

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(освітній (освітньо-кваліфікаційний) рівень)

на тему: **Розробка напівпровідникового термоелектричного конвертера
низькопотенціальної теплової енергії.**

Виконав: студент VI курсу, групи ЕТ_м-62

напряму підготовки (спеціальності) 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Шуба К. Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Закордонець В.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Габрусєва І.Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*
(повна назва факультету)

Кафедра *електричної інженерії*
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри *Коваль В.П.*

«» 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
(шифр і назва)

студенту *Шуба Кевін Юрійович*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка напівпровідникового термоелектричного конвертера
низькопотенціальної теплової енергії.*

Керівник роботи *Закордонець Володимир Савич, к.ф.-м.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від *11 жовтня 2024 року № 4/7-988*

2. Термін подання студентом роботи *20 грудня 2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Розробка напівпровідникового термоелектричного конвертера
низькопотенціальної теплової енергії.*

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

- 1. Аналітичний розділ.*
- 2. Проектно-конструкторський розділ.*
- 3. Розрахунково-дослідницький розділ.*
- 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*

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

- 1. Установки низькопотенціальної теплової енергії.*
- 2. Низькопотенціальні теплові машини.*
- 3. Короткозамкнутий термоелектричний генератор.*
- 4. Будова і принцип дії конвертера.*
- 5. Розрахунок електромеханічних характеристик ТЕК.*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. Гурик О.Я.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	к.т.н., доц. Коваль В.П.		

7. Дата видачі завдання

02 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд за напрямком дипломної роботи	16.09.24– 18.10.24	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки дипломної роботи	21.10.24– 01.11.24	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзв. ситуаціях»	04.11.24– 15.11.24	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	18.11.24– 29.11.24	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	02.12.24– 13.12.24	
6	Отримання відгуку та рецензії на дипломну роботу, підготовка доповіді на захист	16.12.24– 20.12.24	

Студент

Шуба Кевін Юрійович

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Закордонець В.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра Шуби Кевіна Юрійовича містить: 71 сторінку, 32 рисунки, 4 таблиці, 34 посилань на першоджерела.

В роботі розроблений новий напівпровідниковий термоелектричний пристрій, який призначений для перетворення розсіяної низькопотенціальної енергії в корисні види. В основу його роботи КТП покладено принцип взаємодії термоелектричного струму, який генерується короткозамкнутим термоелементом із зовнішнім постійним магнітним полем. Показано, що конвертер може працювати в якості механічного приводу в автономних енергетичних системах. Розраховані його основні технічні параметри: електромагнітний момент, частота обертів ротора, механічна потужність і ККД. Здійснена оптимізація величини цих параметрів. Показана можливість роботи пристрою в інших режимах - термопідігрівному і термоохолоджуючому.

Ключові слова: термоелектричний конвертер, низькопотенціальна теплова енергія, теплова машина, термодинамічний цикл Карно.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Термодинаміка перетворення низькопотенціальної теплової енергії	7
1.2 Низькопотенціальні джерела енергії	8
1.3 Нітіноловий тепловий двигун	11
1.4 Перетворення енергії Сонця	14
1.5. Морський тепловий градієнт	18
1.6. Двигун зовнішнього згорання	19
1.7. Механічна енергія морської води	23
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	26
2.1. Термоелектричні ефекти	26
2.2. Розрахункові співвідношення	28
2.3.Короткозамкнутий термоелектричний генератор	33
3. РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Ідеологія побудови конвертера	37
3.2 Будова термоелектричного конвертера	40
3.3 Аналітичний розрахунок теплового режиму ТЕК	41
3.4 Розрахунок технічних параметрів ТЕК	43
3.5 Розрахунок ефективності	48
3.6 Режими роботи ТЕК	50
3.7 Розрахунок магнітної системи	52
3.8 Оцінка величини технічних параметрів	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 .Аналіз шкідливих виробничих факторів, електробезпеки, пожежної небезпеки	61
4.2 .Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

ВСТУП

Майже блискавично, протягом всього лише 20 - го століття, людство бездумно витратило найціннішу сировину, яка утворювалася в надрах земної кори протягом сотень мільйонів років - нафту і вугілля. Витратило не раціонально. Зокрема, близько половини нафти пішла на виробництво тепла та палива для транспортних засобів. Це вкрай негативно вплинуло на довкілля: забруднилося повітря, забруднилися водяні ресурси та постраждав найцінніший шар ґрунту – гумус. Внаслідок вилучення з надр Землі органічного палива виникли великі проблеми, пов'язані як з видобутком органічного палива, так і з його транспортуванням до місця споживання. Звичайно, що найзгубніший вплив на довкілля чинить якраз спалювання органіки, оскільки при спалюванні навіть «чистих» видів палива (газу) утворюється маса шкідливих речовин, які викидаються в повітря. Продукти згоряння зеднуючись в атмосфері з краплями вологи випадають на землю у вигляді кислотних дощів. Викиди продуктів згоряння викопного палива в атмосферу досягли загрозливих масштабів.

Логічно, що одним із найважливіших напрямків розвитку світової економіки в 21 столітті постає завдання пошуку таких технологій виробництва та перетворення енергії, які б унеможливили шкідливий вплив на довкілля. Це, в першу чергу стосується виробництва нової техніки на основі вискоєфективних джерел енергії, зокрема – відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Важливу роль у вирішенні цієї проблеми відіграє також пошук досконаліших термодинамічних циклів та технологічних процесів з малими непродуктивними викидами теплової енергії. Адже зменшення генерації великої кількості теплової енергії (близько 70% світової енергії, яка втрачається в різноманітних технологічних процесах марно), допоможе запобігти можливому глобальному потеплінню та змінам клімату [8,10-12].

У більшості промислово розвинутих країн світу (насамперед ЄС, США та Японії) основою інноваційного розвитку промисловості стала проблема поступового переходу на новий технологічний рівень, який пов'язаний з енергозберігаючими технологіями та, та зменшенням частки використання традиційних енергоресурсів. Так, до кінця 2050 року в цих

країнах понад 60% енергії вироблятиметься за рахунок використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). На відміну від традиційних джерел енергії ВДЕ не руйнують навколишнє середовище та є практично невичерпними. При вдумливому та ощадливому використанні можуть забезпечувати нашу цивілізацію тисячі років без конфліктів за обмежені поклади вуглеводнів. Українські вчені переконані, що перехід на 100% ВДЕ є досяжним та необхідним для України заходом в найближчі 50 років. Це доводять результати як українських так міжнародних досліджень.

Надію вселяє те, що сонячна та вітрова енергетика вже досягли високого технологічного рівня для глобального масового впровадження. Вони дозволять забезпечити потреби в електроенергії, витісняючи традиційні потужності газової і вугільної енергетики. В комплексі з іншими ВДЕ (геотермальна, біоенергетика, гідроенергетика) і технологіями акумулювання та перетворення енергії, можна повністю забезпечити більшість потреб людства в енергії.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є розробка напівпровідникового термоелектричного конвертера низькопотенціальної теплової енергії. Завдання полягає в створенні конвертера, призначеного для перетворення теплової енергії з малим перепадом температур між нагрівачем і охолоджувачем в корисну роботу.

Предмет та об'єкт дослідження. Предметом та об'єктом дослідження є новостворена напівпровідникова термоелектрична тепла машина, призначена для перетворення розсіяної теплової енергії в корисні види.

Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Вперше розраховано технічні параметри інноваційного пристрою, здатного перетворювати низькопотенціальну теплову енергію в корисні види енергії. Практично, конвертор відкриває нові можливості для ефективного використання розсіяної теплової енергії.

Апробація результатів роботи. Результати роботи вперше доповідалися на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-28 грудня 2024., м.Тернопіль. – С.34.

В основу роботи КТП покладено принцип пондеромоторної взаємодії термелектричного струму, який генерується термоелементом з магнітним полем. В моторному режимі КТП може працювати в якості механічного приводу в автономних енергетичних системах. Розрахований електромагнітний момент, частота обертів ротора і механічна потужність пристрою та здійснена їх оптимізація. Показана можливість роботи пристрою в підігрівному і охолоджуючому режимах.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Термодинаміка перетворення низькопотенціальної теплової енергії.

Для роботи теплових машин необхідний нагрівач, і охолоджувач. Від нагрівача, який має температуру T_1 , до охолоджувача, з температурою T_2 кондуктивним шляхом передається тепла енергія. Будемо вважати, що в результаті передачі певної кількості тепла δQ температура охолоджувача підвищилася на dT , а його внутрішня енергія збільшилася на dU . Процес теплопередачі супроводжується виконанням роботи δA . Рівняння теплового балансу термодинамічного процесу має вигляд:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (1.1)$$

Дане рівняння є аналітичним записом першого закону термодинаміки. Тобто, тепла енергія, яка передається системі, йде на збільшення її внутрішньої енергії і на здійснення зовнішньої роботи.

В традиційних теплових машинах елементарна робота при зміні об'єму визначається як

$$\delta A = p \cdot dV. \quad (1.2)$$

Обмін енергією між системами, який пов'язаний зі зміною об'єму, називають деформаційною роботою. Внаслідок збільшення об'єму система виконує роботу проти зовнішніх сил.

Робота, яка виконується системою, при скінченій зміні об'єму робочого тіла в межах від V_1 до V_2 визначається шляхом інтегрування

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p(V) \cdot dV, \quad (1.3)$$

При цьому, аналітична залежність $p(V)$ визначається видом термодинамічного процесу. Отже, деформаційна робота закритої системи у рівноважному процесі дорівнює добуткові тиску на приріст об'єму.

Крім виконання роботи шляхом деформації, можливе виконання роботи в результаті генерації електричного струму. Як впливає із другого начала термодинаміки,

$$\delta Q = dU + dW . \quad (1.4)$$

У випадку термоелектричного перетворення енергії, електрична потужність, яка генерується в охолоджувачі внаслідок термелектричного процесу є різницею між підведеною тепловою енергією і зміною внутрішньої енергії. Причому, електрична потужність має дві складових. Перша складова відповідає за перенос електронів у напрямку, протилежному до напрямку дії термоелектричної електрорушійної сили Зебека

$$W_z = \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.5)$$

де

I - величина струму,

R - опір електричного кола,

а друга відповідає за генерацію тепла Джоуля

$$W_d = I^2 \cdot R . \quad (1.6)$$

Таким чином,

$$W = W_z + W_d . \quad (1.7)$$

1.2. Низькопотенціальні джерела енергії

Перетворити в корисну роботу можна не всю низькопотенціальну теплову енергію але лише певну її частину. Ефективність низькопотенціальної енергії оцінимо розрахувавши його ексергію. Ексергія, це максимальна кількість корисної теплоти, яка може бути перетворена в роботу

$$E = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right), \quad (1.8)$$

де

Q_1 - кількість енергії, яку віддає низькопотенціальне джерело енергії,

T_1 - його температура,

T_2 - температура охолоджувача.

Отримати роботу можливо тільки під час нерівноважного процесу. Для цього необхідна відмінність параметрів нагрівача від параметрів навколишнього середовища. Якщо обмежитися суто практичними задачами, то охолоджувачем найчастіше виступає навколишнє повітря з незмінними параметрами: температурою і тиском.

В природі є великі запаси розсіяної низькопотенціальної теплової енергії, яку можна використати для енергетичних потреб. Джерела низькопотенціальної теплової енергії можна поділити на два типи: природні, та техногенні. До природних джерел належать: природна вода, повітря, ґрунт, і сонячна радіація. До техногенних: повітря систем вентиляції, повітря систем охолодження, стічні води та води, які беруть участь в різноманітних технологічних процесах. Температурний та енергетичний рівень низькопотенціальних джерел наведено в табл.1. 1.

Енергетичний рівень низькопотенціальних джерел енергії

Таблиця 1.1

Вид джерела низькотемпературної теплоти					
Природні джерела теплоти	Температурний рівень джерела, °C	Енергетичний рівень джерела, МВт	Техногенні джерела теплоти	Температурний рівень джерела, °C	Енергетичний рівень джерела, МВт
Вода: поверхнева ґрунтова геотермальна	4...18 6...15 35...70	0,9...51,6 1...2 0,29...3	Вода: стічна технічна технологічна	10...17 15...30 40...70	0,3...90 2,4...10,6 39,5...54,9
Повітря	-5...20	0,3...18,4	Повітря	0...50	0,3...22,1
Ґрунтове середовище	4...12	0,1...5,9	-	-	-
Сонячна радіація	0...75	0,1...150	-	-	-

В низькопотенціальних перетворювачах в якості нагрівача можна вибрати природну воду, повітря, ґрунт, сонячну радіацію, атмосферне повітря в якості охолоджувача глибинні шари води (річок, озер, морів і океанів). Недоліками поверхневих вод як нагрівачів, є проблеми із одержанням енергії у холодну пору року при сповільненому потоці води, а також обмерзання теплообмінників

при температурі близько 0°C . Тому найсприятливішими періодами для використання цього джерела тепла є рання осінь та весна.

Підземні води, які знаходяться в артезіанських колодязях, характеризуються незначними коливаннями температури протягом року, яка становить $11\text{--}12^{\circ}\text{C}$. Ці води можуть використовуватися в якості охолоджувача.

Перспективним джерелом низькопотенціальної енергії є використання геотермальних вод, які іноді можуть використовуватися в якості нагрівача, при цьому атмосферне повітря може виконувати роль охолоджувача. В земній корі є великі запаси геотермальної енергії [9-14]. Зокрема, температура ядра складає понад 6000°C , а швидкість його остигання не перевищує $0,3\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$ за мільйон років [9,10]. Оцінки теплового ресурсу землі показують, що при охолодженні ядра Землі лише на $0,1^{\circ}\text{C}$ можна гарантовано отримати кількість енергії, яка в тисячу разів більша від енергії всіх розвіданих вуглеводнів землі [10-12].

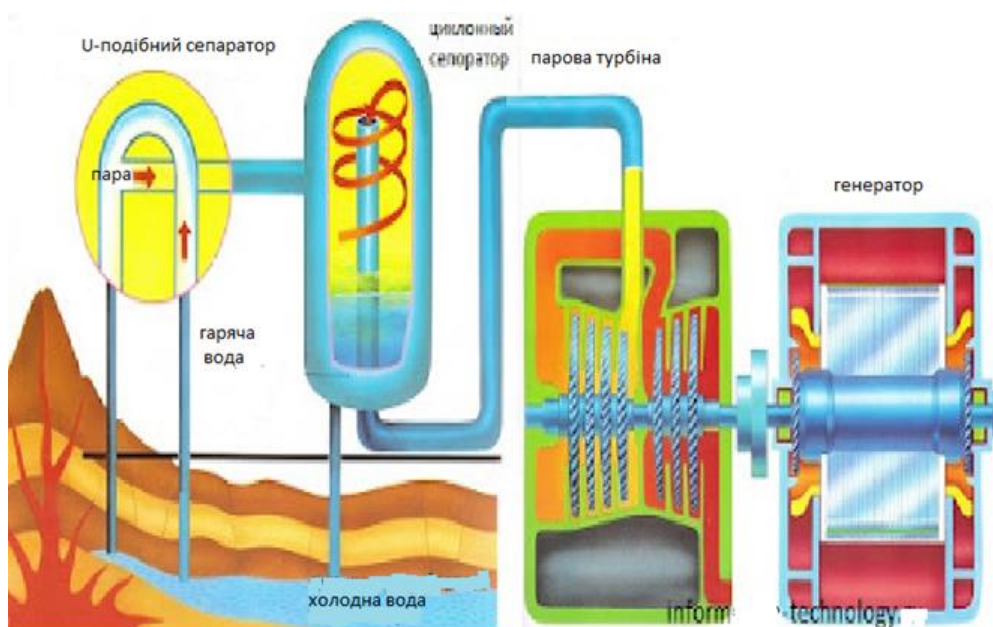


Рис. 1.1. Схема використання геотермальної енергії землі.

Використання навіть сотої долі цієї енергії еквівалентно роботі кількох сотень теплових електростанцій середньої потужності.



Рис. 1.2. Геотермальна теплова електростанція в Ісландії.

1.3. Нітіноловий тепловий двигун (НТД)

Нітінол - сплав двох металів: нікелю – (55%) і титану (45%). Цей сплав має міцність сталі і має властивість пам'яті форми. Зокрема, якщо занурити нітіноловий дріт в холодну воду і зігнути його, то він може залишатися в такому зігнутому стані протягом довгого часу. Але коли дріт перемістити в гарячу воду, то він з великою силою випрямиться і прийме початкову форму. Тобто, можна створити механічну систему перетворення теплової енергії, яка вимагає лише зміни температури. Іншою цінною властивістю нітінолу є здатність нітінолу витримувати велику кількість таких перетворень.

В 1982 році американська компанія ІІТ спроектувала та виготовила низькопотенціальний тепловий двигун, який містив 30 нітінолових петель. Площа поперечного перерізу кожної петлі складав 380 мм^2 . Роль нагрівача виконував резервуар з гарячою водою температурою $t_1 = 55^\circ \text{C}$. Роль холодильника навколишнє середовище з температурою $t_2 = 25^\circ \text{C}$.

Двигун являє собою горизонтально розміщене колесо, рухомо насаджене на вертикальну вісь. З кожної спиці колеса зв'язується підковоподібна нітінолова петля яка може занурюватися у воду. Кінці петлі прикріплені до втулки, яка може переміщуватися вздовж спиці. Коли кожна наступна петля

занурюється у встановлену під колесом гарячу ванну, вона розгинається. Частина виділеної при цьому механічної енергії витрачається на обертання колеса.

В нітіоловому тепловому двигуні поява рушійної механічної сили ґрунтується на термопружних мартенситних структурних перетвореннях [18, 19]. Температура гістерезису нітіолового сплаву складає близько 30 С. В якості нагрівача і охолоджувача можна використовувати резервуари з гарячою і холодною водою, або резервуар з гарячою водою і повітря навколишнього середовища. Звичайно, що перший варіант з енергетичної точки зору кращий. По-перше, збільшується потужність двигуна, а по-друге частота його обертів.

Обчислимо ККД циклу Карно теплової машини, яка працює при температурах нагрівача і холодильника та при перепаді температур відповідно

$$T_1 = t_1 + 273 = 55 + 273 = 328K ,$$

$$T_2 = t_2 + 273 = 25 + 273 = 298K ,$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 328 - 298 = 30K .$$

$$\eta_k = \frac{\Delta T}{T_1} \cdot 100\% = \frac{328 - 298}{328} \cdot 100\% = 9\% .$$

Очевидно, що ККД НТД малий, однак це не повинно стати обмеженням для його використання, оскільки всі теплові машини таким перепадом температури мають однакові термодинамічні обмеження на його величину.

Побудований нітіоловий тепловий двигун без зупинки пропрацював декілька місяців. При цьому він приводив в дію ротор невеликого електричного генератора. За час роботи двигун зробив більше 100 тисяч обертів і розвивав максимальну потужність в *200 Вт*, при частоті обертів ротора 270 об/хв.

Важливою відмінністю теплового двигуна Річарда Бенкса є великий крутний момент на валу при малій частоті обертання ротора.

Звичайно, що ККД нітіолового двигуна не може бути високим внаслідок термодинамічних обмежень - малого перепаду температур між нагрівачем і холодильником і низької температури нагрівача. Бо як у всякої теплової машини він обмежений ККД ідеальної теплової машини.

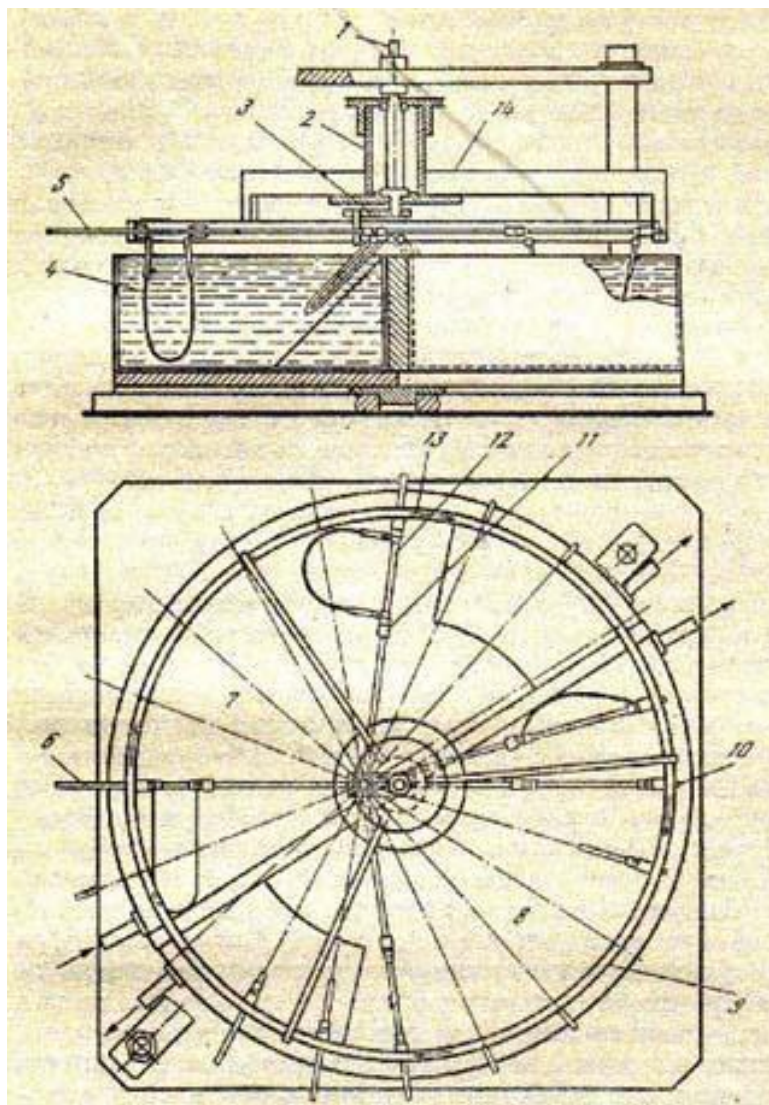


Рис. 1.3. Схема низькопотенціального нітінолового двигуна (вигляд збоку і зверху).

В даний час на понад 100 модифікацій нітінолових двигунів видані патенти. Фахівці зробили висновок, що нітінолові двигуни в недалекому майбутньому зможуть перетворювати теплову енергію більш ощадливо ніж вітрогенератори чи фотоелектричні панелі. Нітінолові двигуни зможуть використати відпрацьоване промисловими підприємствами тепло, на яке зараз йде більше 60 % всієї енергії, і перетворити його в корисну механічну роботу.

Внаслідок особливостей конструкції нітінолові двигуни, в основному, є стаціонарними. Це означає, що вони поки що не зможуть монтуватися на рухомі транспортні засоби. Але не виключено, що в найближчому майбутньому вони викличуть справжній технічний переворот.

1.4. Перетворення енергії Сонця

Енергія на Сонці виробляється в результаті реакцій термоядерного синтезу, в результаті якого атоми водню перетворюються в атоми гелію з виділенням величезної кількості енергії. Вивільнена енергія випромінюється в космос у вигляді електромагнітних хвиль різної частоти. Найголовніша перевага сонячної енергії полягає в тому, що вона є доступною, практично невичерпною, екологічно чистою та відновлюваною.

Сонячні батареї можна встановлювати в сільській і гірській місцевості, а також у важко доступних місцях, забезпечуючи електроенергією житлові будинки. Існує безліч причин, чому сонячна генерація стає все більш затребуваною.

В даний час використовується три способи використання сонячної енергії: теплові колектори, фотоелектричні панелі, сонячні концентратори. Кожен із цих способів використовує різні підходи та технології для захоплення, перетворення та подальшого використання сонячної енергії.

Сонячний тепловий колектор – пристрій для поглинання енергії випромінювання Сонця в тепло. На відміну від сонячних фотоелектричних панелей, сонячний колектор здійснює нагрів теплоносія. Згодом, теплоносієм використовується для обігріву приміщення.

Плоскі колектори виготовляються у вигляді плоских водяних баків, які розміщуються на дахах житлових будинків або інших спорудах [1, 2]. Оскільки концентрація сонячної радіації порівняно невелика, то для уловлювання задовільної кількості сонячної енергії розміри колекторів повинні бути великими. Наприклад, в південних районах України, розміри колектора, який зможе забезпечити потреби приватного будинку в енергії складає близько 40м^2 . При цьому, кількість енергії, яка реально може бути вловлена, перетворена і використана залежить від конструкції колектора і конвертера, який перетворює сонячну радіацію в корисні види енергії.



Рис. 1.4. Плоский тепловий колектор.

Найпростіша конструкція плоского колектора являє собою чорний металевий лист, знаходиться в тепловому контакті з прямокутним водяним резервуаром. Лист поглинає теплову енергію, яка згодом тепло передається воді. Колектори такого типу забезпечують нагрів води до 65-90 °С. При цьому їх ефективність може сягати 80%.

В колекторах складніших конструкцій використовують ряд паралельних труб діаметром 14 -16 мм, які знаходяться в тепловому контакті з металевим колектором і розміщені з інтервалом 40- 160 міліметрів одна від одної. Корпус теплового колектора виготовляється пластику. Зовні корпус ізолюється ізоляторами тепла.

Нагрівачі води часто використовуються в приватних житлових будинках, системах централізованого постачання гарячої води, лікарнях, спортивно-оздоровчих комплексах і т.. Зараз в світі використовується понад 5 мільйонів сонячних водонагрівачів. Виробництво сонячних водонагрівачів у промислових масштабах налагоджено в багатьох розвинутих країнах: в США, ФРН, Франції, Австралії, та ін.. Сонячну енергію економічно вигідно використовувати в регіонах, які мають понад 2000 годин на рік сонячного випромінювання. Сонячні нагрівачі води дуже популярні внаслідок надійності, низької

собівартості та простотої конструкції [2]. Широке використання сонячної енергії стало символом 21 - сторіччя.

Колектори-концентратори мають значно складнішу конструкцію. Їх використовують для нагрівання теплоносія до високих температур [2, 3]. Встановлені у фокусі великої кількості параболічних дзеркал, сонячні колектори концентрують сонячне випромінювання на трубках з водою) (рис. 1.2). По трубках циркулює вода, яка кипить і випаровується. Згодом, перегріта пара подається на турбогенератор, який виробляє електроенергію.



Рис. 1.5. Колектори-концентратори сонячного випромінювання.

Основна проблема полягає в тому, що електроенергія може генеруватися тільки у світлу пору доби. Тому, як правило, на сонячних електростанціях застосовують змішані технології. Вдень вода нагрівається сонячною енергією, а вночі за допомогою спалювання в котлах природного газу.

В сонячних фотоелектричних панелях, сонячна енергія напряму перетворюється в електричну при допомозі фотоелектричних елементів [4].



Рис. 1.6. Сонячна фотоелектрична електростанція.

Зазвичай, панель складається із скляної плити, з тильного боку якої між двома шарами герметизуючої плівки укладені фотоелементи. Фотоелементи електрично з'єднані між собою електропровідними металевими шинами. Верхній і нижній шар герметизуючої плівки захищений шаром захисної плівки. На внутрішній частині корпусу сонячної панелі змонтований блок комутації, в якому знаходяться електричні контакти, призначені для підключення інших модулів.

Сонячні панелі виготовляються різних розмірів та типів. Найпоширенішими з них є кремнієві фотоелектричні панелі потужністю 15-360 Вт. 360 Ват відповідає піку генерації при яскравому сонці. Одна сонячна панель має розмір - 2 м². Для того, щоб отримати велику електричну потужність, панелі між собою з'єднують. Наприклад, 100 модулів по 150 Вт, з'єднані разом, еквівалентні потужності 15000 Вт.

ККД сучасних модулів знаходиться в інтервалі 5-20%. Це значить, що 5-20% від всієї кількості теплової енергії, яка попадає на панель, буде конвертовано в електричну енергію. Передові світові електротехнічні лабораторії розробляють панелі з ККД до 45%. Вартість виготовлення також є важливою. Зокрема, застосування тонкоплівкових технологій дозволить значно знизити вартість фотоелементів і фотомодулів.

На сьогоднішній день, сумарна потужність всіх встановлених в світі сонячних панелей склала понад 830 ГВт, що відповідає майже 3 % світової генерації електроенергії. [4].

1.5. Морський тепловий градієнт

Перспективним видом відновлюваних джерел енергії, є використання енергії морського теплового градієнта, який виникає між верхніми та глибинними шарами води [7, 8]. Градієнт виникає внаслідок нагрівання Сонцем поверхні води.

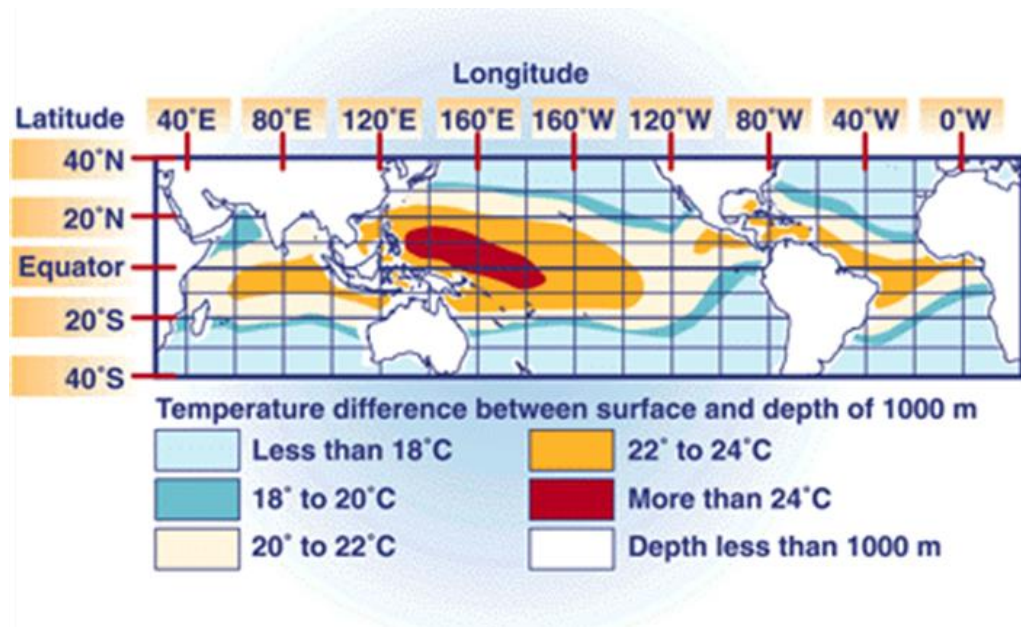


Рис. 1.7. Розподіл різниці температур між поверхнею і на глибині 1000 м. в різних районах Світового океану.

Морські градієнтні теплові машини використовують різницю температур на поверхні океану та в глибині.

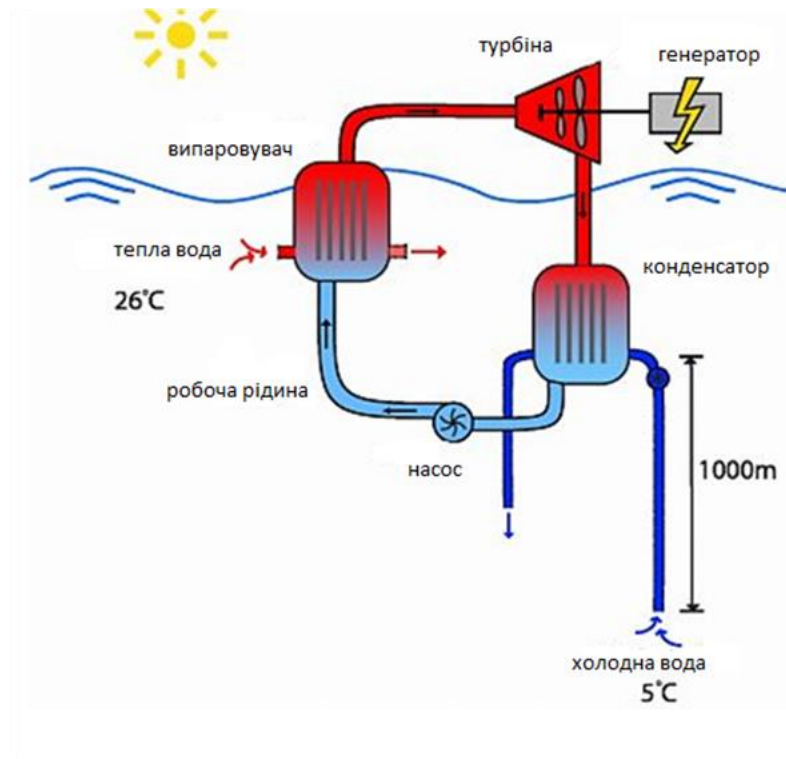


Рис. 1.8. Схема дії морської ТЕС.

На представленому рисунку наведений наближений розподіл різниці температур води між поверхнею і на глибині 1000 метрів. Для цього проаналізована більшість локацій Світового океану.

Оцінки показують, що при використанні лише 1 % енергії вертикального перепаду температур південних морів тропічного океану на площі до $4 \cdot 10^7 \text{ км}^2$ можна стабільно забезпечити генеруючі потужності до 2000ГВт.

1.6. Двигун зовнішнього згорання

Теплова машина Стірлінга, це один з різновидів теплових машин, в основі роботи яких лежить рух газоподібного робочого тіла у замкнутому об'ємі. В основі його роботи лежить періодичний рух теплової енергії від нагрівача до охолоджувача.

Двигун Стірлінга є тепловим двигуном зовнішнього згорання [15-20] (ДЗЗ). ДЗЗ, це клас двигунів, в яких камера згорання палива відокремлена від робочого тіла, на відміну від двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), в яких паливо згорає в камері згорання. Двигун зовнішнього згорання вперше був запропонований на прчатку XIX століття британцем Р. Стірлінгом. Спочатку, до його масового використання в техніці відносилися з прохолодою, адже

популярними стали двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Однак, в кінці ХХ століття інтерес до двигунів зовнішнього згоряння спалахнув з новою силою. Зараз, провідні компанії світу удосконалюють старі і розробляють нові конструкції двигунів.

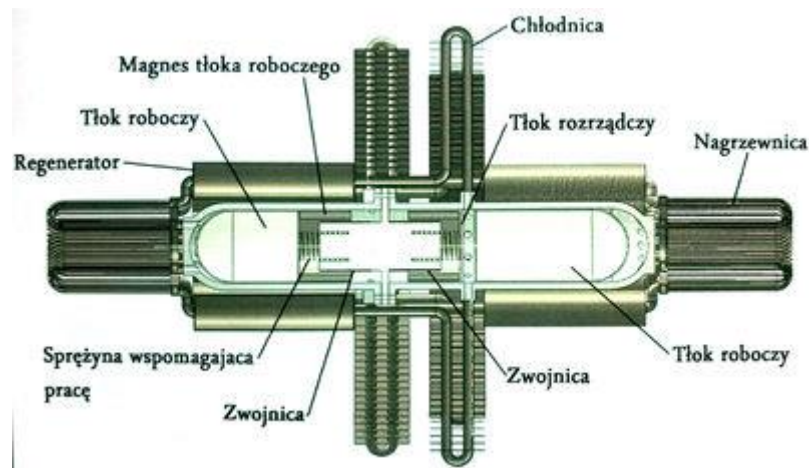


Рис. 1.9. Будова двигуна Стірлінга сучасної конструкції.

Конструкція та будова ДЗЗ, зважаючи на відсутність в ньому газорозподільчого механізму, клапанів, стартера та інших механізмів, характерних для ДВЗ є набагато простішою від ДВЗ. Причому для роботи годиться будь-яке джерело теплової енергії [19,20]. Це може бути і сонячна енергія, і відходи сільського господарства, і викопні вуглеводні і атомна енергія. Не зважаючи на простоту будову та абсолютну невибагливість до палива двигуни Стірлінга не поступається за потужністю та продуктивністю ДВЗ.



Рис. 1.10. Зовнішній вигляд ДЗЗ Стірлінга

Робочий цикл пристрою визначається отриманою із зовні тепловою енергією, причому джерело цієї енергії не важливе. Враховуючи цю особливість, ДВЗ Стірлінга ідеально підходить для використання низькопотенціальної теплової енергії, а також геліоенергетиці.



Рис. 1.11. Серійний ДЗЗ Стірлінга потужністю 1 кВт

Внаслідок використання для виготовлення ДВЗ передових матеріалів та технологій, вдалося довести його ККД до 65-70% від циклу Карно [19,20].

П'єзоелектричний тепловий двигун (ПЕТЕД) є одним із видів теплових машин, які працюють при малому перепаді температури [23]. Для перетворення теплоти в механічну роботу ПЕТЕД одночасно використовує п'єзоелектричний ефект та ефект пам'яті форми. ПЕТЕД має вал, який може обертатися, і радіально розташовані нітінолові важелі. Важелі виготовлені з матеріалу, що має властивість пам'яті форми. Важелі сполучені з п'єзоелементом при допомозі електродів. Електроди, через систему важелів періодично деформують п'єзоелектричні елементи. Кінцевий результат – процес перетворення теплової енергії в механічну.

Термоелектричний насос (ТЕН), це теплова машина, яка перетворює теплову енергію електропровідної рідини в кінетичну енергію потоку [24]. В ТЕН в межах одного пристрою органічно об'єднані електромагнітний насос і короткозамкнутий термоелектричний генератор. Традиційні електромагнітні насоси використовуються для прокачування електропровідної рідини. Вони працюють від зовнішніх джерел електричного струму. Термоелектричний насос для своєї роботи не потребує зовнішнього живлення. Він діє за рахунок внутрішньої теплової енергії гарячої електропровідної рідини, яку і прокачує. Таким чином Тен є свого роду конвертером теплової енергії в механічну. Для оцінки його ефективності справедливі всі термодинамічні обмеження, справедливі для теплових машин, однак ТЕН має деякі корисні відмінності:

- неперервність роботи, поки існує перепад температури;
- можливість роботи в широкому діапазоні температур;
- відсутність фізичного контакту з навколишнім середовищем, що дозволяє його використовувати для охолодження активної зони ядерних реакторів у космосі [36].

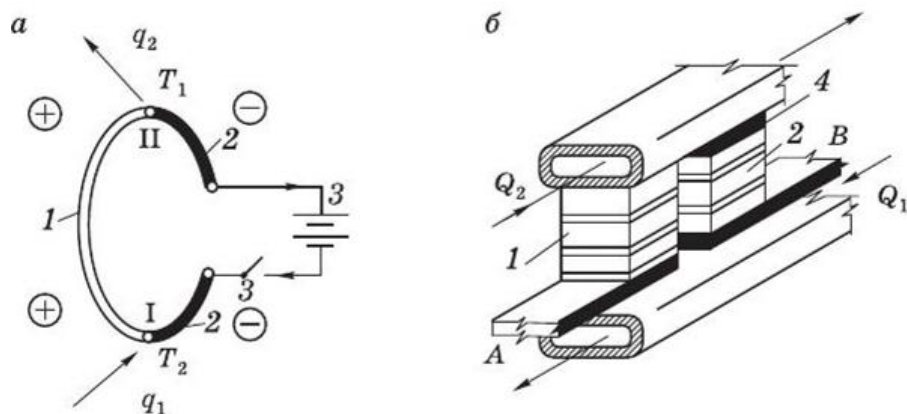


Рис. 1.12. Ілюстрація принципу роботи та схема конструкції ТЕН.

Принцип роботи та схема конструкції ТЕН показана на рис. 1.15. ТЕН є термоелектричним генератором, вітки якого з одного боку за допомогою спеціальних комутаційних пластин з'єднані послідовно, а з другого замкнуті на металеві трубки в яких знаходиться електропровідна рідина. З'єднані металевими комутаційними шинами вітки 1 і 2, утворюють електричне коло. В

результаті цього утворюється термоелектричне коло, яке працює при температурі нагрівача і охолоджувача відповідно T_1 , і T_2 . При комутації полюсів ТЕН через термоелектроди та комутаційні шини протікає термоелектричний струм. Так як рідке електропровідне робоче тіло знаходиться в зовнішньому магнітному полі, то на нього діє сила Ампера, яка надає йому кінетичну енергію і приводить в рух.

1.7. Механічна енергія морської води

За найоптимістичнішими оцінками, морські хвилі генерують до 2 ТВт енергії. Це вдвічі перевищує сукупний обсяг генерації електроенергії на землі. Ідея використання енергії морських хвиль є дуже привабливою, внаслідок їх високої енергоємності. Так, наприклад, у випадку хвиль п'ятиметрової висоти питома погонна потужність складає 1 МВт на кожен метр. Звідси видно, що питома енергетична потужність води на кілька порядків перевищує питому потужність сонячної і вітрової енергетики. На думку фахівців, хвилі Світового океану можуть задовольнити до четверті енергетичних потреб людства.

В основу роботи морських електростанцій покладений принцип дії хвиль на певні механізми. В ролі останніх можуть бути: лопаті турбін, приводи насосів, маятники, та ін.. В кінці кінців, рух морських хвиль приводить в обертовий рух ротор електричних гідрогенераторів. Отримана внаслідок цього електроенергія транспортується через морські кабелі споживачам [5].



Рис. 1.13. Поплавкова морська електростанція

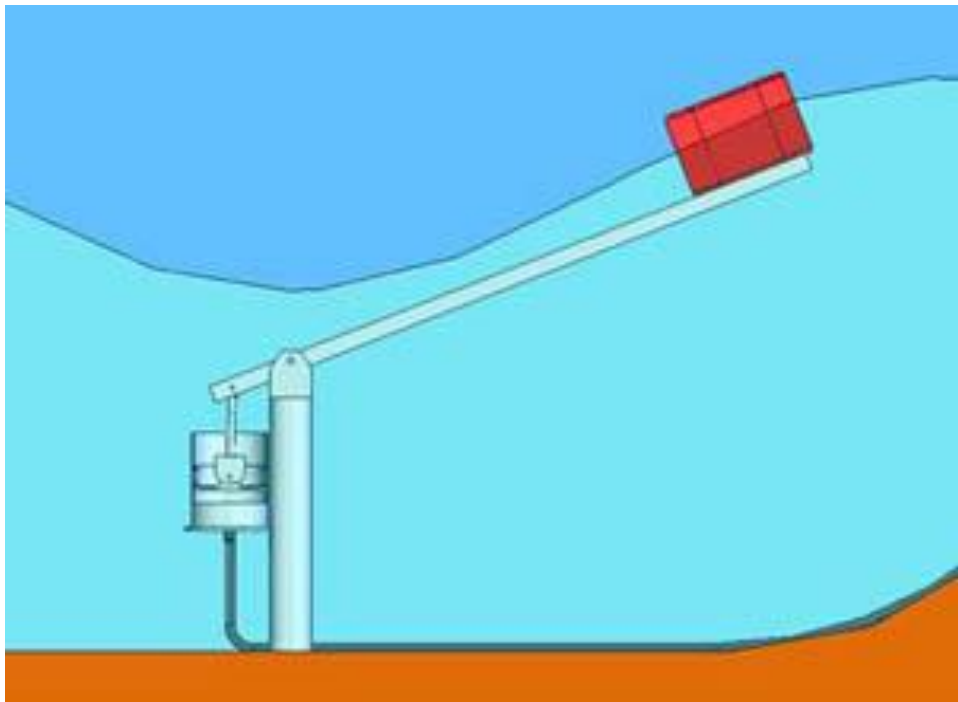


Рис. 1.14. Перетворення енергії морських хвиль за допомогою гідронасоса.

1.8. Вітрова енергія

Вітрові електростанції генерують електричну енергію за рахунок перетворення кінетичної енергії повітря [6]. Вітровий електричний генератор разом з редуктором поміщений в герметичний контейнер і знаходиться на щоглі високо над поверхнею землі. До осі редуктора приєднані лопаті. Контейнер електростанції повертається подібно флюгеру повертається в напрямку вітру. Велика проблема вітрових електростанцій полягає в непостійності, а часто у відсутності вітру. Це призводить до стрибків потужності вітрогенерації. Для стабільнішої роботи вітрових електростанцій вони обладнуються електричними акумуляторами. По цій же причині створюють вітрогенеруючі комплекси в яких електростанції сполучають в єдину енергетичну систему.



Рис. 1.15. Вітрові генератори на щоглах

Вітроелектростанції будуються в місцях з рівнинним рельєфом, де дмуть постійні і сильні вітри. Світовим лідером у побудові та використанні вітрових електростанцій є Федеративна Республіка Німеччини. Тут, за останні десятиліття побудували і будується тисячі електростанцій загальною потужністю понад *12000 MBm*.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Термоелектричні ефекти

Термоелектричне перетворення енергії, як метод прямого перетворення теплової енергії в електричну, ґрунтується на термоелектричних ефектах, які виникають в твердих тілах: ефект Зеебека, Пельтьє, Томпсона та інші. Унікальні властивості термоелектричних джерел енергії, зокрема - відсутність рухомих частин, можливість використання низькопотенціальної теплової енергії, повна екологічна чистота і зручність в управлінні, забезпечили незаперечні переваги у використанні термоелектричних генераторів як автономних джерел енергії.

Ефект Зеебека є об'ємним ефектом. Він лежить в основі всіх термоелектричних перетворень енергії. Його суть полягає в тому, що між кінцями розімкнутого електричного кола, яке складається з двох послідовно з'єднаних напівпровідникових зразків з різним типом провідності, виникає термо-ЕРС. Така конструкція називається термопарою. Термоелектричний ефект Зеебека можна пояснити наступним чином. Якщо один з кінців напівпровідникового зразка n-типу провідності підтримувати при вищій температурі T_1 , а інший при нижчій T_2 , то електрони на гарячішому кінці будуть мати більшу кінетичну енергію і швидкість ніж на холоднішому. В результаті цього, вони будуть рухатися в бік холодного кінця, заряджаючи його негативно. Гарячий кінець зарядиться позитивно.

Крім того, в напівпровідниковому матеріалі із збільшенням температури концентрація вільних електронів буде збільшуватися і на гарячому кінці їх буде більше ніж на холодному. В результаті дії вказаних факторів, в електронному напівпровіднику в напрямку від гарячого до холодного кінця виникне градієнт концентрації електронів. При цьому, на гарячому кінці буде накопичуватися позитивний заряд. Процес розділення зарядів буде тривати доти, доки виникаюча різниця потенціалів не спричинить зворотний потік електронів, який скомпенсує первинний. Коефіцієнт термо-ЕРС описується залежністю:

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{kT} - \zeta \right), \quad (2.1)$$

де

k - постійна Больцмана,

e – заряд електрона,

$\bar{\varepsilon}$ – середня кінетична енергія електрона,

$\zeta = \eta/kT$ - приведений хімічний потенціал,

η - хімічний потенціал електронів.

Описаний механізм в діркових напівпровідникових матеріалах протікає аналогічно. Різниця полягає в тому, що в діркових напівпровідниках на гарячому кінці накопичуються негативні заряди. Тому, в термоелементі, який містить послідовно сполучені напівпровідникові вітки з дірковим і електронним типом провідності термо-ЕРС віток буде додаватися. Сумарна термо-ЕРС термоелемента описується залежністю:

$$E_{te} = (\alpha_n + \alpha_p) \cdot (T_1 - T_2) = \alpha_{pn} (T_1 - T_2), \quad (2.2)$$

де

α_p - коефіцієнт термо-ЕРС зразка p - типу провідності,

α_n - коефіцієнт термо-ЕРС зразка n - типу провідності,

$\alpha_{pn} = \alpha_p + \alpha_n$ - диференціальний коефіцієнт термо-ЕРС термопари.

Ефект Пельтьє є поверхневим ефектом. Його суть полягає у тому, що при проходженні постійного струму через термопару, в місці контакту напівпровідникових зразків виділяється або поглинається тепло (в залежності від напрямку струму) [27]

$$P_{II} = \Pi_{pn} I, \quad (2.3)$$

тут

$\Pi_{pn} = \alpha_{pn} T$ – коефіцієнт Пельтьє,

T – температура контакту,

I – сила струму.

Причиною виникнення тепла Пельтьє є перехід електронів через контакт в напрямку з матеріалу p -типу до матеріалу n -типу. В місці контакту різнотипних напівпровідників формується потенціальний бар'єр. Якщо електрони долають потенціальний бар'єр, то в місці контакту забирають

енергію енергію від кристалічної ґратки. Контакт охолоджується. При зміні напрямку струму на протилежний в місці контакту додатково буде виділятися тепло Пельтьє. Кристалічна ґратка буде нагріватися.

Ефект Томсона полягає в тому, що під час проходження струму через напівпровідниковий зразок в якому створено градієнт температури, додатково до тепла Джоуля виділяється (поглинається в залежності від напрямку струму) деяка кількість теплоти

$$P_T = \tau \cdot I \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

тут

τ – коефіцієнт Томпсона,

ΔT – різниця температур між кінцями зразка,

I – сила струму.

Механізм виникнення ефекту Томпсона із залежністю енергії вільних електронів від температури. Тоді, на гарячому кінці напівпровідникового зразка електрони будуть мати вищу енергію, ніж на холодному. Концентрація вільних електронів при підвищенні температури також збільшиться. Внаслідок цього виникне потік електронів від гарячого кінця до холодного. На гарячому кінці накопичиться позитивний заряд, а на холодному - негативний. Перерозподіл зарядів перешкоджає потоку електронів і за певної різниці потенціалів зупиняє його.

2.2. Розрахункові співвідношення

Якщо термоелемент замкнути на зовнішній опір величиною R , то згідно із законом Ома в інтегральній формі в термоелектричному колі виникне струм

$$I = \frac{E_{te}}{R + r_{te}}, \quad (2.5)$$

де

$r_{te} = r_p + r_n + r_k$ - внутрішній опір термоелемента,

r_p - опір вітки p - типу провідності,

r_n - опір вітки n - типу провідності,

r_k сумарний опір комутації,

$R+r_{te}$ - загальний опір термоелектричного кола.

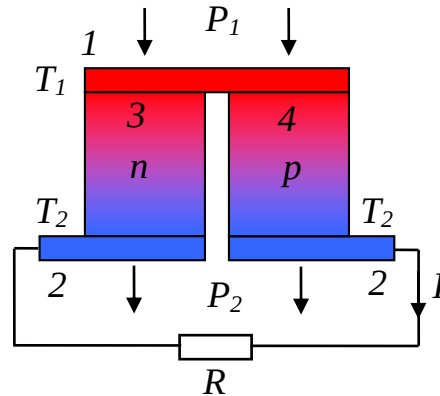


Рис. 2.3 Термоелемент із зовнішнім навантажувальним опором.

1 –холодний колектор тепла, 2 – гарячий колектори тепла, 3 – вітка термоелемента n -типу провідності, 4 – вітка термоелемента p - типу провідності.

Сумарний опір комутації можна записати у вигляді відносного опору

$$m_p = \frac{r_k}{r_p + r_n}, \quad (2.6)$$

а опори віток у вигляді

$$r_{te} = (\rho_p + \rho_n) \cdot (1 + m_p) \frac{l}{S}, \quad (2.7)$$

де

ρ_p питомий опір вітки p - типу провідності,

ρ_n - питомий опір вітки n - типу провідності,

S – площа поперечного перерізу вітки,

l – довжина вітки,

$$M = \frac{R}{r_{te}}, \quad (2.8)$$

відносний коефіцієнт навантаження.

Враховуючи введені позначення формулу (2.4) можна представити у вигляді

$$I = \frac{E_{te}}{r_{te}} \frac{1}{(M + 1)}, \quad (2.9)$$

При цьому напругу на зовнішньому опорі матиме вигляд

$$U = E_{te} \frac{M}{(M+1)}. \quad (2.10)$$

Тепер можна знайти корисну електричну потужність, яку генерує термоелектричний генератор

$$P_{te} = U \cdot I = \frac{E_{te}^2}{r_{te}} \frac{M}{(M+1)^2} = \frac{\alpha_{pn}^2 (\Delta T)^2}{(1+m_\rho) \cdot (\rho_p + \rho_n) \frac{l}{S}}. \quad (2.11)$$

Термоелектричний генератор можна розглядати як теплову машину з твердим робочим тілом. Роль робочого тіла тут відіграє електронний газ. Як і роботу теплової машини з газоподібними робочим тілом роботу термоелектричного генератора можна описати формулами термодинаміки. Щоб це зробити, треба виразити перепад температур між нагрівачем і охолоджувачем, параметри напівпровідникових матеріалів а також їх геометричні розміри через вхідний та вихідний теплові потоки в термоелементі. При відсутності струму, та при умові адіабатичної ізоляції бічних граней віток потік теплової енергії через термоелектричний елемент визначається сумою теплових потоків через обидві вітки. Як випливає із закону Фур'є

$$P_\kappa = \Delta T (\kappa_p + \kappa_n) \frac{S}{l}. \quad (2.12)$$

де

κ_p - коефіцієнти теплопровідності вітки р – типу провідності,

κ_n – коефіцієнти теплопровідності вітки n- типу провідності.

При генерації струму і його протіканні через термоелектричні стовпчики в їх об'ємі виділяється джоулеве тепло потужністю

$$P_j = I^2 r_{te}. \quad (2.13)$$

Крім цього, на гарячому кінці стовпчиків поглинається

$$P_1^\Pi = I \alpha_{pn} T_1, \quad (2.14)$$

а на холодному кінці виділяється потужність Пельтьє

$$P_2^\Pi = I \alpha_{pn} T_2, \quad (2.15)$$

В рамках побудованої математичної моделі вважатимемо, що половина потужності Джоуля кондуктивним шляхом йде до гарячого, а друга половина

до холодного кінця. В такому наближенні баланс теплової потужності на гарячому і холодному стовпчиках матиме вигляд

$$P_1 = P_1'' + P_\kappa - \frac{1}{2} P_j, \quad (2.16)$$

$$P_2 = P_2'' + P_\kappa + \frac{1}{2} P_j, \quad (2.17)$$

Оскільки потужність, яка переноситься теплопровідністю (кондуктивна складова) не залежить від струму, то потужності P_1 і P_2 доцільно записати у вигляді

$$\frac{P_1}{P_\kappa} = 1 + \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)(1 + m_\rho)} \frac{1}{M + 1} \left[T_1 - \frac{\Delta T}{2(M + 1)} \right], \quad (2.18)$$

$$\frac{P_2}{P_\kappa} = 1 + \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)(1 + m_\rho)} \frac{1}{M + 1} \left[T_2 - \frac{\Delta T}{2(M + 1)} \right], \quad (2.19)$$

Величину, яка характеризується лише параметрами напівпровідникового матеріалу зразка, і не залежить від його розмірів називають термоелектричною добротністю

$$Z = \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)}, \quad (2.20)$$

а величину, яка крім вказаних параметрів враховує опір термоелектричних стовпчиків

$$Z_{te} = \frac{Z}{(1 + m_\rho)}, \quad (2.21)$$

добротністю термоелемента.

Керуючись законом збереження енергії потужність, яку генерує термоелектричний елемент можна знайти як різницю між підведеним і відведеним потоками тепла

$$P_{te} = P_1 - P_2. \quad (2.22)$$

Коефіцієнт корисної дії термоелемента будемо шукати із закону збереження енергії, як відношення корисної потужності до повної

$$\eta = \frac{P_{te}}{P_1} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M/(M+1)}{1 + \frac{M+1}{z_{te} T_1} - \frac{\Delta T}{2T_1} \frac{1}{M+1}}. \quad (2.23)$$

Перший множник в формулі (2.23) описує термодинамічний коефіцієнт корисної дії (циклу Карно). Другий множник враховує ефективність термоелектричного перетворення енергії, зокрема, його зменшення за рахунок незворотних втрат в термоелектричному матеріалі.

Для генерації максимальної електричної потужності необхідно максимізувати функцію (2.11) по параметру відносної величини навантаження. Розв'яжемо рівняння

$$\frac{dP_{te}}{dM} = \frac{E_{te}^2}{r_{te}} \frac{d}{dM} \left(\frac{M}{(M+1)^2} \right) = 0. \quad (2.24)$$

Очевидно, що максимальна генерована електрична потужність буде досягатися при величині відносного навантаження $M=1$

$$P_{te}^{\max} = \frac{E_{te}^2}{4r_{te}}. \quad (2.25)$$

Такий режим роботи може бути реалізований при рівності величини опору навантаження внутрішньому опору термоелемента $R = r_{te}$. Очевидно, що при цій умові величина ККД буде рівною

$$\eta_p = \frac{\Delta T}{T_1} \cdot \frac{1}{\frac{4}{(z_{te} T_1)} + 2 - \frac{\Delta T}{2T_1}}. \quad (2.26)$$

Розглянемо роботу термоелемента в режимі максимального коефіцієнта корисної дії. Максимальний коефіцієнт корисної дії знайдемо з рівняння [28]

$$\frac{d\eta_{te}}{dM} = 0. \quad (2.27)$$

Диференціюючи отримаємо

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M_0 - 1}{M_0 + \frac{T_2}{T_1}}, \quad (2.28)$$

де введені позначення

$$M_0 = \sqrt{1 + z_{te} T_c}, \quad (2.29)$$

навантажувальний коефіцієнт

$$T_c = \frac{(T_1 + T_2)}{2} \quad (2.30)$$

середня температура.

2.3. Короткозамкнутий термоелектричний генератор.

Багатоелементний термоелектричний генератор має велику кількість послідовно з'єднаних термоелементів. Інколи, для забезпечення підвищеної надійності, приєднуються паралельні вітки.

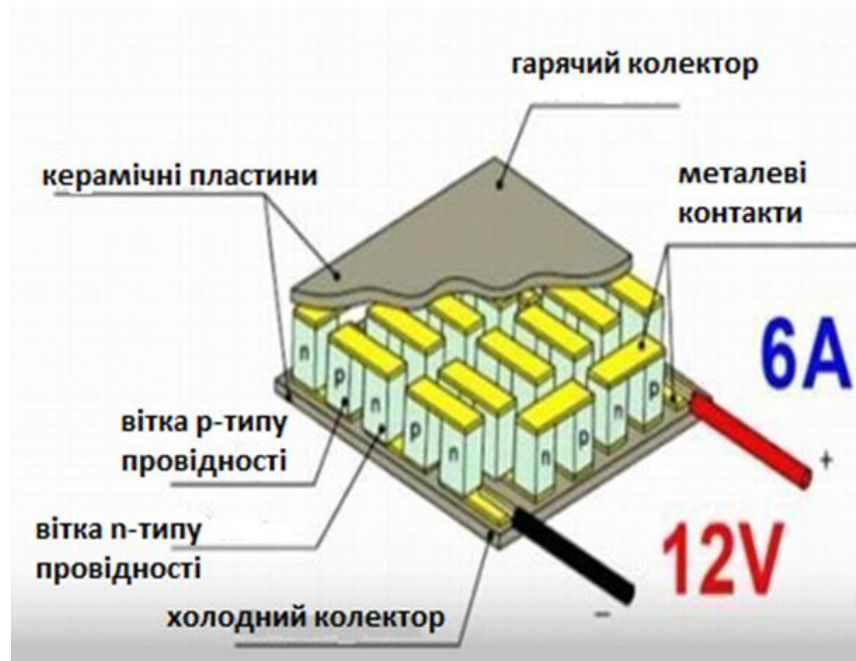


Рис. 2.4 - Схема багатоелементного ТЕГ.

Кожен з термоелементів знаходиться в контакті з гарячим і холодним тепловими колекторами. При цьому, в місці контакту виникають паразитні термічні опори і омичні опори на яких витрачається деяка частина згенерованої електроенергії.

В короткозамкнутих ТЕГ така проблема відсутня, бо вони складаються лише з двох термоелектричних віток, n – типу і p – типу провідності [19]. Площа поперечного перерізу термоелементів КТЕГ досягає площі термобатарей.

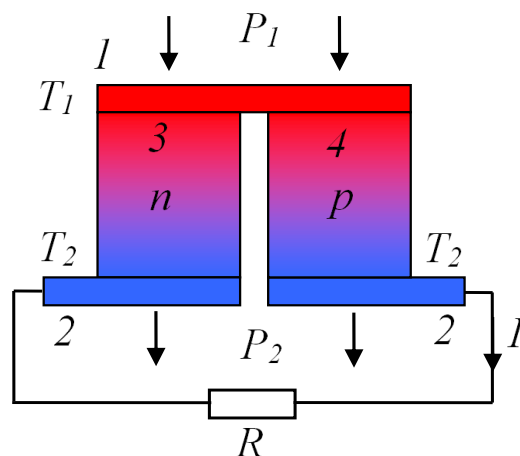


Рис. 2.5 Схема КТЕГ. 1 і 2 – гарячий та холодний колектори тепла, 3 – термоелемент n – типу, 4 - термоелемент p- типу.

Внаслідок особливостей конструкції КТЕГ має велику площу термоелементів і дуже малий електричний опір. В результаті цього, при низькій напрузі генерації (соті долі вольт), та малому опорі навантаження можна отримати струми у сотні, а іноді і в тисячі ампер [27, 28].

КТЕГ, як правило, використовуються в термоелектричних насосах, для живлення електромагнітів, в конвертерах – перетворювачах низьковольтної напруги та ін.

В короткозамкнутих термоелектричних генераторах вироблена електрична енергія нікуди не передається, оскільки величина струму може складати сотні і навіть тисячі ампер при низькій напрузі. Отримана електроенергія тут же споживається, перетворюючись в інші види енергії. Для створення адекватного теплового режиму роботи короткозамкнутого термоелектричного генератора застосовують пасивну або активну схему охолодження. Важливою відмінністю короткозамкнутих термоелектричних генераторів відсутність в них традиційних комутаційних спаїв та шарів електричної ізоляції. Крім того, елементи корпусу генератора часто є одночасно провідниками струму, теплопроводами, несучими конструкціями і кріпленнями. Тому можуть грати роль тепловідводу і зовнішнього пасивного радіатора. Часто, короткозамкнутому термоелектричному генераторі напрям згенерованого має напрям теплового потоку.

Температурний та енергетичний ресурс низькопотенціальних джерел теплової приведені в таблиці 2.1.

Найбільш поширені джерела низькопотенціальної теплової енергії

Таблиця 2.1

Вид джерела низькотемпературної теплоти					
Природні джерела теплоти	Температурний рівень джерела, °C	Енергетичний рівень джерела, МВт	Техногенні джерела теплоти	Температурний рівень джерела, °C	Енергетичний рівень джерела, МВт
Вода: поверхнева грунтова геотермальна	4...18 6...15 35...70	0,9...51,6 1...2 0,29...3	Вода: стічна технічна технологічна	10...17 15...30 40...70	0,3...90 2,4...10,6 39,5...54,9
Повітря	-5...20	0,3...18,4	Повітря	0...50	0,3...22,1
Грунтове середовище	4...12	0,1...5,9	-	-	-
Сонячна радіація	0...75	0,1...150	-	-	-

1. Короткозамкнутий термоелектричний генератор має ряд конструктивних особливостей зокрема, поперечний струмопровідних шин, які одночасно є колекторами тепла вибирають таких розмірів, щоб втрати електричної потужності і струму вздовж замикаючого контура не були більшими 5-10%. Джерелами тепла в короткозамкнутих термоелектричних генераторах можуть бути колектори сонячної радіації, джерела низькопотенціальної теплової енергії, контейнери з радіоізотопами та ін.. Якість електричних і теплових контактів напівпровідникових стовпчиків з металевими контактними поверхнями теплопровода і електричними шинами забезпечується традиційними методами: пайкою; притисканням; зваркою; тощо. Спаї КОТЕК можна охолоджувати як за допомогою зовнішніх радіаторів, так і рідиною, яка прокачується по трубках, які пронизують конструкцію ТЕГ. Для термостабілізації робочої температури «холодного» колектора КОТЕК може бути застосована система теплових трубок, з'єднаних з пасивним радіатором великої площі.

Переваги ТЕК очевидні. Це в першу чергу підвищення термодинамічного коефіцієнта корисної дії термоелектричного генератора внаслідок відсутності втрат в комутаційних та ізоляційних шарах. По друге, різко знижується вартість робіт на комутацію сотень і тисяч термоелементів для отримання напруги хоча б кілька десятків вольт для живлення електродвигунів. В недалекому майбутньому, ТЕК можна буде використовувати в термоелектричних перетворювачах потужністю в сотні і тисячі кіловат.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Ідеологія побудови конвертера

Традиційно теплову енергію перетворюють в електричну за допомогою термоелектричних генераторів (ТЕГ) [27, 28]. Однак, можливості ТЕГ, які працюють в умовах малого температурного градієнту дуже обмежені. При обчисленні ККД термоелектричного перетворення теплової енергії в електричну потрібно враховувати конструкцію конкретного термоелектричного генератора. Зокрема, слід брати до уваги додаткові втрати тепла та в електричній комутації термоелементів і втрати в теплоізоляційних прокладках, розміщених між термоелементами. Як відомо, для практичних потреб в широко використовуються багатоелементні конструкції ТЕГ. Це продиктовано тим, що приймачі електроенергії мають робочі напруги в декілька десятків вольт, в той час, як напруга, яку генерує окремий термоелемент лежить в межах десятих долей вольта. Тому, для нормальної роботи приймача необхідно з'єднувати їх в послідовне електричне коло.

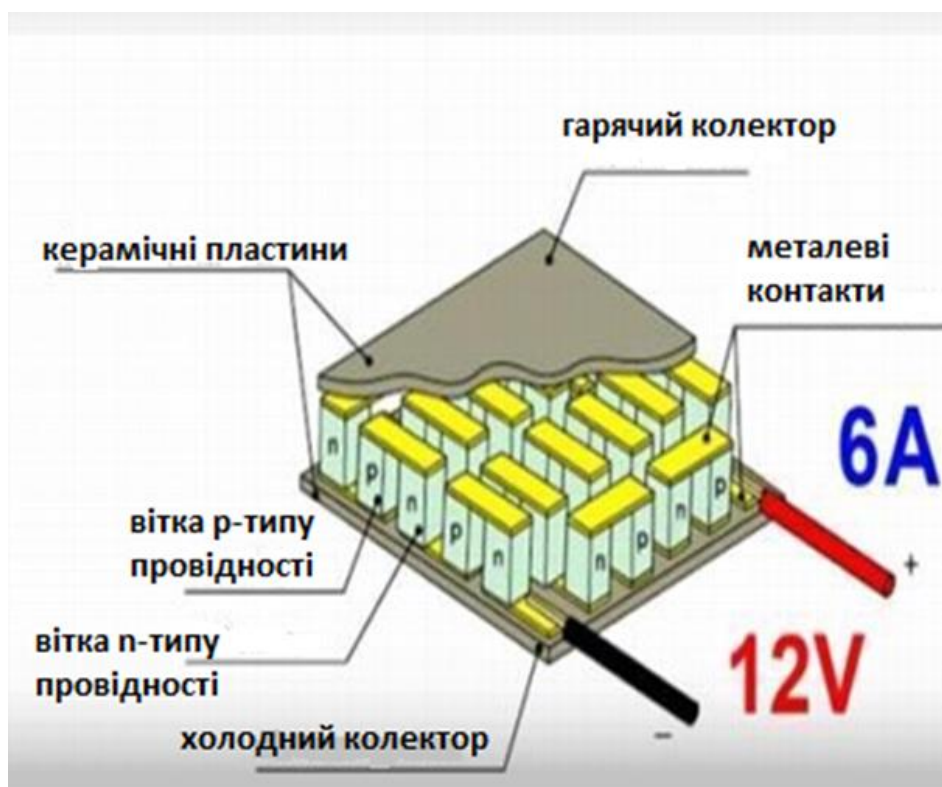


Рис. 3.1. Будова термоелектричного генератора.

Враховуючи сказане, генератор повинен мати велику кількість окремих термоелементів, які з'єднані між собою по струму послідовно, а по теплу - паралельно. ККД конкретного ТЕГ визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{MZ_g \Delta T_g}{(M+1)^2 \left[1 + \frac{Z_g T_1}{(M+1)} - \frac{Z_g \Delta T_g}{2(M+1)^2} \right]}, \quad (3.1)$$

де

$$\Delta T_g = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \Delta T_i \right]}{m} \quad (3.2)$$

- середній перепад температури, m — кількість послідовно з'єднаних елементів у гілці, M - відносне корисне навантаження, ΔT_i — перепад температури на i - тому термоелементі гілки, T_i середня температура гарячого з'єднання i - того термоелемента,

$$Z_g = \frac{\sum_{i=1}^m (\alpha_i \Delta T_i)^2}{(1+m_\sigma) \cdot (1+m_\kappa) \Delta T_g \sum_{i=1}^m (\sigma_i)^{-1} \sum_{i=1}^m (\kappa_i)^{-1} \Delta T_i} \quad (3.3)$$

- термоелектрична добротність генератора, α_i , σ_i , κ_i - середні коефіцієнти переносу (термоерс, електропровідності та теплопровідності) термоелементів.

Якщо температурні умови роботи окремих термоелементів однаковий, то (3.2) можна записати у формі

$$Z_g = \frac{Z_m}{(1+m_\sigma) \cdot (1+m_\kappa)} \quad (3.4)$$

де

Z_m — термоелектрична добротність матеріалу,

m_σ - безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати електричної енергії на комутаційних спаях,

m_κ - безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати теплової енергії на ізоляційних шарах та елементах конструкції.

Сумарні втрати електричної потужності, зумовлені непродуктивними технологічними втратами в конструкції можна подати в формі [28]

$$P_0 = P \frac{M}{2} \frac{r_0}{r_i} n^2 \quad (3.5)$$

тут

P —електрична потужність ТЕГ,

M —відносне навантаження ТЕГ;

r_0 —внутрішній опір термоелемента;

r_i —опір ізоляції термоелемента;

n —кількість термоелементів в ТЕГ.

До того часу, поки виконується критерій

$$\frac{r_0}{r_i} n^2 \ll 1, \quad (3.6)$$

електричні втрати потужності невеликі. Однак, при виконанні умови

$$\frac{r_0}{r_i} n^2 > 1, \quad (3.7)$$

Непродуктивні втрати потужності і зниження ККД будуть досить великими, і їх треба враховувати. Тому ТЕГ має певні обмеження на число послідовно з'єднаних термоелементів.

В світлі сказаного стають очевидними переваги короткозамкнутої конструкції термоелектричних генераторів [28].

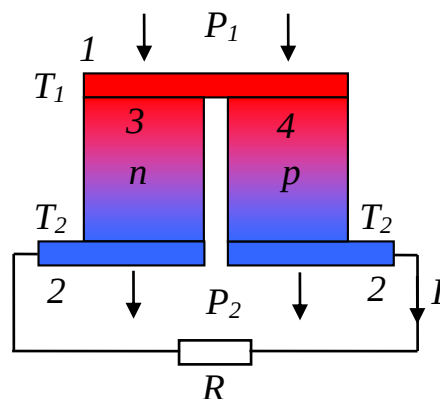


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд короткозамкнутого ТЕГ .

Це, в першу чергу, продиктовано збільшенням, внаслідок відсутності комутаційних та ізоляційних шарів термодинамічного ККД, висока надійність, простота і дешевизна виготовлення ТЕГ в цілому. Проте, короткозамкнуті ТЕГ застосовуються не часто. В основному, через малу напругу генерації і неможливість передачі без великих втрат до приймача струмів великої сили (десятки ампер). У світлі сказаного, найбільш перспективними, з точки зору високоефективного перетворення низькопотенційної енергії, міг би стати напівпровідниковий термоелектричний конвертер низькопотенціальної теплової енергії запропонований у [31,32]. В ньому, процес генерації, передачі і споживання термоелектричної потужності інтегровано в одному пристрої.

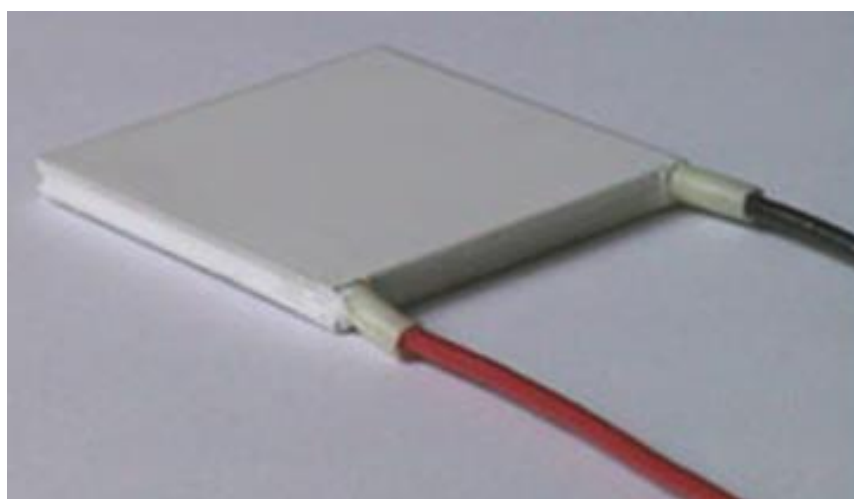


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд сучасного ТЕГ малої потужності.

3.2 Будова термоелектричного конвертера

Принцип дії напівпровідникового термоелектричного конвертера низькопотенціальної теплової енергії пояснюється схемою, приведеною на рисунку 3.3. Тут, провідний феромагнітний ротор 7, рухомо закріплений в циліндричному статорі (6) таким чином, щоб він мав можливість обертатися навколо провідної осі (4). В роторі, за допомогою магнітної системи, в напрямку перпендикулярному до його поперечного перерізу збуджується магнітне поле індукції B (магнітна система на схемі не показана). Струм, який генерується короткозамкнутим термоелементом, вздовж провідної шини підводиться до осі обертання, а потім, через низькоомні контакти на ротор. Внаслідок циліндричної симетрії ротора, струм по ньому розтікається

радіально. Пара сил Ампера F_a приводить ротор в обертовий рух, напрям якого визначається за правилом правого гвинта, та одночасно залежить від напрямків струму в роторі та магнітної індукції

$$F_a = IBr, \quad (3.8)$$

де

I – струм, що підводиться до ротора,

B – магнітна індукція,

r – радіус ротора.

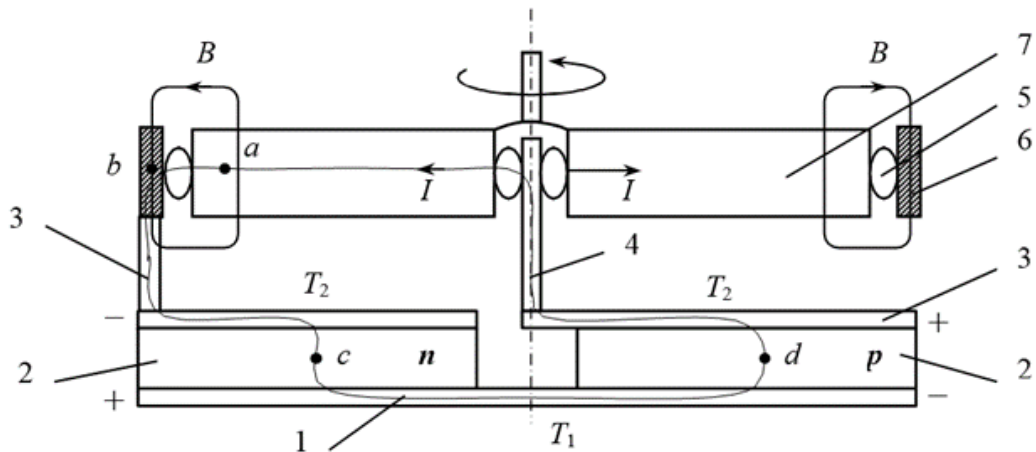


Рис. 3.4. Принципова схема напівпровідникового термоелектричного конвертера низькопотенціальної теплової енергії.

1 – колектор тепла,

2 - термоелементи обох типів провідності,

3 – комутаційна мідна шина,

4 - провідна вісь,

5 - низькоомні контакти,

6 - статор,

7 – ротор.

3.3. Аналітичний розрахунок теплового режиму ТЕК

На тепловій схемі ТЕК, джерело тепла описується перепадом температури ΔT . Як видно із теплової схеми вітки n – типу провідності вітки p – типу провідності по потоку тепла з'єднані паралельно. На схемі це зображено у вигляді двох паралельних віток з термічними опорами θ_n і θ_p між джерелом

тепла з температурою T_1 і джерелом холоду з температурою T_2 . Слід зазначити, що термічні опори залежать від струму. Причому, вони зменшуються при збільшенні струму, і збільшуються при зменшенні струму. Термічні опори, на яких падає деяка частина термічного перепаду ΔT , представлені на рисунку у вигляді послідовно сполучених з віток.

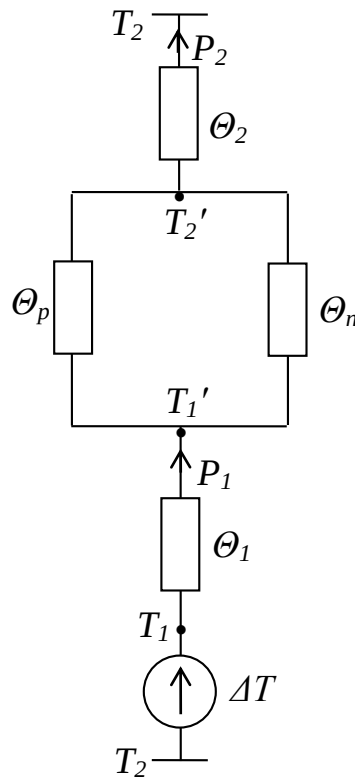


Рис. 3.5. Еквівалентна теплова схема ТЕК

ΔT – різниця температури між нагрівачем і охолоджувачем,

θ_1 – тепловий термічний опір між нагрівачем і гарячим з’єднанням термоелемента,

θ_2 – тепловий термічний опір між холодильником і холодним з’єднанням термоелемента.

θ_n - тепловий термічний опір вітки і електронного типу провідності,

θ_p - тепловий термічний опір вітки діркового типу провідності.

Використовуючи еквівалентну теплову схему ТЕК на основі методу електротеплової аналогії [26] знайдемо еквівалентний термічний опір між нагрівачем і холодильником

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_{pn}, \quad (3.9)$$

де

$$\Theta_{pn} = \frac{\Theta_p \Theta_n}{\Theta_p + \Theta_n} \quad (3.10)$$

- еквівалентний опір паралельного з'єднання теплових термічних опорів,

Знайдемо перепад температури між спаями

$$\Delta T' = \Delta T \frac{\Theta_{pn}}{\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_{pn}}, \quad (3.11)$$

де

$$\Delta T = T_1 - T_2,$$

$$\Delta T' = T_1' - T_2'$$

T_1 - температура нагрівача,

T_2 - температура холодильника,

T_1' - температура гарячого спаю ТЕК,

T_2' - температура холодного спаю ТЕК.

Зрозуміло, що реальна різниця температур між спаями та різниця температур між нагрівачем і охолоджувачем завжди буде меншою. Це викликано наявністю теплових втрат та ізоляції.

3.4. Розрахунок технічних параметрів ТЕК

Розглядатимемо КНПТЕ як своєрідний термоелектричний генератор, який не має традиційного омичного опору, який приєднаний до його полюсів. Роль опору виконує ЕРС індукції, яка виникає в роторі при його обертанні в магнітному полі, і направлена назустріч термоелектричному струму. Для розрахунку технічних параметрів конвертера використаємо еквівалентні схеми заміщення :електричну (рис.2а) і теплову (рис.2б).

Роботу термоелектричного конвертера можна описати при допомозі першого рівняння Максвелла та узагальненого закону Ома в диференціальній формі

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.12)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \alpha \sigma \nabla T, \quad (3.13)$$

де

$\vec{E}$ – вектор напруженості електричного поля,

$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ – магнітний потік, який пронизує поперечний переріз ротора,

$\vec{B}$ – вектор магнітної індукції,

$\vec{j}$ – вектор густини струму,

$S = \pi r^2$ – площа перерізу, і r – радіус ротора.

σ – коефіцієнт електропровідності,

α_{pn} – диференціальний коефіцієнт термоЕРС віток термоелемента,

∇T – вектор градієнта температури в термоелементі.

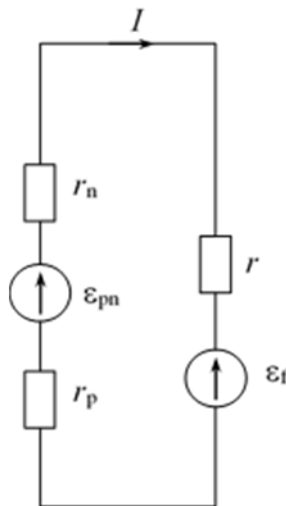


Рис. 3.6. Схема електрична принципіальна ТЕК:

r_p – омичний опір стовпця p - типу провідності,

r_n – омичний опір стовпця n - типу провідності,

r – загальний опір електричної системи ТКЕ,

ε_{pn} – термоЕРС короткозамкнутого генератора.

Інтегруючи вздовж замкнутого контура $a-b-c-d-a$ і застосовуючи (3.5) знайдемо:

$$I(r_{pn} + r) - \alpha \Delta T' = \varepsilon_f, \quad (3.14)$$

де I - величина струму в колі конвертера,

$$r_{pn} = r_p + r_n,$$

$$\alpha_{pn} = \alpha_p + \alpha_n,$$

α_p – коефіцієнт термоЕРС p - вітки термоелемента,

α_n – коефіцієнт термоЕРС n - вітки термоелемента.

Знайдемо ЕРС електромагнітної індукції

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(BS) = -B \frac{\partial S}{\partial t} = \\ &= -B \pi r^2 n = -BSn = -\Phi n \end{aligned} \quad (3.17)$$

де

$$\varepsilon_f = -\Phi n$$

величина ЕРС,

n - частота обертання ротора.

Використовуючи формулу (3.7) рівняння (3.6) запишемо у формі

$$I r_{pn} (1 + m_\sigma) - \frac{\alpha_{pn}}{1 + m_\kappa} \Delta T = -\Phi n, \quad (3.18)$$

де

$$m_\sigma = \frac{r}{r_{pn}}$$

- безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати електроенергії енергії в електроізоляції та комутаційних з'єднаннях,

$$m_\kappa = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{\Theta_{pn}}$$

- безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати тепла в теплових контактах.

Логічно допустити, що в неробочому ході частота обертів ротора буде найбільшою, і викликана обертанням ротора протиЕРС індукції повністю нівелює термоЕРС. Тоді, струм в електричному колі ТЕК зникне. Якщо $I = 0$, то з (3.8) отримаємо

$$n_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T'}{\Phi} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi} \cdot \frac{1}{1 + m_{\kappa}}. \quad (3.21)$$

Навпаки, коли ротор нерухомий (режимі короткого замикання), струм у колі досягне найбільшої величини

$$I_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{r_{pn}} \cdot \frac{1}{(1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})}. \quad (3.22)$$

На основі формул (3.6) та (3.7), з використанням (3.5) частоту обертання ротора представимо у вигляді

$$n = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi(1 + m_{\kappa})} (1 - S), \quad (3.23)$$

де

$$S = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}}, \quad (3.24)$$

коефіцієнт ковзання введений нами по аналогії з коефіцієнтом ковзання для асинхронних машин.

Як видно з рівнянь (3.11) та (3.12) в режимі короткого замикання коефіцієнт ковзання $S = 0$, і прямо пропорційно зростає при зменшенні частоти обертання ротора. Найбільша величина $S = 1$ досягається в режимі короткого замикання.

Механічну потужність термоелектричного конвертера знайдемо як добуток $\varepsilon_f = -\Phi n$ на струм

$$P = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn} (1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})^2} S(1 - S). \quad (3.25)$$

Найбільшу потужність знайдемо із умови екстремуму

$$\frac{dP}{dS} = 0 \quad (3.26)$$

Диференціюючи (3.26) маємо:

$$\frac{dP}{dS} = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn} (1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})^2} (1 - 2S). \quad (3.27)$$

Розв'язуючи отримане рівняння при $S_P = 0.5$ для максимальної потужності знайдемо:

$$P_{\max} = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{4r_{pn}(1+m_{\sigma}) \cdot (1+m_{\kappa})^2} \quad (3.28)$$

Використовуючи відоме співвідношення

$$M = \frac{P}{2\pi n}, \quad (3.29)$$

Знайдемо максимальний електромагнітний момент ТЕК

$$M_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{2\pi r_{pn}(1+m_{\sigma}) \cdot (1+m_{\kappa})} S. \quad (3.30)$$

Залежність технічних параметрів конвертера від коефіцієнта ковзання наведена на рис.3.5.

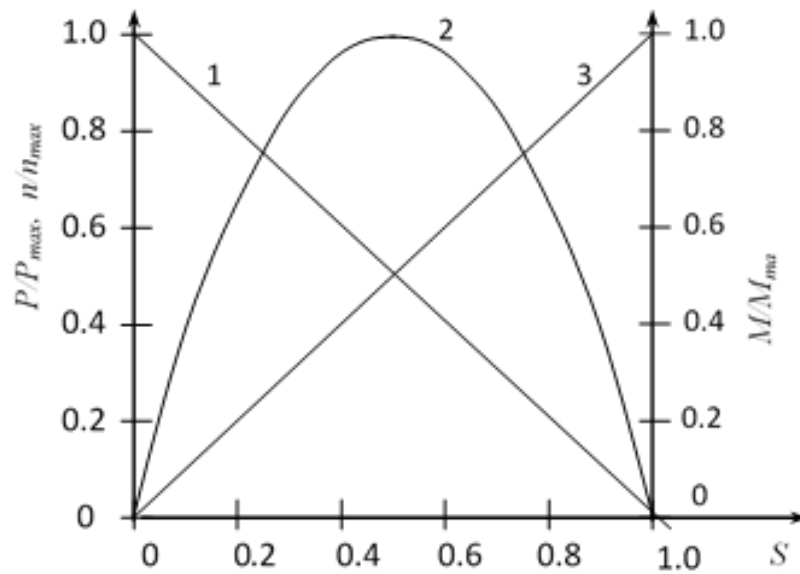


Рис. 3.7. Графічна залежність технічних параметрів конвертера від ковзання. Крива 1.- $n/n_{\max}$, 2. - $P/P_{\max}$, 3. - $M/M_{\max}$.

Як видно з графіків, в режимі максимальної потужності оптимальні: струм, електромагнітний момент та частота обертання будуть мати наступний вигляд:

$$I_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2r_{pn}} \cdot \frac{1}{(1+m_{\sigma}) \cdot (1+m_{\kappa})}, \quad (3.31)$$

$$M_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{4\pi r_{pn}(1+m_{\sigma}) \cdot (1+m_{\kappa})}, \quad (3.32)$$

$$n_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2\Phi(1 + m_\kappa)} . \quad (3.33)$$

З наведених співвідношень видно, що величина потужності термоелектричного конвертера від величини магнітного потоку не залежить. Це зрозуміло, адже електромагнітний момент ротора прямо пропорційний, а його частота обертів обернено пропорційна магнітному потоку. А механічна потужність визначається шляхом множення вказаних параметрів.

3.5. Розрахунок ефективності

Використовуючи відому формулу для ефективності термоелемента [28], та нехтуючи втратами механічної потужності на тертя співвідношення для ефективності КОТЕК:

$$\eta = \eta_\kappa \frac{S(1-S)}{(Z^*T_1)^{-1} + S - S^2(\Delta T / 2T_1)} , \quad (3.34)$$

де:

$$\eta_\kappa = \frac{\Delta T}{T_1} ,$$

термодинамічний ККД ідеальної теплової машини Карно,

z- термоелектрична добротність напівпровідникового матеріалу [1].

В режимі найбільшої потужності, який настає при ковзанні $S = 0,5$ із (3.20) маємо

$$\eta_p = \eta_\kappa \frac{1}{4(Z^*T_1)^{-1} + 2 - \Delta T / 2T_1} \quad (3.35)$$

Крім того, двигун може працювати в режимі максимального ККД. Оптимальне значення коефіцієнта ковзання, при якому досягається вказаний режим, можна знайдемо з умови

$$\frac{d\eta}{dS} = 0 . \quad (3.46)$$

$$S_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + ZT}} , \quad (3.47)$$

де

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

– усереднена температура.

Найбільшу величину ефективності знайдемо при $S=S_0$ із співвідношення

$$\eta_p = \eta_\kappa \frac{1}{1 + 2(1 + \sqrt{1 + ZT})(Z^*T_1)^{-1}} \quad (3.49)$$

В режимі максимальної ефективності оптимальні: потужність, електромагнітний момент частота обертання будуть описуватися наступними залежностями:

$$P_\eta = \frac{(\alpha_{pn}\Delta T)^2}{r_{pn}(1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)^2} S_0(1 - S_0). \quad (3.50)$$

$$M_\eta = \frac{\alpha_{pn}\Delta T\Phi}{2\pi r_{pn}(1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)} S_0. \quad (3.51)$$

$$n_\eta = \frac{\alpha_{pn}\Delta T}{\Phi(1 + m_\kappa)} (1 - S_0), \quad (3.52)$$

де

$$S_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + ZT}}, \quad (3.53)$$

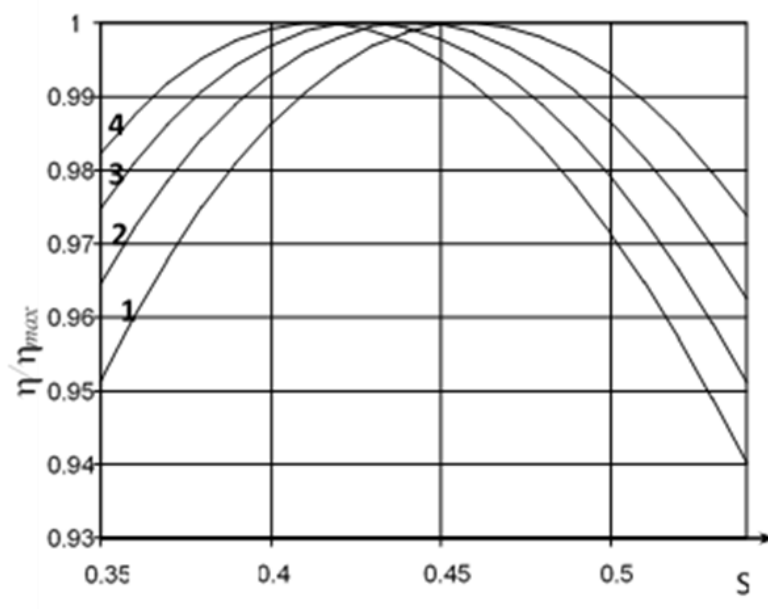


Рис.3.8. Графічна залежність відношення $\eta/\eta_{\max}$ від коефіцієнта ковзання при температурі $T=300$ К. Крива 1, при - $ZT=0.4$, 2. при $ZT=0.6$, 3. при $ZT=0.8$, 4. при - $ZT=1.0$.

Як видно з (3.53), умова $S_0 < 0.5$ виконується завжди. Нерівність посилюється з ростом параметра безрозмірної термоелектричної добротності ZT . Це свідчить, що режими потужності та максимального ККД одночасно ніколи не наступлять. Аналітичний та графічний аналізи вказують на те, що для сучасних реальних термоелектриків із $ZT \leq 1$ відношення параметрів

$$\frac{\eta_P}{\eta_{\max}} < 0.97.$$

Отже, ефективність в режимі максимальної потужності та максимального ККД майже не відрізняються.

3.6. Режими роботи ТЕК

Термоелектричні ефекти є оборотними, тому конвертер може працювати в трьох основних режимах:

1. моторному (режим двигуна);
2. термопідігрівному (режим теплового насоса);
3. термоохолоджуючому (режим термоелектричного холодильника).

Режими роботи конвертера ілюструють рисунки 3.9а, 3.9б і 3.9в.

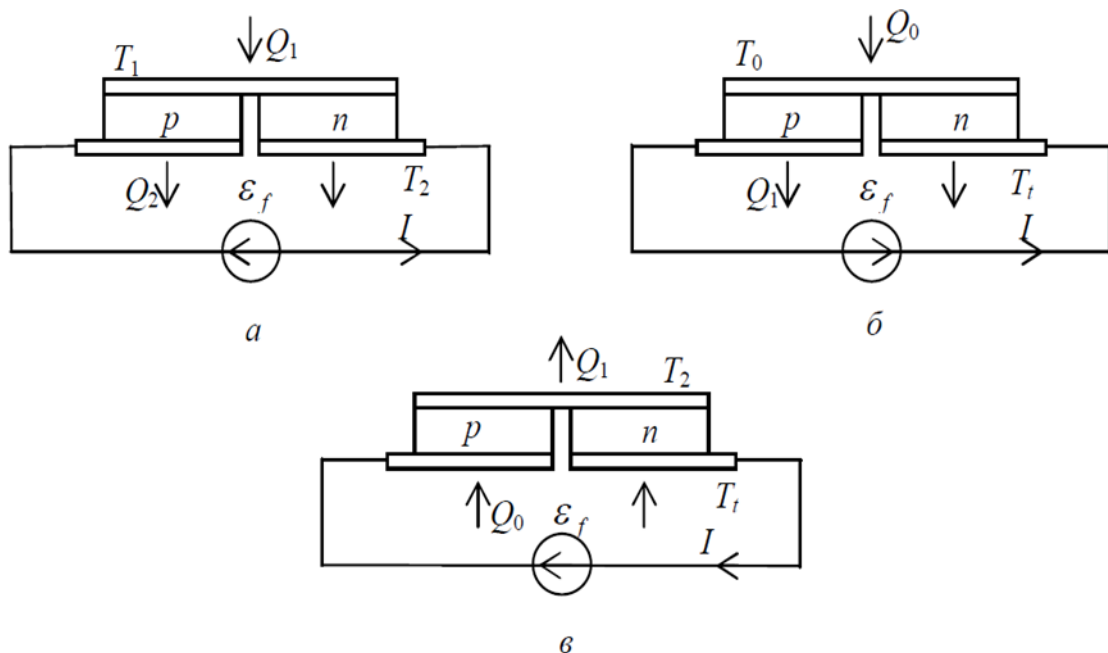


Рис.3.9. Ілюстрація режимів роботи конвертера: *а*-моторний режим, *б* – термопідігрівний режим, *в* – термоохолоджуючий режим.

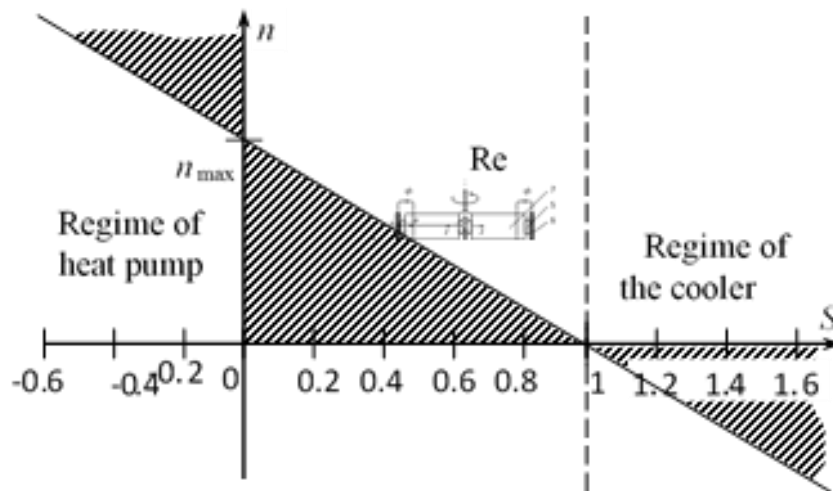


Рис 3.10. Графічна залежність частоти обертання ротора від коефіцієнта ковзання.

Так, наприклад, в режимі двигуна коефіцієнт ковзання знаходиться в інтервалі $0 \leq S \leq 1$. При цьому конвертер перетворює теплову енергію, яка надходить від джерела тепла в механічну роботу.

Як видно з рисунка, зменшення електромагнітного моменту ротора до $M = 0$ відповідає неробочому ходу. Якщо обертати ротор в тому самому напрямку, але з частотою $n > n_{\max}$, при цьому коефіцієнт ковзання складе величину $-\infty < S < 0$. У цьому випадку, внаслідок спільної дії ефектів електромагнітної індукції та Пельтьє [27,28] тепло від навколишнього середовища буде перекачуватися до теплового колектора пристрою. Тепловий колектор буде нагріватися як за рахунок виділення тепла Пельтьє, так і за рахунок генерації тепла Джоуля. Таким чином нагрівальна здатність такого нагрівання буде суттєво більшою, ніж нагрів лише теплом Джоуля. Здійснюється так званий режим теплового насоса (рис. 3.9 б).

Якщо ротор пристрою загальмувати і продовжити його закручувати в напрямку тормозного моменту, то коефіцієнт ковзання $1 < S < \infty$. При цьому напрямок електричного струму в колі зміниться а тепловий колектор буде відбирати теплову енергію від оточуючого середовища. Конвертер перейде в термоохолоджуючий режим (рис. 3.9в). Кількість тепла, яка в одиницю часу

поглинеться тепловим колектором конвертера характеризує його його холодопродуктивність:

$$P_c = \alpha_{pn} T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa (T_h - T_c). \quad (3.54)$$

Кількість тепла, яке виділиться в одиницю часу на радіаторі P_h знайдемо як:

$$P_h = \alpha_{pn} T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa (T_h - T_c), \quad (3.55)$$

тут α_{pn} - коефіцієнт диференціальної термоЕРС,

κ – теплопровідність віток,

R – загальний опір віток,

T_c - температура колектора холоду,

T_h - температура колектора тепла,

I – робочий струм в колі,

P_h - кількість тепла, яке в одиницю часу відводиться від колектора тепла в середовище,

P_c - кількість тепла, яке в одиницю часу поглинається колектором холоду.

Знайдемо кількість тепла, яка йде від гарячого колектора до холодного шляхом теплопровідності

$$P_\kappa = \kappa (T_h - T_c). \quad (3.56)$$

Зрозуміло, що кількість тепла, яке виділяється на гарячому колекторі пристрою буде більшою від кількості тепла яке поглинається холодним колектором на величину потужності джерела електроенергії W

$$P_h = P_c + W. \quad (3.57)$$

3.7. Розрахунок магнітної системи

Магнітна система ТЕК представлена на рисунку.

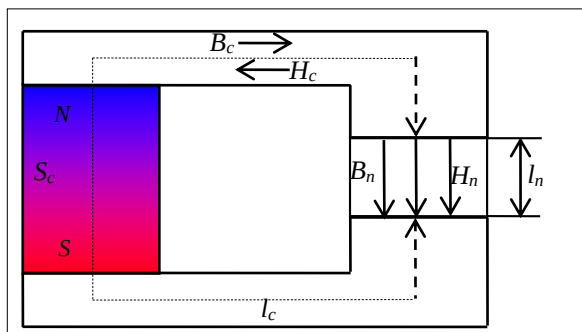


Рис.3.11. Схема збудження магнітного потоку в магнітному колі пристрою.

Вона являє собою неоднорідне магнітне коло, яке складається з двох однорідних гілок: магнітної і немагнітної. Магнітне коло складається з двох однорідних ділянок: сталюого магнітопроводу, в якому магнітна напруженість H_c в усіх точках середньої лінії однакова, і повітряного немагнітного проміжку, де магнітна напруженість H_n зв'язана з індукцією магнітного поля співвідношенням

$$H_n = \frac{B_n}{\mu_0}, \quad (3.32)$$

При довжині немагнітного повітряного проміжку, набагато меншій ніж довжина середньої лінії, розсіюванням магнітного потоку поза межами магнітопроводу можна знехтувати і вважати, що переріз повітряного проміжку S_n рівний перерізу магнітопроводу S_c . Тобто, можна вважати, що індукція у всіх точках магнітного кола однакова і рівна

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{\Phi}{S_n} = B_n, \quad (3.33)$$

Використаємо закон повного струму в інтегральній формі. Виберемо контур інтегрування вздовж напрямку магнітної індукції. Оскільки $B_n = B_c$, а намагнічуючого струму немає, то

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = H_c l_c + H_n l_n = 0, \quad (3.34)$$

звідси отримаємо

$$H_c = -H_n \frac{l_n}{l_c} = -\frac{B_c}{\mu_0} \frac{l_n}{l_c} = -N_B \frac{B_c}{\mu_0}, \quad (3.35)$$

- тут введений коефіцієнт розмагнічування по магнітній індукції

$$N_B = \frac{l_n}{l_c}, \quad (3.36)$$

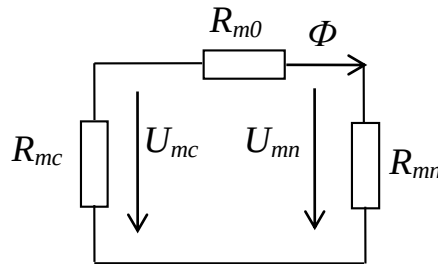


Рис. 3.12. Схема магнітного кола ТЕК

Отже, хоч намагнічуючого струму немає, потужні постійні магніти здатні забезпечити в усіх точках магнітного кола необхідну напруженість магнітного поля. Зазначимо, що в повітряному проміжку напрям вектора напруженості магнітного поля збігається з напрямком вектора магнітної індукції, а всередині навпаки, магнітопроводу вони направлені протилежно (рис.3.11). Оскільки від'ємним величинам напруженості H_c відповідають позитивні значення магнітної індукції $B_n = B_c$, то рівняння магнітного стану магнітного кола можна записати у вигляді

$$B_c = -\frac{B_r}{H_{cb}} H_c + B_r, \quad (3.37)$$

де B_r – залишкове намагнічування,

H_c – коерцитивна сила.

Розв'язуючи рівняння (3.35) і (3.36) відносно магнітної індукції знайдемо:

$$B_c = B_n = \frac{B_r}{1 - \frac{B_r}{\mu_0 H_{cb}} N_B}, \quad (3.38)$$

Параметри сучасних постійних магнітів.

Таблица 3.1

Grade	Equivalent MMPA Class	Br		Hcb		BH(max)		WT	Remark
		mT	Gs	kA/m	Oe	kJ/m³	MGOe	°C	
LN10	ALNICO3	600	6000	40	500	10	1.2	450	Isotropic
LN13	ALNICO2	700	7000	48	600	12.8	1.6	450	
LNGT18	ALNICO8	580	5800	100	1250	18	2.2	550	
LNG37	ALNICO5	1200	12000	48	600	37	4.65	525	Anisotropic
LNG40		1250	12500	48	600	40	5		
LNG44		1250	12500	52	650	44	5.5		
LNG52	ALNICO5DG	1300	13000	56	700	52	6.5		
LNG60	ALNICO5-7	1350	13500	59	740	60	7.5	525	
LNGT28	ALNICO6	1000	10500	57.6	720	28	3.5		
LNGT36J	ALNICO8HC	700	7000	140	1750	36	4.5	550	
LNGT38	ALNICO8	800	8000	110	1380	38	4.75		
LNGT40		820	8200	110	1380	40	5		
LNGT60	ALNICO9	950	9500	110	1380	60	7.5		
LNGT72		1050	10500	112	1400	72	9		

Для генерації магнітного поля в конвертері нами використано постійний магніт, виготовлений зі сплаву ALNICO-5DG, який має залишкову індукцію $B_r = 1.3 \text{ T}$ з коерцитивною силою $H_{cb} = -56000 \text{ A/m}$. В нашому випадку довжина магнітного проміжку $l_c = 125 \text{ mm}$, а немагнітного $l_c = 10 \text{ mm}$. При цьому, величина магнітної індукції складе $B_c = B_n = 0.53 \text{ T}$, а величина коерцитивної сили $H_{cb} = -33530 \text{ A/m}$. При вказаних параметрах величина магнітного потоку, який пронизує поперечний переріз ротора конвертера

$$\Phi = B_c \cdot \pi \cdot r^2 = 0.53 \cdot 3.14 \cdot (0.1)^2 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

3.8. Оптимізація охолоджувальної системи

Невідомою складовою будь-якої теплової машини є її система охолодження. Для ефективної роботи конвертера дуже важливо правильно спроектувати систему охолодження. Взагалі кажучи, системи охолодження

можна поділити на пасивні і активні. Пасивні системи є найпростішими і найменш ефективними. До них відносяться системи термостабілізації різноманітної апаратури через корпус пристрою.

Тепло, яке підводиться від нагрівача, способом теплопровідності транспортується до колектора тепла конвертера, а далі шляхами конвекції і випромінювання передається довкіллю. Однак, цей спосіб охолодження є вкрай неефективним.

Конвекцію можна посилити, якщо до пристрою прикріпити зовнішній масивний радіатор. Ця процедура багатократно збільшить корисну площу поверхні теплообміну з довкіллям. Завдяки теплопровідності теплова енергія від корпусу пристрою передається до зовнішнього радіатора. А далі, шляхом випромінювання і конвекції – довкіллю.

Радіатори можуть відрізнятися як конструкцією, так і матеріально. Конструктивно радіатори можуть бути голчастими, пластинчастими, ребристо-пластинчастими тощо. Голчасті найкраще використати в умовах природної конвекції. Інші типи, як правило, застосовують при застосуванні примусового обдуву повітрям.

Теплопровідність матеріалів конвертера.

Таблица 3.2

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot К)$
Повітря	0.024
Вода дистильована	0.6
Термічна паста/епоксидий клей смоли	0.1-10
Полімерні теплопровідні сполуки	3-20
Нержавіюча сталь	16.1
Кераміка	100-250
Алюміній та його сплави	120-240
Мідь та її сплави	380-400

За матеріалом, найкращими є радіатори виготовлені з кольорових металів: чистої міді або її сплавів, чистого алюмінію або його сплавів.

За способом виробництва виділяють наступні типи радіаторів:

- виробництво із застосуванням методу гарячого порошкового пресування;
- виробництво методом холодної ковки;
- виробництво шляхом фрезерування;
- інші методи.

Як правило до габаритів радіаторів ставляться досить жорсткі вимоги. Тому, може виникнути потреба у виготовленні штучного радіатора виготовленого під конкретні умови. При виготовленні радіатора необхідно враховувати загальну його суманну кінцеву вагу, його собівартість та можливість масового виробництва. Найчастіше використовуються литі радіатори ковані радіатори або радіатори виготовлені методом порошкових технологій. Для ефективного охолодження площа поверхні розсіювання радіатора повинна бути досить великою. Для приблизного розрахунку вважають, що на кожен ват розсіяної теплової енергії необхідний радіатор з площею розсіювання $3000 - 6000 \text{ см}^2$.

Якщо із стабілізацією теплового режиму пасивне охолодження не справляється, то використовують активні способи термостабілізації. Способів активної термостабілізації існує багато. Зокрема, це і повітряні вентилятори, і водяне охолодження, і термоелектричні модулі і теплові трубки.

Водяне охолодження використовують для відбору теплових потужностей в сотні і тисячі ват. В цьому випадку застосовують водяні радіатори з тепловим термічним опором не більше $0.01-0.05 \text{ K/Wt}$.



Рис 3.13. Водяний охолоджувач

Основна ідея рідинного (водяного) охолодження полягає у каналізації лишнього тепла за допомогою термічного контакту з теплоносієм. Вода циркулює в замкнутому герметичному контурі, відбираючи тепло і віддаючи його в контурі охолодження. В ролі теплоносія крім води часто використовують тосол, масло, рідкі метали та ін..

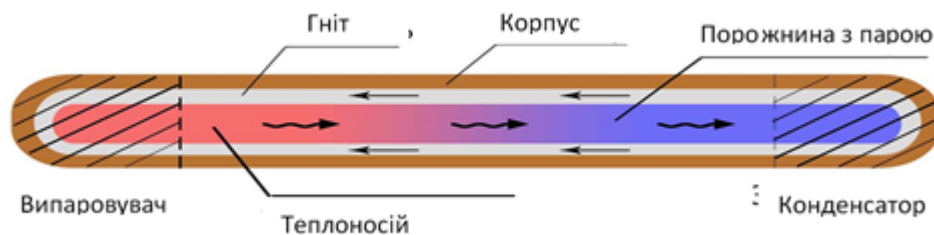


Рис 3.14 Схема роботи теплової трубки

Теплова трубка, це тепловідвід, який передає великі теплові потоки при малих перепадах температури на поверхні і рівномірною каналізацією з поверхні. Це пояснюється набагато більшим коефіцієнтом теплопровідності трубок (в сто і тисячу разів) в порівнянні з коефіцієнтом теплопровідності міді. Теплова трубка, це герметично закритий з обох боків контейнер, який частково заповнений рідиною (як правило водою). В місці нагрівання рідина поглинає теплоту пароутворення і випаровується, а в місці охолодження газоподібна фаза теплоносія конденсується виділяючи теплоту конденсації. Рух пароподібної

фази від місця нагріву до місця конденсації відбувається внаслідок градієнта тисків насиченої пари. Перепад тисків визначається різницею температур в місцях випаровування і конденсації.



Рис. 3.15. Система охолодження конвертера з використанням теплових трубок

3.8. Оцінка величини технічних параметрів

Оцінимо величину параметрів конкретного пристрою, який працює в режимі максимальної потужності. Виберемо матеріал для короткозамкнутого термоелектричного генератора на основі сплаву $Bi-Te-Sb-Se$: Нехай загальна площа напівпровідникових віток складає $S = 3000 \text{ мм}^2$ а товщина $h=4 \text{ мм}$. Будемо проектувати конвертер з радіусом ротора - $r=50 \text{ мм}$. При таких параметрах магнітна індукція в роторі по порядку величини складе $B_c = B_n = 0.53 \text{ Т}$. Як показують розрахунки, електромагнітна потужність, електромагнітний момент та частота обертання ротора в режимі максимальної потужності при середній абсолютній температурі $T = 300\text{К}$ складуть величини, приведені в таблиці 3.3.

Можна допустити, при збільшенні розмірів конвертера його потужність та ККД будуть збільшуватися. Особливу увагу слід звернути на добротність термоелектричних напівпровідникових матеріалів. Крім того слід вибирати високоякісні теплоізоляційні та електротехнічні матеріали.

Основні параметри термоелектричного конвертера в режимі максимальної потужності.

Таблиця 3.3

$\Delta T, (K)$	m_{σ}	m_{κ}	$P_{max} \cdot 10^2, (Bm)$	$I_p, (A)$	$M \cdot 10^2, (H \cdot m)$	$n, (c^{-1})$
5	0.0	0.0	1,21	11,24	0,76	0,30
10	0.0	0.0	4,82	22,33	1,51	0,50
15	0.0	0.0	10,10	34,02	2,30	0,80
20	0.0	0.0	19,30	44,37	3,00	1,00
5	0.1	0.1	0,90	9,17	0,62	0,20
10	0.1	0.1	3,62	17,75	1,20	0,50
15	0.1	0.1	8,15	28,10	1,90	0,70
20	0.1	0.1	14,50	36,98	2,50	0,90
5	0.2	0.2	0,70	7,40	0,50	0,20
10	0.2	0.2	2,80	14,79	1,00	0,40
15	0.2	0.2	6,30	23,66	1,60	0,60
20	0.2	0.2	11,20	31,06	2,10	0,80

Безумовно, ККД конвертера малий – всього 2%. Однак він має термодинамічні обмеження на величину ККД внаслідок малого перепаду температур між нагрівачем і холодильником. Крім того, конвертер використовує дармове тепло, тому величина ККД не повинна бути єдиним критерієм при його порівнянні з іншими тепловими машинами.

Термоелектричний конвертер доцільно застосовувати там, де потреба в механічній енергії не може бути традиційними джерелами, а також там, де потрібне аварійне резервування. Виконаний в зменшених розмірах термоелектричний конвертер може бути використаний як механічний привід в автономних лічильниках теплової енергії [32].

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз можливих небезпечних і шкідливих виробничих чинників, електробезпеки і пожежної безпеки

Підстерігати небезпека у вигляді різних негативних факторів нас може практично скрізь [44-49]. Навіть на самих нешкідливих робочих місцях можна говорити про шкідливий вплив комп'ютерів, тривалої сидячої роботи і про багато іншого. На багатьох виробництвах робота пов'язана з постійним впливом на працівників несприятливих умов. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори (ВФ) нерозривно пов'язані між собою. ВФ - це фактори, які в результаті свого тривалого або короткочасного впливу на людину призводять до погіршення стану здоров'я або до травми. На виробництвах з такими умовами праці різні нещасні випадки відбуваються досить часто.

ВФ - це фактори, які, діючи на працівника, знижують його працездатність або призводять до різних захворювань, їх часто ще називають професійними хворобами. Варто зазначити, що межа між цими двома групами факторів досить умовна. При деяких умовах шкідливі виробничі фактори можуть стати небезпечними. Наприклад, підвищена вологість відноситься до несприятливих умов праці, вона може викликати різні захворювання дихальної системи. Якщо людині доводиться в таких умовах працювати з електричним струмом, то це стає вже занадто небезпечно, а не просто шкідливо.

Всі фактори на будь-якому підприємстві можуть мати різне походження. Часто можна зустрітися з несприятливими умовами праці, які виникають з вини керівництва. Це питання потребує особливої уваги з боку контролюючих органів. Слід зазначити, що немає чіткої межі між шкідливими та небезпечними факторами, вона завжди умовна і в будь-який момент може бути зруйнована. На виробництві завжди є технологічні процеси, обладнання, які є джерелом виділення ВФ. До цих проваджень можна віднести: очищення деталей за

допомогою хімічних засобів; фарбування устаткування; зварювальні роботи; процеси нанесення захисних антикорозійних покриттів; обробку або переробку металів. При здійсненні всіх цих процесів виділення шкідливих речовин неминуче, але, як правило, посилене їх утворення пов'язане з недотриманням технологій або невмілим їх використанням.

На багатьох виробництвах просто неможливо уникнути впливу деяких факторів. Серед них особливе місце займають: температура, висока вологість і випромінювання; електромагнітні поля; лазерне і ультразвукове випромінювання; вібрація; сильний шум; освітлення, яке може бути як занадто інтенсивним, так і недостатнім, що однаково шкідливо для зору; вплив пилу і аерозолів; працюючі частини обладнання. Кожен фактор окремо начебто і не становить особливої небезпеки для здоров'я людини при короткочасному впливі. Але часто працівник перебуває тривалий час у їх оточенні, та ще відразу декількох, тому їх вплив стає цілком відчутним.

На підприємствах, де в цехах стоять верстати та інше обладнання, без шуму, як правило, не обходиться. Постійно працює техніка видає гучні звуки, які можуть змінювати свою інтенсивність. Якщо людина змушений регулярно зазнавати такого впливу, то це негативно позначиться на його здоров'ї. Від сильного шуму починає боліти голова, підвищується тиск, знижується гострота слуху. Зрештою, від таких умов знижується працездатність, з'являється втома, знижується увага, а це вже може призвести до нещасного випадку. Керівники на подібних підприємствах повинні подбати про своїх працівників, щоб постаратися хоч трохи зменшити негативний вплив шуму на організм.

В результаті постійного впливу даного фактору починає страждати не тільки нервова система, а й опорно-рухова, і система аналізаторів. Робітники, які змушені працювати в таких умовах, часто скаржаться на головні болі, запаморочення, заколисування.

Якщо додати ще і вплив супутніх чинників, таких як вологість, висока температура, шум, то це тільки посилює шкідливий вплив вібрації. Якщо на шкідливих підприємствах досить ефективно налагоджено використання засобів

захисту, то робітники будуть піддаватися впливу небезпечних речовин в набагато меншому ступені.

До психофізіологічних факторів можна віднести тягар умов праці і його напруженість. Під напруженістю роботи мається на увазі навантаження на нервову систему та органи відчуття. Сюди можна віднести тривалу розумову роботу, монотонність виконуваних процесів, емоційні перевантаження. Все це шкідливі виробничі фактори, які, якщо розібратися, практично кожен з нас на своєму робочому місці відчуває в тій чи іншій мірі.

На будь-якому підприємстві необхідно з метою створення сприятливих умов для працівників намагатися забезпечувати комфортну обстановку. Це стосується, насамперед, чистоти повітря у виробничих приміщеннях. Санітарно-гігієнічні служби розділяють основні шкідливі виробничі фактори на хімічні речовини та промисловий пил.

Негативний вплив пилу проявляється в тому, що він здатний провокувати розвиток легеневих захворювань. На будь-якому підприємстві на працівників чиниться вплив шкідливих виробничих факторів відразу з кількох груп, тобто комплексний.

Незважаючи на всі заходи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу факторів, неможливо досягти ідеальних умов праці. Це не дозволяють зробити особливості технологічних процесів, продукція та сировина для її виготовлення. Тому для керівників захист від шкідливих виробничих факторів - це першочергове завдання.

Часто буває так, що всі вжиті заходи не можуть забезпечити повністю безпечні умови праці, в цих випадках без застосування ЗІЗ просто не обійтися. Можна зробити висновок про те, що засоби індивідуального захисту, з одного боку, зменшують вплив шкідливих факторів, а з іншого - можуть створювати іншу небезпеку для здоров'я працівника. Заходи безпеки спрямовані, насамперед, на те, щоб шкідливі виробничі фактори не надавали свого небезпечного впливу на людину. З цією метою на будь-якому підприємстві в обов'язковому порядку повинен проводитись інструктаж з безпеки. Дата

проведення, зміст фіксуються у спеціальному журналі за підписом усіх інструктованих і того, хто провів цей інструктаж.

4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів

Дія електромагнітного імпульсу блискавки на металеві елементи будівельних конструкцій, електричні й електронні системи є вторинною дією блискавки. Вторинні дії блискавки пов'язані з дією на об'єкт електромагнітного поля близьких розрядів. Це поле має дві складових: електростатичну та електромагнітну індукції.

Електростатична індукція зумовлена переміщенням зарядів у каналі блискавки. Електростатичний індукційний вплив проявляється у виді імпульсних перенапруг, що виникають на металевих конструкціях об'єкта. Величина імпульсної перенапруги залежить від величини сили струму блискавки, відстані до місця удару, опору заземлення. За відсутності належного заземлення імпульсна перенапруга може сягати сотень кіловольт і створювати небезпеку ураження людей електричним струмом та виникнення іскор між окремими частинами об'єкта.

Електромагнітна індукція зумовлена зміною струму блискавки в часі. Електромагнітна індукція приводить до утворення у металевих контурах об'єкта ЕРС, пропорційної швидкості зміни струму блискавки і площі, охоплюваної контуром. Протяжні комунікації в сучасних виробничих будівлях можуть утворювати контури, що охоплюють велику площу, в яких є небезпека наведення ЕРС у кілька десятків кіловольт. У місцях зближення протяжних металевих конструкцій, у розривах незамкнених контурів створюється небезпека перекриттів та іскрінь із можливим розсіюванням енергії близько десятих часток джоуля.

Відповідно до ГОСТ 12.1.004 пожежна небезпека вторинних дій блискавки полягає в іскрових розрядах, що виникають у результаті індукційного й електромагнітного впливу атмосферної електрики на

виробниче устаткування, трубопроводи й будівельні конструкції. Енергія іскрового розряду перевищує 250 мДж є достатньою для запалення горючих речовин з мінімальною енергією запалювання до 0.25 Дж.

Також небезпечним є занесення високого потенціалу в будинок по металевих комунікаціях не тільки при прямому влученні блискавки, але і при розташуванні комунікацій у безпосередній близькості від громовідводу. При недотриманні безпечних відстаней між громовідводами й комунікаціями енергія можливих іскрових розрядів сягає значень 100 Дж і більше, тобто є достатньою для загоряння всіх горючих речовин.

Захист від електростатичної індукції здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше, ніж на 10 см. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

Для влаштування штучних заземлюючих пристроїв використовуються сталеві вертикально закладені у землю труби діаметром від 3 до 5 см і товщиною стінок не менше як 3,5 мм, довжиною 2,5...3 м; металеві стержні діаметром 10-12 мм, довжиною до 10 м; кутову сталь 40Ч40Ч4, довжиною 2.5-5 м. Застосовувати для штучних заземлюючих пристроїв алюмінієві оболонки силових кабелів і неізолювані алюмінієві провідники заборонено.

Таким чином, при дотриманні вимог викладених у ПУЕ-7, щодо улаштування захисту від ЕМІ блискавок, буде збережене світлотехнічне обладнання та його складові, а також життя працівників, які обслуговують цю апаратуру.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Перспективним напрямком енергозберігаючих технологій може стати новий пристрій – короткозамкнутий термоелектричний конвертер теплової енергії (ТЕК), в якому низькопотенціальна теплова енергія перетворюється в механічну енергію обертання ротора пристрою.
2. Показана здатність роботи ТЕК в оборотних режимах (термопідігрівному і термоохолоджуючому).
3. Розраховано потужність ТЕК, його електромагнітний момент, частоту обертів, і ефективність.
4. Зроблена оптимізація технічних параметрів ТЕК в режимах максимальної потужності і максимального ККД.
5. Показано, що потужність ТЕК квадратично залежить від різниці температур між джерелами тепла і холоду, і буде збільшуватися при збільшенні поперечного перерізу термоелементів та їх термоелектричної добротності.
6. Коефіцієнт корисної дії ТЕК знаходиться в інтервалі 1-3%. Однак, такий ККД характерний для всіх теплових машин, які працюють при малому перепаді температур між джерелом тепла і холоду. Тому це не повинно бути визначальним критерієм при оцінці їх роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Плоскі сонячні колектори. <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/heliosystemy/plaski-kolektory.html>
2. Сонячні панелі. <https://eenergy.com.ua/tag/sun-energy/>.
3. Морські хвилі і течії. <http://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volnyi-i-techeniya/>
4. Renewable Energy From The Ocean — A Guide To OTEC, William H. Avery, Chih Wu, Oxford University Press, 1994
5. Гнітько С. М., Бучинський М. Я., Попов С. В., Чернявський Ю. А. Технологічні машини: підручник для студентів спеціальностей механічної інженерії закладів вищої освіти. — Харків: НТМТ, 2020. — 258 с.
6. П'єзоелектричний теплоелектричний двигун-генератор. <https://www.freepatent.ru/patents/2225671>.
7. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої. — К.: Наук. думка, 1979. — 768 с.
9. Bulat L.P., Zakordonets V.S. Semiconductors termal mechanical energy converter // Cold fusion source book, Hal Fox, USA, 1994. — P. 230–242.
10. Peters F. Thermoelemente und Nhermosoulen. Halle, 1998.
11. Мам. 28983А, G01K17/10 Україна, В.С. Закордонець, 2000.
12. Zakordonets V. Theoretical analysis of thermal conditions and ways of led temperature stabilization / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2016. — № 4 (84). — С. 105–112.
13. Закордонець В. Стабілізація теплового режиму світлодіодних систем термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Т. М. Рекуник // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : Том 3. — С. 139. — (Електротехніка та енергозбереження).
14. Закордонець В. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова, О. Б. Підфігурний // Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних

технологій“, 28-29 листопада 2018 року. — Т. : Том 3. — С. 27. — (Електротехніка та енергозбереження).

15. Zakordonets V. Stabilization of LEDs thermal conditions by thermoelectric modules of cooling / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2018. — Vol 90. — No 2. — P. 133–140.

16. Закордонець В.С. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термoeлектрика. №4, 2018. — С. 60–67.

17. Закордонець В.С. Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіодів / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термoeлектрика. №5, 2018. — С. 45–54.

18. Закордонець В.С. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій“, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ТНТУ, 2019. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 287-289. — (Секція: Світлотехніка і електроенергетика).

19. Закордонець В.С., Фера В.І. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби. // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. – С.34.

20. Закордонець В. С., Кутузова Н. В., Гридовий В. М.. «Вплив термоелектричного охолодження на ефективність світлодіодних матриць»// Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. – С.35.

21. Напівпровідниковий низькопотенціальний термоелектромеханічний перетворювач енергії / В.А. Андрійчук, В.С. Закордонець, Н.В. Кутузова //

Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2010. — Вип 27. - С. 105-111.

22. Закордонець В.С., Пташник О.С. Термоелектромеханічний низькопотенційний конвертер// Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 24-25 листопада 2021., м.Тернопіль. — С.30.

23. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.

24. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н.Ткачук, М.О.Халімовський,

25. В. В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006 – 448 с. Охорона праці в в медичних закладах: Довідник / Укладачі, Зеркалов Д.В., Теленгатор

26. О.Я., Ушкевич Б.А., Дериземля І.О.; За ред. Зеркалова Д.В. - К. : Основа, 2008. - 728 с.

27. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.