 = 33^\circ\text{C}.$$

Розрахункове значення  $T_2$  близьке до попередньо прийнятої. Це дозволяє зробити висновок, що запропонований модуль здатний працювати для даного холодильного агрегату термоелектричного холодильника, забезпечуючи оптимальні параметри його роботи. Якщо ж потрібно точне рішення щодо  $T_2$ , розрахунок може бути відтворений математично.

Використовуючи напівпровідникові матеріали з відомими властивостями, розраховуємо основні параметри та холодопродуктивність теплових термобатареї при заданих умовах експлуатації.

Відповідно ці параметри:

- коефіцієнт охолодження;
- потужність, споживана тепловими термобатареями від мережі;
- тепло, що виділяється на гарячих стиках;
- падіння напруги на термоелементі;
- кількість термопар (термоелементів);
- опір термопар і термобатареї;
- відношення довжини гілки до її поперечного перерізу.

Вихідні дані для розрахунків параметрів:

									Арк.
									47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

- добротність матеріалу (напівпровідників)  $Z = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ;
- коефіцієнт термоЕДС  $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$ ;
- коефіцієнт електропровідності  $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ;
- потрібна холодопродуктивність  $Q_0 = 60 \text{ Вт}$ ;
- умови експлуатації  $T_x = 280 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $T_r = 310 \text{ }^\circ\text{K}$ ;
- джерело живлення  $U_{\text{п}} = 12 \text{ В}$ .

В таблиці 2.1 наведені результати розрахунку термобатареї проектного термоелектричного холодильника.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку термобатареї.  
в режимі максимального холодильного коефіцієнту

№	Параметр термоелемента	Розрахункова формула	Результати розрахунку
1	Допоміжний коефіцієнт термоелемента	$M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_2 + T_x)}$	1,35
2	Холодильний коефіцієнт	$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{T_x}{T_2 - T_x} \frac{M - T_2 / T_x}{M + 1}$	0,96
3	Потужність споживана $P$ , Вт	$D = Q_0 / \varepsilon_{\text{max}}$	21
4	Теплота від гарячих спаїв $Q_{\text{г}}$ , Вт	$Q_{\text{г}} = P + Q_0$	41
5	Падіння напруги, $U_0$ , В	$U_0 = \frac{\alpha(T_2 - T_x)M}{M - 1}$	0,043
6	Число термопар термобатареї	$N = U_{\text{п}} / U_0$	91
7	Оптимальний струм $I_{\text{опт}}$ , А	$I_{\text{опт}} = P / U_{\text{п}}$	3
8	Опір термобатареї $R$ , Ом	$R = \frac{\alpha(T_2 - T_x)N}{I_{\text{опт}} \left( \sqrt{1 + 0,5Z(T_2 - T_x)} - 1 \right)}$	5,1
9	Опір термобатареї $R_0$ , Ом	$R_0 = R / N$	0,0182
10	Відношення довжини та перетину ланки	$l/S = \gamma R_0 / 2$	728
11	Переріз ланки, $\text{мм}^2$	$S = l / N$	5,5

Режим максимального коефіцієнта охолодження рідко використовується для практичних цілей. Відстань  $l$  між спаями термопар, зазвичай, не перевищує 2 мм. Це пояснюється тим, що існує дуже великий тепловий потік на короткій відстані від гарячого спаю до холодного спаю. Зайва довжина призводить до надмірної витрати матеріалу і підвищеної стійкості конструкції.

Розрахунок термоелектричного модуля у режимі максимальної холодопродуктивності..

При заданій геометрії термопари для холодильного агрегата потрібно розрахувати:

- число термоелементів в агрегаті;
- оптимальний струм, що проходить через них;
- напругу у джерелі живлення;
- споживана термобатареєю потужність;
- холодильний коефіцієнт.

У таблиці 2.2 наведені результати розрахунку конкретної термобатареї на основі вихідних даних для термоелемента:

- довжина термоелемента термобатареї  $l = 4$  мм;
- поперечний переріз одного фрагмента термоелемента  $S = 5.5$  мм<sup>2</sup>;
- добротність матеріалу термоелемента  $Z = 2,8 \cdot 10^{-3}$  °К<sup>-1</sup>;
- коефіцієнт термоЕДС  $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3}$  В/К;
- коефіцієнт електропровідності.  $\sigma = 8 \cdot 10^4$  Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>;
- відповідна холодопродуктивність  $Q_0 = 60$  Вт;
- умови експлуатації термоелемента  $T_x = 280$  °К,  $T_r = 310$  °К;

Таблиця 2.2 - Розрахунок термобатареї в режимі максимальної Холодопродуктивності.

№	Параметри термоелемента	Розрахункова формула	Результати розрахунку
1	Оптимальний струм для роботи	$I_{opt} = \alpha T_x \sigma S / 2l$	5,7

	термоелемента $I_{\text{опт}}$ , А		
2	Падіння напруги на вільних кінцях, $U_0$ , В	$U_0 = \alpha T_2$	0,115
3	Холодильний коефіцієнт термоелемента	$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{1}{2T_2} \left( T_x - \frac{2(T_2 - T_x)}{ZT_x} \right)$	0,96
1	2	3	4
4	Опір термопари $R_0$ , Ом	$R_0 = 2l / \sigma S$	0,0182
5	Холодопродуктивність термопари, $Q'$ , Вт	$Q' = \frac{\alpha^2}{R_0} \left( \frac{T_{\delta}^2}{2} - \frac{(T_a - T_{\delta})}{Z} \right)$	68
6	Число термопар в термобатарей N	$N = Q_0 / Q'$	91
7	Потужність, затрачувана однією термопарою $P_0$ , Вт	$P_0 = Q_0 / \varepsilon_{\delta}$	0,76
8	Потужність джерела живлення, P Вт	$P = P_0 N$	69,16
9	Теплота від гарячих спайів $Q_{\Gamma}$ , Вт	$Q_{\Gamma} = P + Q_0$	89
10	Напруга джерела живлення термобатарей $U_{\text{тв}}$ , В	$U_{\text{тв}} = U_0 N$	10,5

На основі розрахункових геометричних, теплових та електричних параметрів було розроблено 3-D модель та загальний вигляд термоелектричної батареї каскадного типу з приведеними геометричними розмірами. Ілюстрація елемента Пельтьє каскадного типу приведена на рисунку 2.7 та 2.8.

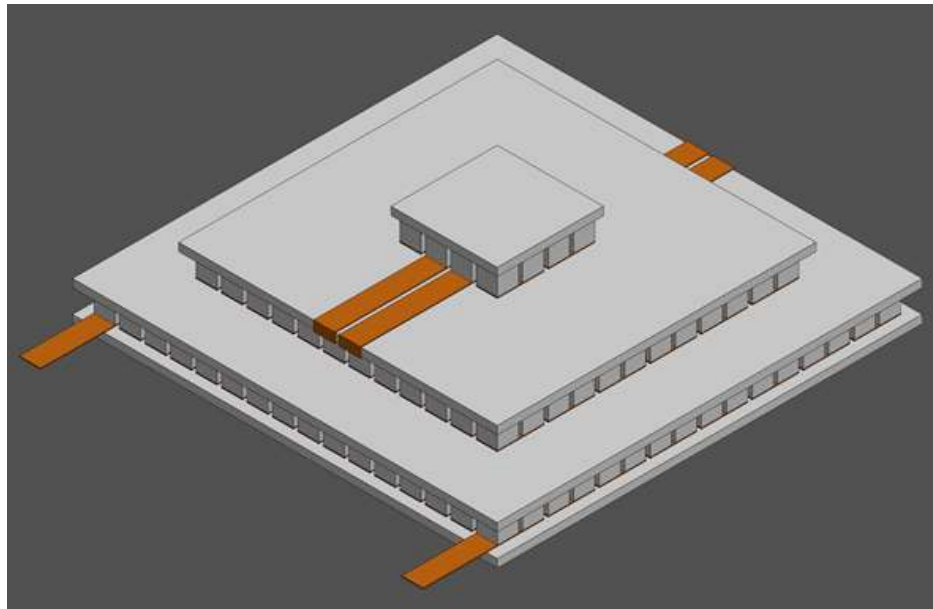


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд термоелектричного модуля каскадного модуля Пельтьє

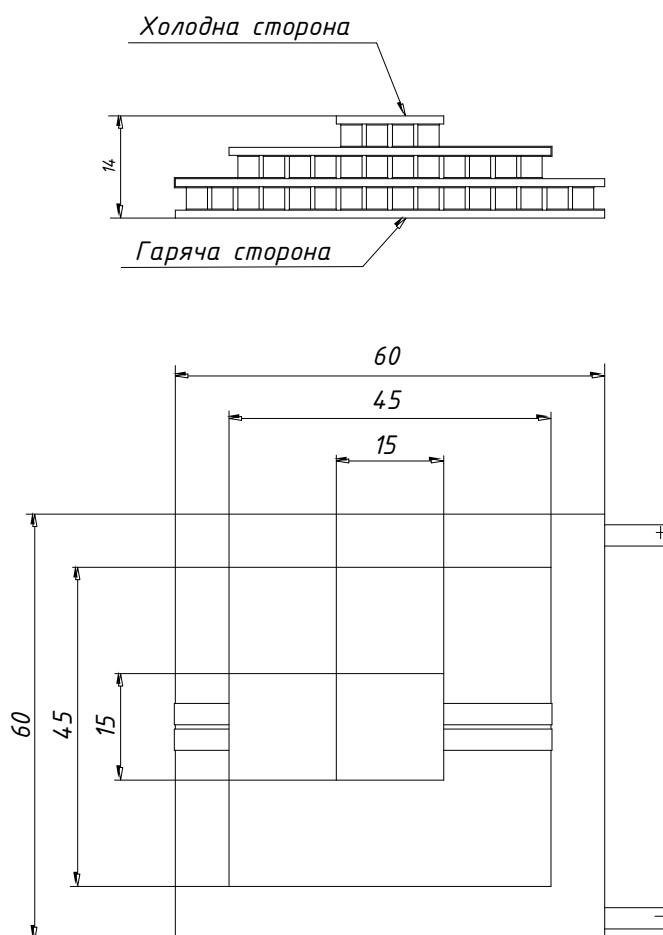


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд термоелектричного модуля каскадного модуля Пельтьє

Технічні характеристики запропонованого каскадного модуля Пельтьє, розраховані за запропонованими формулами, приведеними у другому та третьому розділах.

Температура гарячої сторони (Тг)	°C	27	50
Максимальна сила струму I <sub>max</sub> при максимальній різниці температур dT <sub>max</sub>	I	8,4	8,4
Максимальна напруга V <sub>max</sub> при максимальній різниці температур dT <sub>max</sub> = 0 °C (Q <sub>max</sub> )	V	14,7	16,4
Максимальна холодопродуктивність (Q <sub>max</sub> ) при максимальній різниці температур dT <sub>max</sub>	Вт	76,8	86,2
Максимальна різниця температур dT <sub>max</sub> при максимальній холодопродуктивності (Q <sub>max</sub> )	°C	71	78
Опір термопари, R	Ом	1,61	1,79
Максимальна робоча температура	°C		90
Температура розплавлення	°C		138

Конструкція холодильника з термоелектричною батареєю каскадного типу приведена у графічній частині магістерської роботи [МРМА 22.00.00.000 ВЗ].

#### 2.4 Висновки до розділу

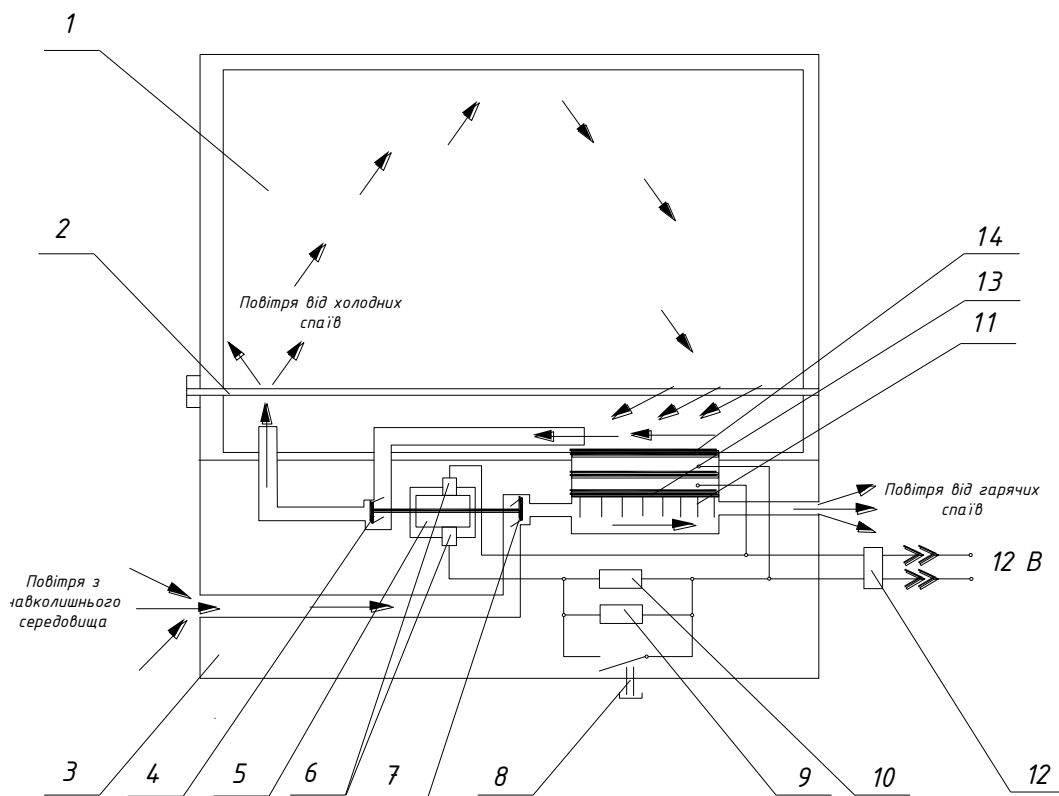
У даному розділі було запропоновано теоретичні передумови роботи термоелектричного холодильника. Для реалізації технологічного процесу охолодження, приведено основні формули для розрахунку конструктивних параметрів термоелектричного модуля (термопари). Приведено формули для розрахунку стандартного модуля для термоелектричного пристрою.

Зроблено розрахунки каскадного термоелектричного елемента Пельтьє. Зроблено 3-D модель термоелектричного елемента для подальшого її впровадження у розроблюваний термоелектричний холодильник.

## 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА БАЗІ КАСКАДНОГО ЕЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЄ

### 3.1 Розробка функціональної схеми роботи термоелектричного холодильника

Розроблений термоелектричний холодильник має з три основні конструктивні вузли: термоелектричні батареї (термоелементи), робочі (охолоджувальні) камери; системи тепловідводу від теплових батарей. Тісний зв'язок між цими трьома факторами враховувався при проектуванні холодильного агрегату (рис. 3.1).



1 – корпус.; 2 – прокладка; 3 – кришка.; 4 - крильчатка; 5 - ротор колекторного електродвигуна (12-24 вольт); 6 - щітки електродвигуна; 7 - крильчатка; 8 – перемикач; 9 - резистор; 10 - резистор; 11 – гаряча сторона; 12 - шнур живлення; 13 - термобатарея; 14 – холодна сторона

Рисунок 3.1 - Структурна схема термоелектричного холодильника.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Розроблюваний термоелектричний холодильник складається з корпусу 1 в якому розміщена холодильна камера на 7 літрів, кришки 3, яка щільно накриває холодильну камеру, термобатарей з холодними 14 та гарячими 11 спаями, яка складається з 32-ох термоелементів висотою 2 мм і перерізом 3×3 мм, охолоджуючого радіатора, крильчатки 4 для подачі холодного повітря від холодних спаїв, крильчатки 5 для обдуву гарячих спаїв та подачі повітря назовні холодильного агрегата. Структурно-функціональна схема термоелектричного холодильника представлена у графічній частині МРМА 22.00.00.000 С3.

Розроблений термоелектричний холодильник складається з корпусу 1, який вміщує холодильну камеру об'ємом 7 л, кришки 3, яка щільно закриває холодильну камеру, холодних спаїв 14 і теплих - 11, які складаються з 32 термопар висотою 2 мм і з поперечним перерізом 3 х 3 мм, крильчатки 4, що подає холодне повітря з холодного з'єднання, крильчатка 5 подає повітря за межі охолоджувального блоку. Будова і функціональна схема термоелектричного охолоджувача наведена в графічній частині МРМА 22.00.00.000 С3.

Схема включає в себе: щітковий колекторний двигун 6, плату з випрямним мостом, випрямний трансформатор з 2 секціями первинної обмотки, 2 германієвих діода Д-305, дросель і 2 конденсатора ємністю по 4000 мкФ, вимикач 8, 2 резистора 9 і 10, шнур живлення. Холодильного агрегата.

Робота термоелектричної холодильної установки полягає в наступному. Коли постійний струм пропускається через термопару між схемними пластинами, утворюючи з'єднання термопар 13 і 14, виникає різниця температур через тепловиділення Пельтьє (з'єднання 13) і поглинання (з'єднання 14). Зняття енергії з спаю 14, знижує його температуру. Величина падіння температури на спаю 14 залежить від теплового навантаження на з'єднання. Ця напруга складається з притоку тепла від теплоносія, тепла від спаю 1 через теплопровідність гілок термопар та Джоулевого тепла, що виділяється в гілках термопар, коли через них протікає постійний струм.

Циркуляція холодного повітря від холодної сторони і відведення повітря з

									Арк.
									54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

гарячої сторони здійснюється вентиляторами.

### 3.2 Розробка електричної схеми термоелектричного холодильника

Як відомо, термоелектричні батареї працюють ефективно, якщо вони живляться виключно постійним струмом з належними параметрами. Тому, в конструкції термоелектричних холодильників були передбачені спеціальні випрямні пристрої для отримання постійного струму від однофазних мереж змінного струму.

У термоелектричних випрямлячах побутових холодильників найчастіше використовуються напівпровідникові вентиля у вигляді германієвих та кремнієвих діодів, так як вони більш надійні і довговічні, мають менші габарити та вагу, а також економічніші, в порівнянні з трубчастими вентилями (електронними та іонними). Як відомо, випрямні властивості вентиля (діода) характеризуються коефіцієнтом випрямлення, який виражає відношення постійного струму до зворотного.

Вибір схеми випрямляча визначається допустимою пульсацією постійного струму. Відомо, що якість схеми випрямляча оцінюється коефіцієнтом пульсацій, який є відношенням найбільшої амплітуди випрямленої напруги до її середнього значення. Для живлення термоелементів потрібна схема, яка гарантує мінімальний коефіцієнт пульсації. Тому, в термоелектричних випрямлячах холодильників використовується двополуперіодна схема зі згладжуючим фільтром. Схема двофазного випрямляча із середнім виходом вторинної обмотки трансформатора та застосуванням згладжуючого фільтра показана на рисунку 3.2.

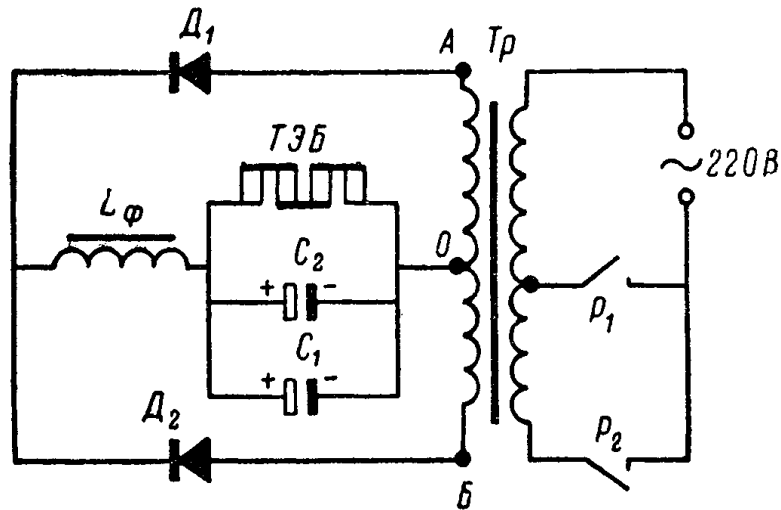


Рисунок 3.2 - Електрична схема термоелектричного холодильника.

Завдяки двом вентилям (діодам), кожний півперіод через термобатарейо проходить струм. У цьому напівперіоді, коли змінний струм у вторинній обмотці трансформатора тече в напрямку від точки А до точки О, випрямлений струм тече від першого вентиля до теплової батареї. Оскільки потенціал цього анода є негативним, порівняно з потенціалом катода, - струм через другий клапан не протікає.

У наступній напівхвилі, при протіканні змінного струму в напрямку від точки В до точки О, випрямлений струм надходить від другого вентиля до термобатарейі і на першому вентилі виникає зворотна напруга. Коефіцієнт пульсацій

цього струму  $p = \frac{U_T}{U_H}$ , має велике значення близько 0,7. Змішані згладжувальні фільтри, що складаються з індуктивних та ємнісних фільтрів, зазвичай використовуються для зменшення пульсацій.

У найпоширеніших L-подібних фільтрах, індуктивний фільтр (дросель) згладжує діаграму згладженого струму, змінюючи форму та тривалість імпульсів струму. Ємнісний фільтр (конденсатор) періодично розряджає конденсатор теплової батареї.

Трансформатор схеми випрямляча струму розраховується, виходячи з одержання оптимальної напруги на термоелектричній батареї.

Спочатку вибираємо режим роботи теплової батареї (не постійний або циркуляційний). Термоелектричні холодильники дуже довго виходять на стабільний температурний режим (1...5 години), тому для зниження енергоспоживання можна вибрати режим з неповною циркуляцією. У цьому випадку первинна обмотка трансформатора розбивається на дві секції.

Одна секція призначена для подачі оптимальної напруги на термобатарею. Це забезпечує роботу в режимі максимальної ефективності охолодження, а двох секцій - в режимі максимальної економії. Коли температура всередині холодильника перевищує задану температуру, автоматично вмикається режим максимальної охолоджувальної потужності. Автоматичне перемикання в режим максимальної ефективності відбувається, коли охолодження камери досягає необхідного ступеня.

Для живлення невеликого термоелектричного охолоджувача в усталеному режимі можна використовувати спрощений випрямляч, побудований на одній напівперіодній схемі. Пересувні термоелектричні холодильники (автомобільні) добре працюють від батарей постійного струму (акумуляторів) на 6, 12 і 24 В.

Системи регулювання температури термоелектричних холодильників можуть бути автоматичними і неавтоматичними. В останньому випадку необхідна ступінь охолодження встановлюється ручним перемикачем живлення термобатареї. При цьому, можливо перевести холодильник з режиму охолодження в режим обігріву (зима), змінивши напрямок струму, що проходить через термобатарею.

Система автоматичного регулювання температури використовується при циклічній роботі холодильника та складається з терморегулятора, який надійно вмикає і вимикає одну секцію первинної обмотки трансформатора.

Для автоматичного захисту термоелектричної батареї від аварійного перегріву, використовується біметалічний терморегулятор захисту. Зазвичай, він монтується біля гарячого спаю та радіатора. При підвищенні температури радіатора до певного небезпечного рівня, контакти захисного реле розмикаються, відк-

лючаючи холодильник від зовнішньої мережі.

Періодичне відтавання снігового покриву, що утворюється на стінках камер, сполучених з холодними спаями термоелектричного холодильника, здійснюється шляхом ручного чи автоматичного перемикання режиму роботи термоелектричного модуля з охолодження на нагрівання.

Для досягнення максимальної ефективності охолодження та зниження енергоспоживання ми розробили систему, яка підключається до електронної схеми керування холодильника.

При розробці термоелектричних (автомобільних) холодильників були прийняті та використані наступні матеріали та елементна база.

Корпус виготовлений із цілісного сплаву ПВХ та алюмінію, а ізоляція між ними виконана із щільного пінополіуретану, який запобігає миттєвому виходу охолодженого повітря в навколишнє середовище. Це дозволяє підтримувати необхідну температуру. Кришка виготовлена із того ж матеріалу, що і корпус, а центр також заповнений пінополіуретаном високої щільності. Вкладки використовуються для захисту радіаторів, вентиляторів, друкованих плат і проводки від механічних пошкоджень. Вентилятор К-95 призначений для примусового охолодження радіаторів.

Кулери призначені для відведення тепла від гарячого спаю теплових батарей в термоелектричних холодильниках. Два германієвих діода D-305 виконують роль випрямляча змінного струму в постійний від мережі 220 В. З'єднувальний кабель (переріз 0,3 мм) призначений для передачі електроенергії від джерела живлення до споживача. Випрямний трансформатор, який перетворює змінний струм з 220 В на постійний струм 12 В. У графічній частині показано складальне креслення термоелектричного холодильника з каскадною системою термоелементів Пельтьє [МРМА 22.00.00.000 ВЗ].

								Арк.
								58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				

### 3.3 Розробка схеми керування термоелектричного холодильника на базі каскадного елемента Пельтьє

Відповідно до запропонованого способу охолодження, передача тепла відбувається через багатоступеневу термоелектричну батарею з проміжною рекуперативною батареєю та електрично незалежним каскадом наступним чином.

Під час першої найхолоднішої ступені батареї в режимі активного тепловідведення, протягом інтервалу часу 1-ї (рис. 3.3) виділяється певна кількість тепла, що визначається тепло-фізичними властивостями теплоаккумулятора. Потужність охолодження цього каскаду та тривалість інтервалу часу 1-ї потім розряджається в наступний акумулятор тепла другого ступеня батареї.

						Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

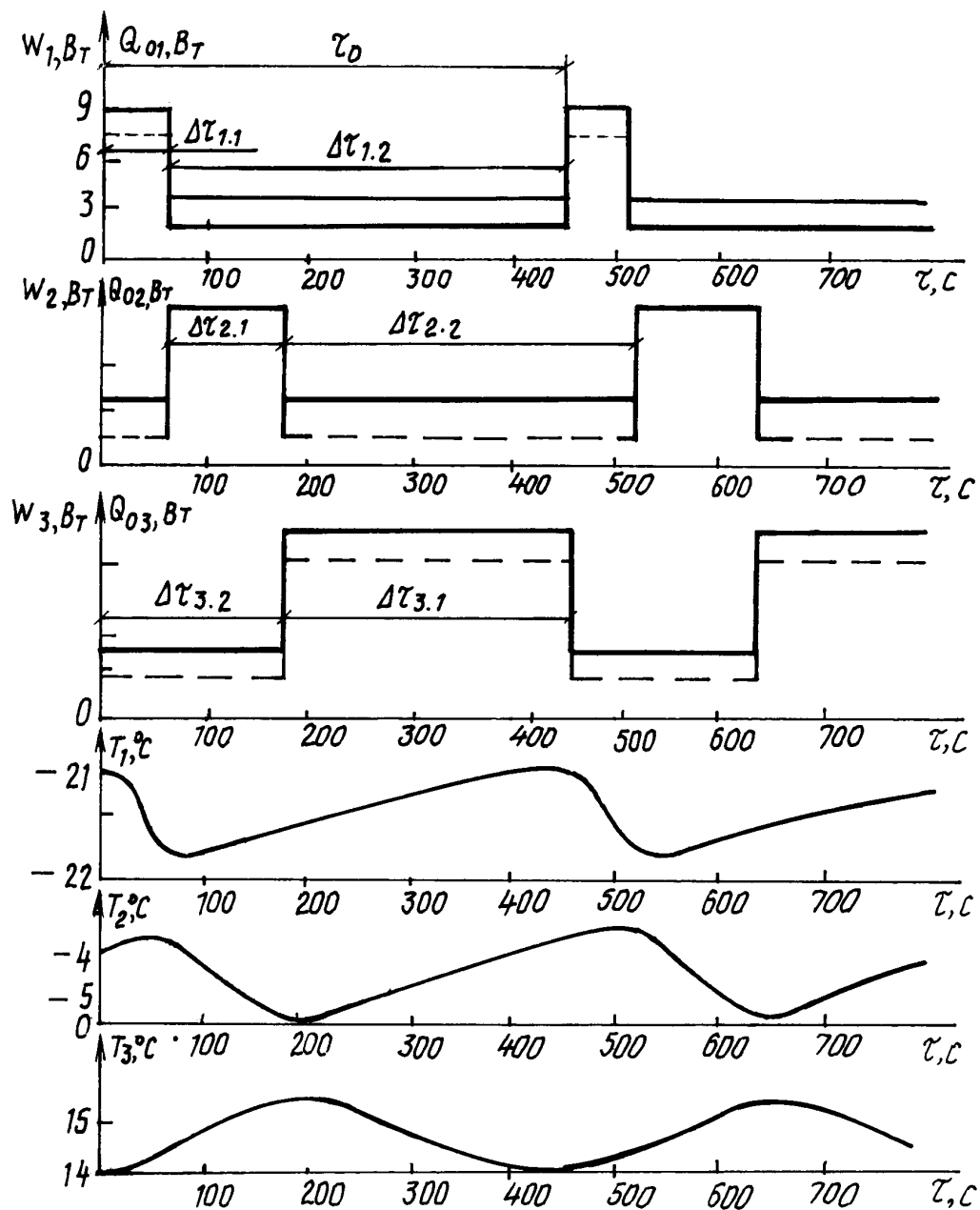


Рисунок 3.3 - Циклограма роботи трикаскадної батареї з проміжними акумуляторами тепла, при сталому режимі відводу тепла від охолоджуваного об'єкта

Про це свідчить зниження температури регенератора другого ступеня з часом. Це режим термоключа, який компенсує зворотний потік тепла через термопару та ізоляцію акумулятора другого ступеня протягом інтервалу часу. Після закінчення інтервалу часу, друга ступінь переходить в режим активного відве-

дення тепла, накопиченого в теплоаккумуляторі, а перша ступінь батареї переходить в режим термовимикача. Продовжуючи роботу першого каскаду батарей в цьому режимі, протягом інтервалу часу, розряджений теплоаккумулятор цього каскаду заповнюється тепловою енергією, що надходить за рахунок рекуперації тепла від охолоджуваного об'єкта.

На рисунку також показано характерні зміни температури теплонакопичувача в часі, при роботі каскаду батарей в режимі активного тепловідводу та режимі термовимикача.

Подібним чином, передача тепла відбувається на другому ступені батареї та за її межами, протягом усього процесу охолодження об'єкта. Потім середнє значення і амплітуда коливань температури каскадних акумуляторів тепла в режимі активного тепловідводу і режимі термоперемикання зменшуються до виходу батарей на стабільний режим роботи.

Щоб отримати стабільний спосіб відведення тепла від об'єкта, що охолоджується, відповідно вимог до температури об'єкта з мінімальним споживанням енергії, тривалість інтервалу часу має бути обмежена. Поведінка каскаду батареї в активному режимі, розсіювання тепла, тепловий ключ і значення струму  $I_{c,i}$  і та  $I_{k,i}$ , що споживаються в цих режимах.

При цьому збільшення струму  $I_{c,i}$  або тривалості проміжку часу  $i.1$  для  $i$ -го каскаду батареї призводить до зниження усталеного середнього значення температур акумуляторів тепла цього каскаду, але тільки при відповідному збільшенні тривалостей проміжків часу або струмів  $I_{c,i}$  споживання наступних каскадів батареї в режимі активного відведення тепла і загальної тривалості  $i-1 + i-2$  циклів їх роботи.

У той же час, збільшення струму  $I_{c,i}$ , або тривалості інтервалу часу  $i$ -ї ступені батареї, призводить до стабільного середнього зниження температури регенератора цього каскаду. Проте тільки при відповідному збільшенні тривалості інтервалу часу або струму  $I_{c,i}$  каскадів акумуляторних батарей у режимі активного тепловідведення та сумарної тривалості циклів їх роботи.

									Арк.
									61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

Слід зазначити, що в запропонованому способі охолодження при встановлених значеннях струмів  $I_{c,i}$  і  $I_{k,i}$  споживання кожного  $i$ -го каскаду батареї, на відміну від відомого способу охолодження, є можливість виведення батареї на сталий режим роботи з оптимальними значеннями холодопродуктивності і споживаної електричної потужності шляхом підбору відповідних тривалостей проміжків часу  $i.1$  і  $i.2$  для кожного  $i$ -го каскаду батареї.

Тобто можна незалежно встановити значення  $I_{c,i}$  та  $I_{k,i}$  та споживання струму  $i$ -го ступеня батареї та відводити тепло від об'єкта, що охолоджується, практично з тими самими значеннями. Охолоджувальна здатність акумуляторної ступені  $Q_{o,i}$  в режимі активного відведення тепла. Це призводить до використання однакової кількості термопар у кожному каскаді комірок, що значно зменшує споживання дефіцитного напівпровідникового матеріалу порівняно з відомими способами охолодження об'єктів термоелектричними каскадними комірками.

Як видно з циклограм, середнє значення споживаної потужності, в режимі постійного охолодження об'єкта визначається за формулою де  $e = i.1 + i.2$  – тривалість першого каскаду та кожного наступного каскаду термобатареї.

При цьому тільки один ступінь батареї завжди працює в режимі активного відведення тепла з максимальним енергоспоживанням. У зв'язку з цим за допомогою запропонованого способу охолодження досягається значне зниження споживаної електроенергії. Це означає, що його використання збільшує коефіцієнт охолодження багатокаскадних батарей порівняно з відомими методами охолодження.

Для описаного пристрою, функціональна схема живлення каскадів акумуляторів та керування їх роботою, згідно запропонованого способу охолодження, наведена на рисунку 3.4, включає перший, другий та третій каскади акумуляторів, містить три регульованих джерела постійного регульованого струму. 1, 2 і 3 адекватно.

									Арк.
									62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

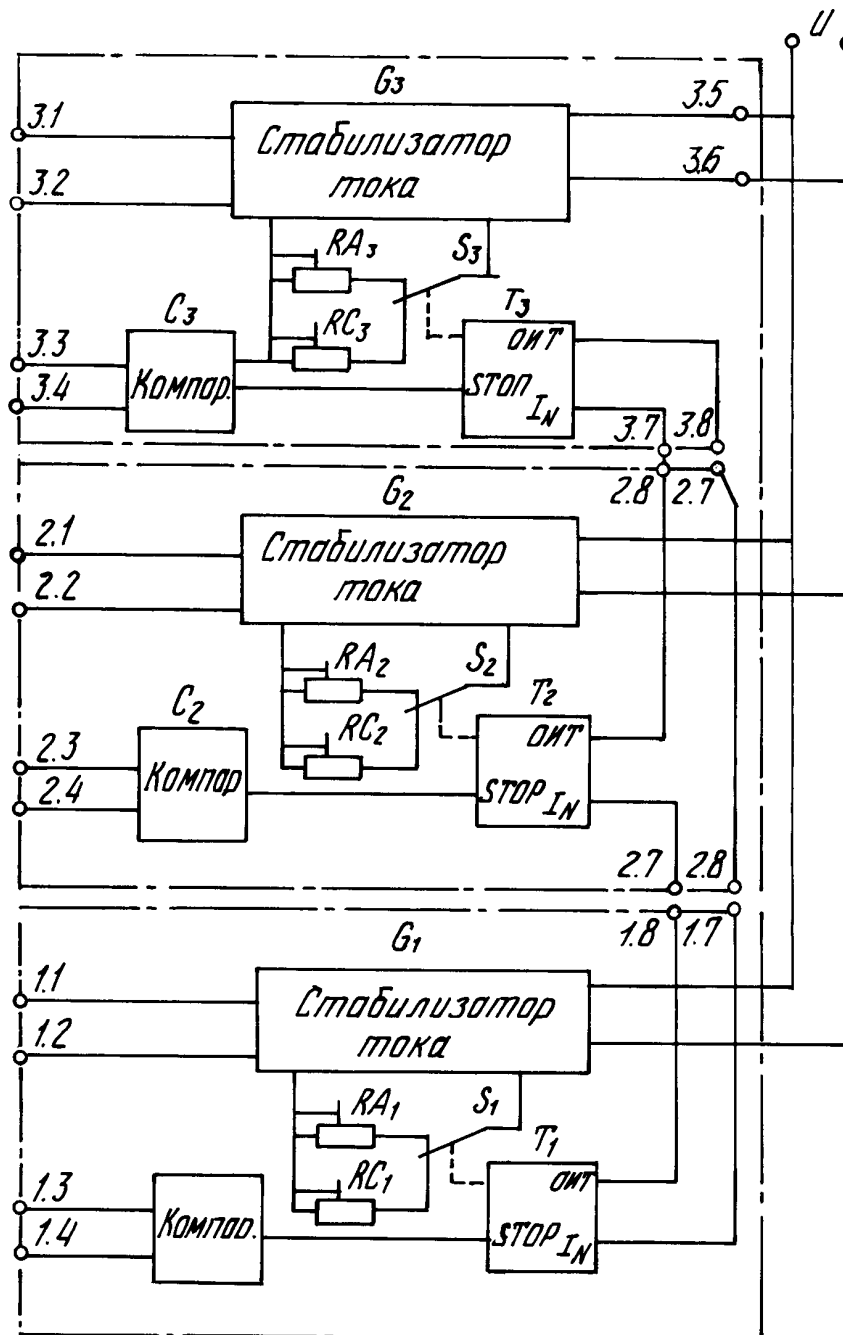


Рисунок 3.4 - Функціональної схеми живлення та керування процесом охолодження об'єкта

Кожен  $i$ -те джерело постійного стабілізованого струму має входи  $i5$ ;  $i6$  напруги живлення  $U$ . Виходи  $i1$ ,  $i2$  постійного стабілізованого струму  $i$ -го каскаду термоелектричної батареї. Інформаційні входи  $i3$ ,  $i4$  для датчика температури акумулятора тепла цього каскаду батареї. До складу кожного  $i$ -го джерела пос-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

тійного стабілізованого струму входять: стабілізатор імпульсний струму і три-мер  $RA_i$ ,  $RC_i$  ручне регулювання струму, двохпозиційний ключ  $Si$ , компаратор  $Ci$  і таймер  $Ti$ . Входи IN і виходи OUT, зазначених таймерів джерел 1,2 і 3 постійного стабілізованого струму певним чином з'єднані між собою.

Керуючий вхід STOP таймера  $Ti$  кожного  $i$ -го джерела постійного регульованого струму підключений до виходу компаратора  $Ci$ , а керуючий вихід таймера  $Ti$  підключений до керуючого входу двоступеневої кнопки  $Si$ . Він також підключається до входів стабілізатора імпульсів і струму, а також до тримерів  $RA_i$ ,  $RC_i$ .

Відповідно до запропонованого способу охолодження описана схема після з'єднання клем кожного  $i$ -гоступеня батареї та виходу датчика температури її теплоаккумулятора відповідно до виходів  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  і. Він є джерелом постійного регульованого струму і діє так, ніби подає напругу живлення  $U$ .

Таймер  $T1$  джерела постійного регульованого струму першого ступеня АКБ за допомогою кнопки  $S1$  переводить стабілізатор 1 у стан, відповідний даному етапу роботи.

При цьому напруга живлення  $U$  перетворюється призначеним стабілізатором 1 в регульований струм через перший каскад акумулятора. Підстроювач  $RA1$  вручну встановлює значення струму  $I_{k.1}$  через термопару першого ступеня батареї. Це відповідає режиму активного відведення тепла через цей ступінь. У точці подачі напруги  $U$  таймери  $T2$  і  $T3$  за допомогою кнопок  $S2$  і  $S3$  підключають тримери  $RC2$  і  $RC3$  до керуючих входів стабілізаторів 2 і 3 відповідно і вручну встановлюють значення цих каскадів в режимі термоключа, для струму через термопару другого і третього ступенів батареї, що відповідає  $I_{k.2}$  і  $I_{k.3}$  відповідно.

Після закінчення інтервалу часу 2.1 після подачі напруги живлення  $U$ , заданої таймером  $T1$ , кнопка  $S1$  підключає підстроювач  $RC1$  до керуючого входу стабілізатора 1, в результаті чого перший ступінь АКБ перемикається в робочий стан. По-перше, в режимі термокнопки вихід OUT цього таймера формує сигнал,

який надходить на вхід IN таймера T2. Цей таймер змінює стан ключа S2, який підключає підстроювач RA2 до керуючих входів стабілізатора 2 і відключає від них підстроювач RC2.

В результаті другий ступінь перемикається з режиму роботи в ключовому тепловому режимі в режим активного радіатора. Підстроювач RC1 встановлює значення струму  $I_{k.1}$ , що відповідає роботі першого ступеня батареї в режимі термовимикача, а підстроювач RA2 через термопару другого ступеня батареї встановлює значення струму  $I_{o.2}$ . Це відповідає режиму активного відведення тепла на цьому етапі.

Після закінчення чергового періоду I2.1, заданого таймером T2, цей таймер змінює стан ключа S2, перепідключаючи підстроювач RC2 до керуючих входів стабілізатора 2, і відключаючи від них підстроювач RA2. У той же час, друга ступінь батареї повертається в режим термокюча і генерує сигнал на виході OUT таймера T2 і на вході IN таймера T3. Цей сигнал змушує таймер T3 змінювати стан перемикача S3, підключаючи підстроювач RA3 до керуючого входу стабілізатора 3 і відключаючи від них підстроювач RC3.

В результаті цього, акумулятор третього ступеня переходить з режиму теплової комутації в режим активного тепловідведення. Підстроювач RA3 задає значення струму  $I_{o,3}$  через термопару третього ступеня батареї. Це відповідає режиму активного відведення тепла через цей ступінь. Після закінчення наступного періоду 3.і, встановленого таймером T3, цей таймер змінює стан перемикача S3, перепідключаючи підстроювач RC3 до керуючого входу стабілізатора 3 і відключаючи від них підстроювач RA3. У той же час, третя ступінь термобатареї знову перемикається в режим термокюча і генерується сигнал на виході Out таймера T3 і на вході IN таймера T1.

Цей сигнал призводить до того, що перша ступінь батареї перемикається з режиму термовимикача, назад в режим активного тепловідведення. Наведений вище цикл роботи ланцюгів живлення акумуляторного каскаду і керування їх роботою потім безперервно повторюється із заданими значеннями струму спо-

живання  $Io.i$  та  $Ik.i$  кожного  $i$ -го каскаду. Можна встановити значення інтервалу часу  $i$ , встановленого таймерами  $T1, T2, T3$ .

Сигнал від датчика температури теплоаккумулятора кожного  $i$ -го ступеня батареї, безперервно подається на вхід компаратора  $Si$   $i$ -го джерела постійного регульованого струму і порівнюється з заданим в компараторі. Необхідна мінімальна температура теплоаккумулятора  $i$ -ї комірки в режимі активного тепловідведення  $Ti \min$ . Як тільки виконується умова  $Ti = Ti \min$  - на виході компаратора  $Si$  з'являється сигнал поточного значення температури теплоаккумулятора, який надходить на вхід таймера СТОП. В результаті таймер  $Ti$  переводить ключ  $Si$  в стан, що відповідає роботі  $i$ -го каскаду батареї в ключовому тепловому режимі.

Для реалізації способу охолодження між каскадами батареї встановлюють теплопровідні акумулятори тепла з датчиками температури на кожному з них, кількість термоелементів у всіх каскадах батареї, починаючи з другого тепловідводної каскаду, роблять однаковим і рівним числу термоелементів в першому тепловідвідними каскаді, не порушуючи послідовного з'єднання термоелементів в кожному каскаді, розривають електричні зв'язки між каскадами батареї, клеми кожного  $i$ -го каскаду батареї підключають до окремого регульованого джерела постійного стабілізованого струму, для кожного  $i$ -го каскаду батареї задаються значеннями.

Для реалізації способу охолодження між каскадами батареї встановлюється теплопровідний акумулятор тепла з датчиком температури в кожному, а кількість термопар у всіх каскадах батареї однакова, починаючи з другого екзотермічного каскаду. Не порушуючи безперервного з'єднання термопар кожного каскаду, не розриваючи електричних зв'язків між каскадами акумуляторів, на клеми кожного  $i$ -го каскаду акумуляторів, подається постійний регульований струм термопари першого каскаду тепловіддачі. окремі регульовані джерела живлення, встановлені значення для кожного  $i$ -го каскаду батареї.

									Арк.
									66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

### 3.4 Розробка системи відводу тепла від термобатарей

Ефективність термоелектричного охолодження зростає зі зменшенням різниці температур між холодним і гарячим спаями термоелектричної батареї, тому при проектуванні побутових термоелектричних холодильників велика увага приділяється раціональному проектуванню системи відводу тепла від спаю.

Для підвищення температури холодних спаїв необхідно забезпечити ефективне підведення до них тепла з холодильної камери. Для цього холодильні камери термоелектричних охолоджувачів, зазвичай, виготовляють з металевого теплопровідного листового матеріалу (наприклад, алюмінієвих сплавів). Одна така стінка камери або жорстко з'єднана з термоелектричною батареєю, або безпосередньо з'єднана через блок теплового спаю.

При цьому вільні (від теплової батареї) стінки холодильної камери, виконують роль радіаторних пластин (ребра). Примусова вентиляція холодильної камери дозволяє істотно збільшити інтенсивність теплообміну в опорній точці. При цьому, холодильна камера може бути виконана з недорогих пластикових матеріалів. Однак примусова система теплопостачання від опорного спаю економічно виправдана лише для холодильників значної потужності.

Для зниження температури гарячих спаїв термоелементів розроблена спеціальна система ефективного відведення тепла. Її вартість має бути виправдана відповідним підвищенням ефективності холодильника.

Всі можливі системи відведення тепла від гарячих спаїв можна розділити на дві групи:

- 1) системи повітряного охолодження;
- 2) системи з застосуванням проміжного теплоносія.

Системи охолодження першої групи, зазвичай, виконуються у вигляді радіаторів, що охолоджуються потоком зовнішнього повітря. Для підвищення інтенсивності охолодження швидкість охолодженого повітря збільшують конструктивними засобами або за допомогою вентиляторів. У холодильниках невеликої

ємності (до 10 л) використовуються спеціальні повітроводи. У холодильниках об'ємом більше 10 л - вентилятори.

Системи повітряного охолодження гарячих спаїв використовуються в холодильниках, де допустима різниця температур між гарячими і холодними спаями не перевищує 30°C.

Коли потрібне більш глибоке охолодження, і необхідна різниця температур між гарячим і холодним спаями перевищує 30 °С, розробляються системи охолодження з використанням проміжних теплоносіїв. В якості проміжного теплоносія, зазвичай, використовується вода. Для водяного охолодження різниця температур між гарячим спаєм термобатарей та холодною водою становить близько 5-8 °С, тоді як для повітряного охолодження різниця температур між гарячим спаєм і зовнішнім повітрям становить 10-12 °С. Він показує, що інтенсивність теплообміну між спаями і водою більша, ніж між з'єднаннями і повітрям.

Проміжна циркуляція теплоносія може бути природною або примусовою. Оскільки примусова циркуляція за допомогою насосів ускладнює конструкцію системи, то більшого поширення набули системи із природною циркуляцією теплоносія через різну питому вагу холодної та гарячої рідини.

У нормальній роботі термоелектричного холодильника існує ефективний тепловий зв'язок між термоелектричною батареєю та об'ємом, що охолоджується (охолоджувані простором), з одного боку, і системою розсіювання тепла – з іншого. Для цього одна зі стінок холодильної камери виконана з алюмінієвого сплаву. Для цього термоелектричного холодильника було обрано процес і відповідну систему відведення тепла.

Суть способу охолодження об'єкта за допомогою термоелектричної каскадної батареї полягає в дискретному охолодженні об'єкта від каскаду до каскаду за рахунок проміжного накопичення тепла в теплоаккумуляторі, при подачі на клему батареї постійного регульованого струму. теплопередача Робота кожного каскаду здійснюється в режимах номінальної холодопродуктивності та термовимикача, тривалість часових інтервалів у цих режимах та сила струму через кас-

									Арк.
									68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

кади регулюються відповідно до температури при виході на усталений режим. об'єктів і регенераторів.

Для отримання достатнього рівня охолодження виконавчі термопари з'єднані послідовно, утворюючи термоелектричну батарею. Однак реалізація цього методу збільшує різницю температур між гарячим і холодним спаями термоелектричної батареї, що різко знижує коефіцієнт охолодження, який визначається відношенням розсіюваного теплового потоку до споживаної електроенергії. .

Найбільш близькими за технічною сутністю та досягнутим ефектом є схеми охолодження з використанням термоелектричних каскадних комірок. Спосіб полягає в передачі тепла від тіла від каскаду до каскаду, коли на клеми батареї подається постійний регульований струм до тих пір, поки батарея не вийде в стаціонарний режим роботи.

Холодні спаї першого каскаду відводять тепловий потік від охолоджуваного об'єкта. Він в сукупності з споживаної цим каскадом електричною потужністю передається на холодні спаї другого каскаду. Тепловий потік, що розсіюється охолодженим тілом, надходить у холодний спай третього ступеня разом із усією потужністю, споживаною першою та другою ступенями, наприклад акумулятором.

Таким чином, кожний наступний каскад батареї, електрично з'єднаний з попереднім йому каскадом, повинен обладувати порівняно з ним більшою холодопродуктивністю.

Для реалізації запропонованого способу охолодження приведено наступну розрахункову схему охолодження. Теплоносій 1 (рис. 3.5) теплообмінюється з теплоакумулятором 2 першого екзотермічного каскаду батареї. Цей теплоакумулятор виконаний у вигляді теплопровідної пластини з ребристою теплоприймаючою поверхнею. Цей тепловий резервуар знаходиться в тепловому контакті з контрольною точкою термопари 3 першого ступеня батареї.

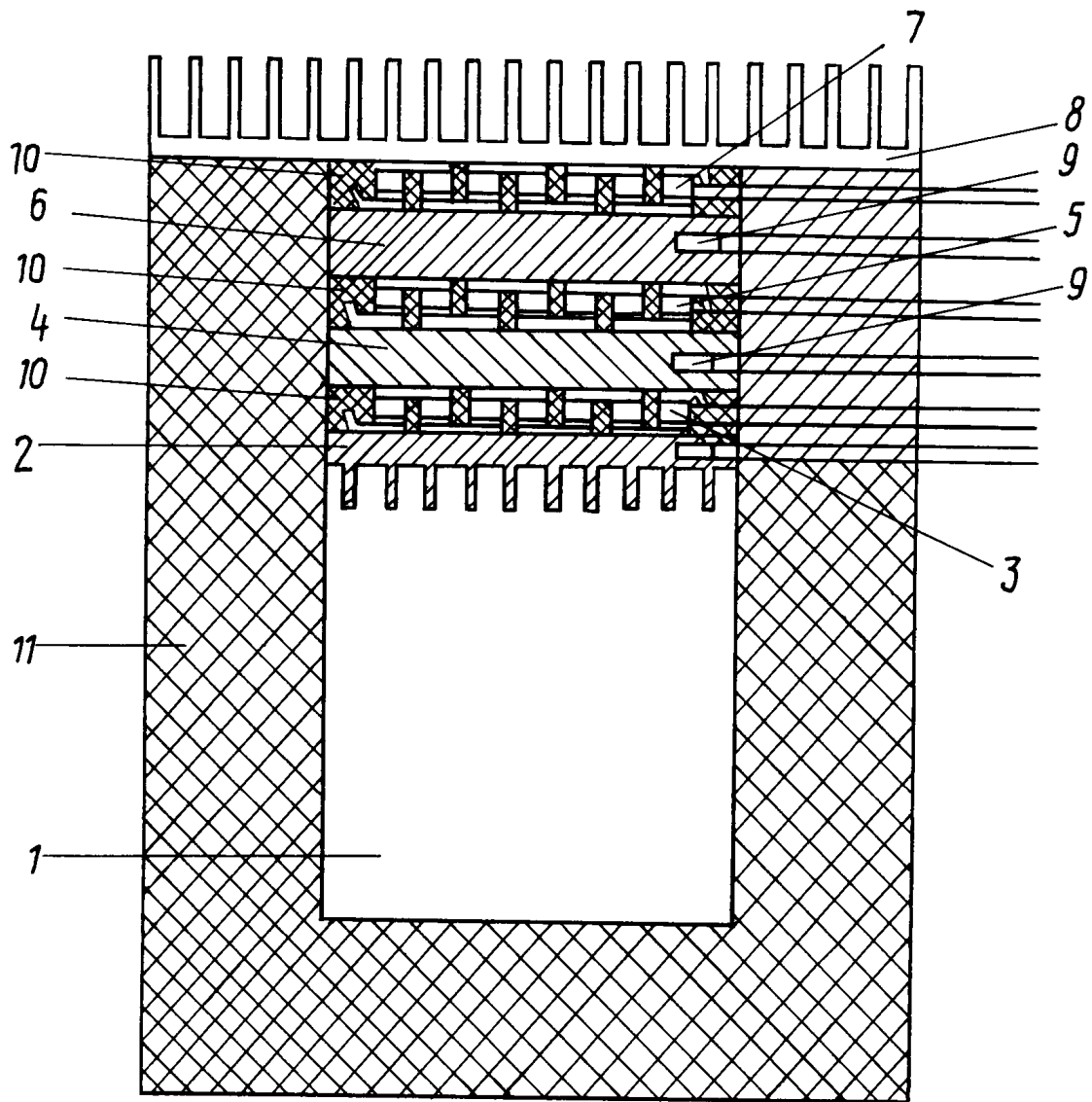


Рисунок 3.5 - Конструктивна схема пристрою для охолодження об'єкта, відповідно до запропонованого способу охолодження

Гарячі спаї термоелементів 5 знаходяться в тепловому контакті з акумулятором тепла 6 третього каскаду батареї, виконаним, наприклад, також у вигляді теплопровідної плити.

Акумулятор тепла 6 також знаходиться в тепловому контакті з холодним спаєм термопари 7 третього ступеня батареї, гарячий спай знаходиться в тепловому контакті з теплопровідним радіатором 8, наприклад, у формі ребристого теплопровідного радіатора. плита. Кожен з цих регенераторів має датчик 9 температури, а простір між регенераторами 2, 4 і 6 заповнений теплоізоляцією 10. У

свою чергу, охолоджуваний об'єкт 1 і термоелектрична батарея оточені тепловою ізоляцією 11.

### 3.5 Розрахунок теплоізоляції шафи термоелектричного холодильника з підбором оптимальної товщини теплоізоляційного шару

Розрахунок теплоізоляції термоелектричного холодильника може бути виведений до визначення необхідної товщини теплоізоляційного шару, який забезпечує достатній термічний опір проникненню тепла в холодильник. Термічний опір теплопередачі, - величина, зворотною загальному коефіцієнту теплопередачі прийнятого огороження.

Товщина ізоляції боковин, підлоги та покриття визначається шляхом математичного моделювання перехідного температурного поля. Враховуючи результати розрахунків геометричних і теплових параметрів холодильника, розраховано товщину дослідження на теплоізоляцію холодильника. Ми проаналізували вартість ізоляції та вартість електроенергії, яку споживає холодильник за конкретний період використання. Оптимальні параметри товщини ізоляції холодильників були підібрані відповідно до споживаного струму.

Вартість електроенергії за строк служби термохолодильника:

$$A_{EL} = N_{EL} \cdot T_C \cdot q_{EL} \text{ (грн)}, \quad (3.1)$$

де  $N_{AE}$  - електроенергія, яка споживається за добу, кВт год/добу ;  $T_C$  - строк служби пристрою (доба);  $q_{EL}$  - вартість електроенергії.,  $q_{EL} = 0,35$  грн/кВт\*год.

Строк служби за добу пристрою:

$$T_C = T_T \cdot 365 \text{ (доба)}, \quad (3.2)$$

									Арк.
									71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

де  $T_r$  - строк служби пристрою в роках,  $T_r = 15$  років.

Електроенергія, яка споживається за добу притсроєм:

$$N_{EL} = (Q \cdot t_c) / (\varepsilon \cdot 1000 \cdot 3600) \text{ (кВт*год/доба)}, \quad (3.3)$$

де  $Q$  - потужність теплового потоку через стінки термохолодильника, Вт;  $t_c$  - кількість секунд на добу (86400);  $\varepsilon$  - холодильний коефіцієнт термохолодильника,  $\varepsilon = 0,96$ .

Потужність теплового потоку через стінки термохолодильника:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \cdot 1,16 \text{ (Вт)}, \quad (3.4)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі через стінку холодильного пристрою, ккал/(год<sup>2</sup> град.);  $F$  - площа бокових стінок холодильного пристрою, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  - перепад температур зовнішнього та внутрішнього повітря (27 град.).

Коефіцієнт теплопередачі через стінки холодильника:

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \text{ ккал/(год*м}^2\text{*град.)}, \quad (35)$$

де  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коефіцієнти тепловіддачі поверхонь стінок холодильника, відповідно від внутрішньої та зовнішньої,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 9$  ккал/(год\*м<sup>2</sup>\*град.);  $\delta$  - товщина шару теплоізоляції, м,  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції.,  $\lambda = 0,02$  ккал/(год м град.).

Площа всіх бічних стінок термоелектричного холодильника, через які відбувається теплообмін з навколишнім середовищем:

$$F = (a \cdot H + b \cdot H + a \cdot b) \cdot 2 \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3.6)$$

						Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

де  $a$  - ширина холодильника  $a = 0,61$  м;  $b$  - глибина холодильника  $b = 0,565$  м;

$H$  - висота холодильника, м.

Зовнішня висота шафи холодильника:

$$H = \frac{V}{((a - 2 \cdot \delta) \cdot (b - 2 \cdot \delta)) + 2 \cdot \delta} \quad (3.7)$$

де  $V$  - внутрішній (корисний) об'єм шафи  $V = 0,2$  м<sup>3</sup>.

Для розрахунків змінювався об'єм внутрішньої камери від 0,2 м<sup>3</sup> до 0,8 м<sup>3</sup>. Визначався оптимальний параметр витрат на ізоляцію та не енергію. Визначували конструктивні параметри термоелектричного холодильника.

Вартість шафи (головна складова - теплоізоляція):

$$A_{ШК} = q_{mi} \cdot m_{mi} \quad (3.8)$$

де  $q_{mi}$  - вартість одного кілограму матеріалу теплоізоляції. (100 грн./кг);  $m_{mi}$  - вага теплоізоляції (кг).

Вага теплоізоляції:

$$m_{mi} = \rho_{mi} \cdot V_{mi}, \quad (3.9)$$

де  $\rho_{mi}$  - щільність матеріалу теплоізоляції, яка використовується  $\rho_{mi} = 50$  кг/м<sup>3</sup>;

$V_{mi}$  - об'єм теплоізоляції, м<sup>3</sup>.

Об'єм теплоізоляції холодильника:

$$V_{mi} = \delta \cdot F \quad (3.10)$$

Розрахунки виконано за допомогою редактора OpenOffice Calc і приведені в додатках.

						Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3.6 Висновки до розділу

На основі аналізу пропонованих конструкцій термоелектричних холодильників зроблено було висновок, що всі конструкції мають ряд переваг та недоліків. Для більш ефективної роботи термохолодильників необхідно здійснити ряд конструктивних змін. Тобто зробити більш досконалу систему автоматичного регулювання включення та виключення термобатарей, та забезпечити більш ефективне відведення тепла від гарячих спаїв для підвищення холодопродуктивності холодильного термоелектричного холодильника.

На основні викладеної методики розрахунку основних геометричних та теплових параметрів холодильника, було розроблено:

- систему додаткового відведення тепла;
- здійснено розрахунок радіатора для відведення тепла;
- здійснено розрахунок теплоізоляції шафи холодильника та підібрано оптимальну товщину теплоізоляційного шару.

## ВИСНОВКИ

Завданням нашої магістерської роботи була розробка каскадного термоелектричного пристрою для підвищення холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта. В результаті проведених розрахунків, та запропонованих конструктивних рішень було покращено систему теплоізоляції між теплообмінниками та підвищено ефективності тепловідведення від гарячих спаїв термоелектричних батарей. Це значно підвищило холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт розроблюваного термоелектричного пристрою.

В результаті проведеної роботи було розроблено конструкцію самого термоелектричного холодильника. Розроблено конструкцію багатокаскадної термоелектричної батареї з метою підвищення холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта розроблюваного термоелектричного пристрою. Розроблено конструкцію відводу тепла від гарячих спаїв термоелектричного холодильника.

Здійснено конструктивний розрахунок енергетичних параметрів термоелектричного пристрою.

За допомогою програми Microsoft Excel визначено оптимальну товщину теплоізоляції, залежно від оптимального споживаного струму.

						Арк.
						75
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## Перелік джерел посилань

1. Анатичук Л.І. Термоелектричний холодильник побутовий. Патент України № 81979. МПК F25B 21/02. А.С. 200604211. Опубл. 25.02.2008.
2. Ащеулов А.А., Романюк І.С. Величук Д.Д., Термоелектричний холодильник. Патент України 30745. МПК F25B 21/02. U200712501. Опубл. 11.03.2008.
3. Анатичук Л.І. Термоелектричний холодильник. Патент України №28678.МПК H01L 35/00.U200703856. Опубліковано 25.12.2007.
4. Анатичук Л.І. Термоелектричний побутовий холодильник. Патент України № 27103. МПК F25B 21/02.A200603526. Опубліковано 25.10.2007.
5. Прилепо Ю.П.. Термоэлектрическая холодильная установка № 2267720. МПК F25B 21/02.
6. Таланкин В.П. Таланкин В.В. Термоэлектрическое устройство для контактного охлаждения поверхностей. Патент 2240478. МКП F25B21/02
7. Анатичук Л.И. Термоелементи та термопристрої. Довідник К.: Наукова думка, 1979. - 767с.
- 8 Термоелектричний холодильник "ХОЛОДОК" ГУ92-01.02054-89 ВАТ "Кварц", г.Черновці, 1989.
9. Холодильник автомобильный переносный "Кварц-10". Керівництво до експлуатації. - Черновці. 1990. - 8с.
10. Sergiy Filin. Thermoelectryczne urzadaeniachlodnicze. IPPU MASTA 2002. 225с.
11. Анатичук Л.И. Термоелементи та термоелектричні пристрої. - Київ.: Техніка, 1989. -767 с.
12. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – К., 1976.
13. G.D. Mahan. Good Thermoelectrics //Solid State Physics. 1998. Vol.51, pp. 81–157.
14. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение состояние и перспективы

									Арк.
									76
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

// Холодильная техника.1999. № 7, с. 12–14.

15. Thermoelectric Materials– New Directions and Approaches

// MRS,Pittsburgh, 1998. V.478. – 348 p.

16. Бараненко А.В. Холодильні машини: Посібн для студенто ВНЗ «Техніка та фізика низьких температур» /Під ред. Л.С. Тимофєвського. – СПб.: Політехника, 1997. – 992 с.

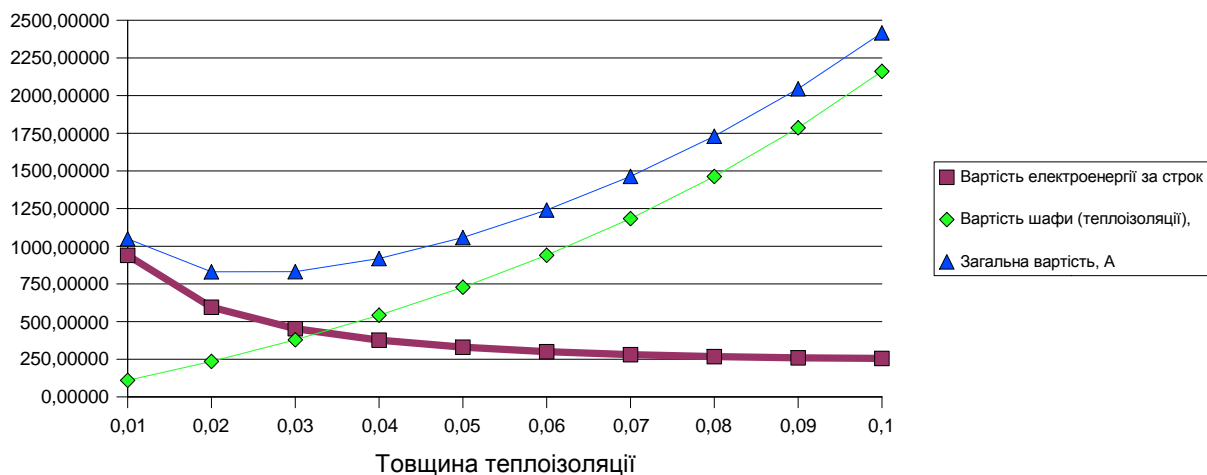
17. Офіційний сайт фірми Kryotherm. Engineering and Production Firm. Thermoelectric Softwarev. 3.0. Код доступу : <http://kryothermtec.com>.

									Арк.
									77
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

ДОДАТКИ

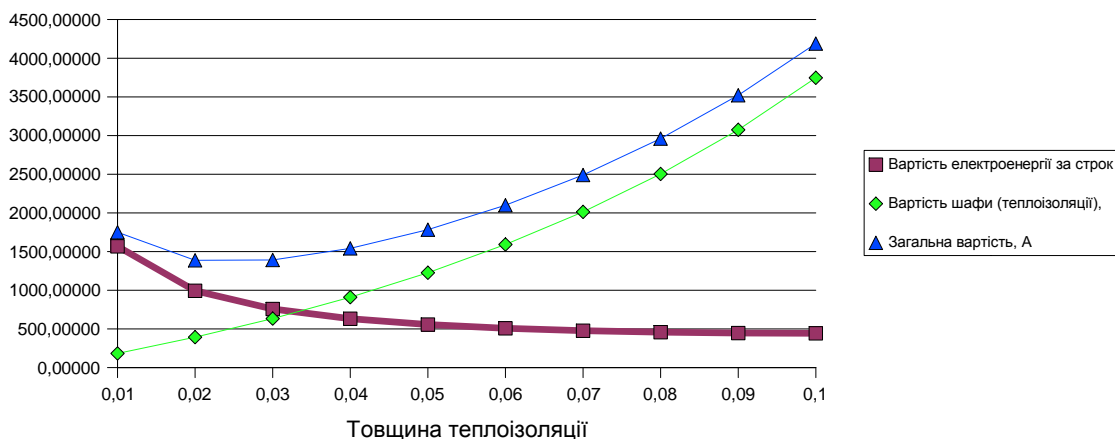
						Арк.
						78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



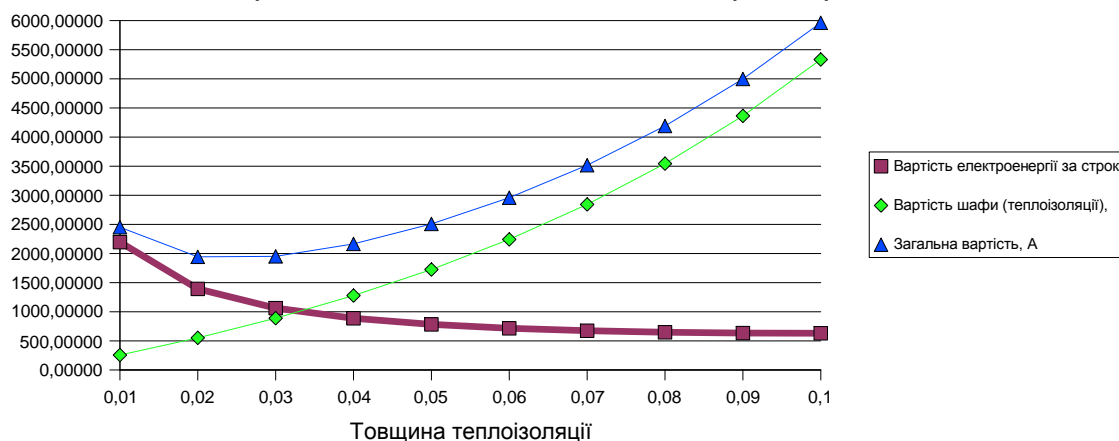
а)

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



б)

### Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



в)

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

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