

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)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**РОЗРОБКА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ КОНВЕРТЕРІВ
НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61

напряму підготовки (спеціальності)

**141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

	_____	Кріль С.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник	_____	Закордонець В.С.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	_____	Мовчан Л.Т.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	_____	Тарасенко М.Г.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент	_____	Габрусєв Г.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2022

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

Факультет _____
Кафедра Електричної інженерії _____
Освітній рівень магістр _____
Напрямок підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» _____
(шифр і назва)
Спеціальність _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 201__ р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Кріль Станіслав Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) РОЗРОБКА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ КОНВЕРТЕРІВ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ
ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ _____

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

Затверджені наказом по університету від «_____» _____ 2022__ року

№ _____

2. Термін подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

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

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра Кріля Станіслава Вікторовича містить: 65 сторінок, 32 рисунки, 4 таблиці, 48 посилань на першоджерела.

Предметом дослідження є конвертери низькопотенціальної теплової енергії

Метою роботи є розробка напівпровідникових термоелектричних конвертерів теплової енергії (ТЕКТЕ), призначених для перетворення низькопотенційної теплової енергії.

Об'єктом дослідження є низькопотенціальні напівпровідникові термоелектричні конвертери теплової енергії (ТЕКТЕ).

Основні результати: Розраховано технічні параметри напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕКТЕ), призначеного для перетворення низькопотенціальної теплової енергії в механічну. Обчислено механічну потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора і здійснено їх оптимізацію.

Ключові слова: низькопотенційна тепла енергія, тепла машина, цикл Карно, термоелектромеханічний конвертер.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Альтернативні джерела енергії	7
1.2 Використання теплової енергії Сонця	8
1.3 Пряме перетворення енергії Сонця	10
1.4 Низькопотенціальні теплові машини	11
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	17
2.1 Термоелектричні явища	17
2.2 Термодинамічний розрахунок термопари	20
2.3 Короткозамкнутий термоелектричний генератор	23
2.4 Коструювання системи охолодження	26
2.5 Електротепловий метод розрахунку	30
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	33
3.1 Багатоелементні ТЕГ	33
3.2 Будова і принцип дії ТЕКТЕ	35
3.3 Розрахунок теплового режиму	36
3.4 Розрахунок технічних параметрів	37
3.5 Розрахунок ефективності	41
3.6 Режими роботи	43
3.7 Розрахунок магнітної системи	48
3.8 Розрахунок охолоджувальної системи	52
3.9 Обчислення технічних параметрів	53
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	55
4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів, електробезпеки, пожежної небезпеки	55
4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

За короткий час, всього за століття, людство витратило левову частку вуглеводнів, які створювалися природою сотні мільйонів років. Витратило вкрай нераціонально. Майже 50 % пішло на виготовлення паливно-мастильних матеріалів, друга половина стала сировиною хімічної промисловості. Це завдало непоправної шкоди навколишньому середовищу. Передовсім це зв'язано з видобутком вуглеводнів, з їх транспортуванням і подальшим спалюванням.

При спалюванні палива утворюються сотні мільйонів тон шкідливих речовин, які викидаються в атмосферу. Якщо врахувати, що продукти спалювання зберігаються в атмосфері від десяти діб до півроку, то їх вплив на довкілля стає катастрофічним.

Крім прямого негативного впливу на довкілля продукти спалювання наносять і непрямі шкоди. Зокрема, підвищення концентрації вуглекислого газу в атмосфері призводить до глобального потепління (так званий парниковий ефект). На думку вчених, наслідком цього є танення полярних льодових шапок, підйом рівня океану, масштабні лісові пожежі і повені. Тому, в багатьох економічно розвинутих країнах світу (США, Британія, Німеччина, Японія) основою інноваційного розвитку промисловості є перехід на принципово новий технологічний рівень, який тісно пов'язаний з екологією, енергоощадністю, та різким скороченням частки використання «брудних» енергоресурсів». Зокрема, до 2025 року в країнах Євросоюзу майже 20% електроенергії буде вироблятися шляхом використання нетрадиційних джерел енергії. Окрім того, використання великих об'ємів теплової енергії (близько 75% світової теплової генерації), яка виділяється в різноманітних технологічних процесах, допоможе відвернути можливе глобальне потепління та кліматичні зміни [8,10-12].

Крім цього, в зв'язку із постійним збільшенням попиту на різні види енергії (електричну, механічну, теплову та ін.) стала актуальною розробка нових та удосконалення старих пристроїв, які з природного і техногенного тепла могли б генерувати корисні види енергії [1-9]. Це б згладило і частково вирішило б проблему енергетичного дефіциту.

Предметом дослідження є конвертери низькопотенціальної теплової енергії.

Метою роботи є розробка термоелектричних конвертерів низькопотенціальної теплової енергії

Об'єктом дослідження є термоелектричні низькопотенціальні конвертери теплової енергії (ТЕКТЕ).

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Альтернативні джерела енергії

До альтернативних джерел енергії (АДЕ) відносяться відновлювані джерела енергії, які використовують потоки сонячної енергії, енергію вітру і води, теплоту Землі, і ті, які існують постійно - періодично. АДЕ є досить поширеними і, поки існує Сонце, є практично невичерпними.

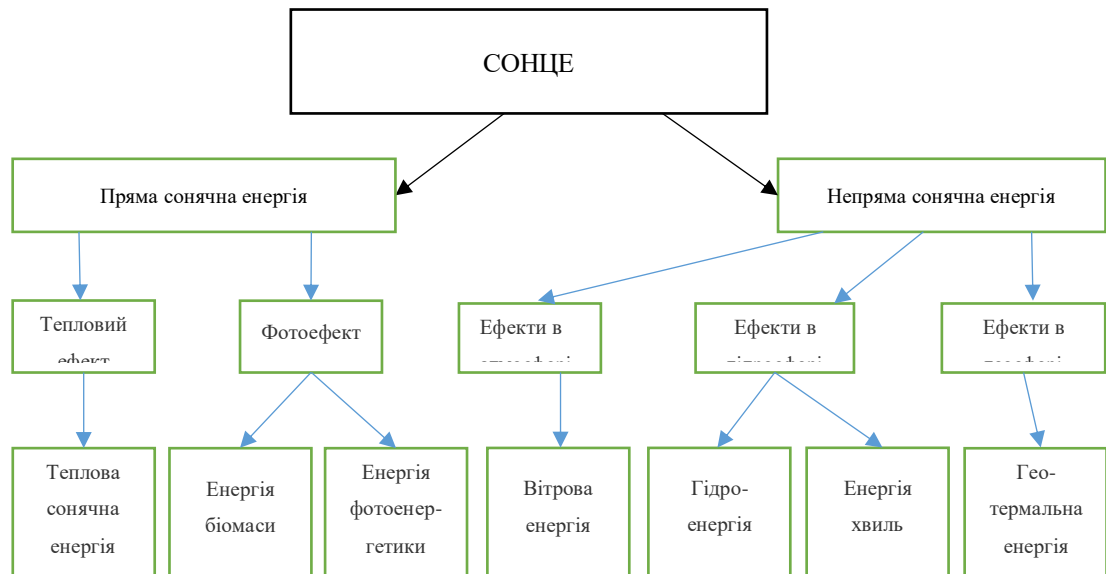


Рис. 1.1 Класифікація альтернативних джерел енергії

АДЕ поділяються на дві групи: ті які використовують пряму сонячну енергію і ті які використовують її вторинні прояви. Результатом побічної діяльності Сонця є різноманітні фізичні явища в атмосфері, гідросфері та геосфері. Зокрема, у вигляді вітру, гідроенергії, теплової енергії навколишнього середовища тощо (рис. 1.1). До альтернативних джерел енергії також відносять гідроелектростанції потужністю до 30 МВт.

Головними перевагами АДЕ перед традиційними джерелами є:

- майже необмежені запаси;
- відсутність шкідливого впливу на середовище;
- доступність використання.

Основними недоліками АДЕ є:

- мала густина енергії;

- мала густина енергії;
- висока собівартість генерації енергії;
- несинхронність генерації та споживання енергії.

1.2 Використання теплової енергії Сонця

Сонячна енергія виробляється шляхом термоядерних реакцій синтезу. При цьому щосекунди понад 10^9 кілограмів матерії перетворюється в енергію, яка випромінюється в космос у вигляді електромагнітного випромінювання. Розрахунки показують, що енергії Сонця на Землю, потрапляє менше ніж один відсоток. Але, для забезпечення всіх енергетичних потреб людства цього було б досить.

Як правило, нагрівачі води виготовляються у вигляді плоских колекторів тепла, які монтуються на дахах будинків або в інших місцях [1,2]. Відсоток теплової енергії, яку можна використати, залежить від ККД колектора. Так як густина сонячного випромінювання, то геометричні розміри колекторів роблять великими. Наприклад, в екваторіальних районах земної кулі, розміри колектора для задоволення енергетичних потреб однієї людини складає близько 40м^2 . Найпростіший плоский колектор являє собою металевий лист, покритий одним або двома шарами темного скла, який майже повністю поглинає сонячну радіацію. Потім теплова енергія передається воді. Плоскі колектори можуть нагрівати воду до $65\text{-}90\text{ }^\circ\text{C}$. При цьому їх ККД складає $20\text{-}80\%$.



Рис. 1.3 Плоский колектор для нагрівання води

Вода циркулює по трубах діаметром 12-16 мм, які закріплені на металевому листі на відстані 50- 150 міліметрів одна від одної. Корпус колектора виготовляється з пластмаси або з меалу. Зовні корпус теплоізолюваний.

Сонячні водонагрівачі використовуються як для обігріву приватних будинків так і для побутових потреб. Їх виробництво в промислових масштабах налагоджено в багатьох розвинутих країнах. Використання сонячної енергії стає візитною карткою ХХІ століття.

Якщо потрібно отримати підігріту до високої температури пару, використовуються колектори-концентратори [2,3].



Рис. 1.4 Параболічний концентратор для нагрівання води

Колектори-концентратори фокусують сонячну енергію на трубах з водою або на водяних резервуарах (рис. 1.4).

Найбільша в світі сонячна електростанція знаходиться в США в пустелі Мохав. Вона складається з великої кількості параболічних дзеркал, в фокусі яких знаходяться труби (рис. 1.5). По трубах циркулює вода, яка випаровується. Далі, перегріта пара подається на лопаті турбогенератора. Головна незручність сонячних електростанцій в тому, що електроенергія генерується в світлу пору доби і не генерується вночі і в хмарні. Для усунення цього недоліку, на сонячних електростанціях застосовують змішану генерацію. Зокрема – вдень використовують сонячну енергію, а вночі вмикають парогенеруючі котли в яких спалюється природний газ.



Рис. 1.5 Сонячна електростанція.

1.3 Пряме перетворення енергії Сонця

В останні роки широке поширення отримали сонячні батареї.



Рис. 1.6 Сонячні батареї

Їх принцип дії базується на використанні внутрішнього фотоефекту в напівпровідниках. Сонячна батарея складається з великої кількості напівпровідникових елементів, кожен з яких має два шари з різним типом провідності. В результаті цього, між шарами виникає різниця потенціалів. Кожен елемент генерує напругу в кілька десятих часток вольтів. Для отримання напруги

і потужності, придатної для технічного використання, елементи з'єднуються в послідовно-паралельні батареї.

В 2021 році, повна потужність встановлених на Землі сонячних батарей складала майже 760 ГВт. Це складає майже 3,0 % світової генерації електроенергії [4].

1.4 Низькопотенціальні теплові машини

Яскравим представником низькопотенціальної теплової машини є двигун Стірлінга (ДС) [15-20]. В основі його роботи лежить рух робочого тіла чи газової суміші у замкнутому об'ємі. Двигун Стірлінга, це теплова машина зовнішнього згорання. В основі його роботи лежить принцип використання зміни внутрішньої енергії, яка виникає при нагріві та охолодженні газоподібного робочого тіла. Двигун зовнішнього згорання був сконструйований ще в ХІХ сторіччі. Проте, інтерес до такого типу двигунів спалахнув тільки зараз. В даний час, провідні механічні лабораторії світу виготовляють нові і удосконалюють старі конструкції ДС.

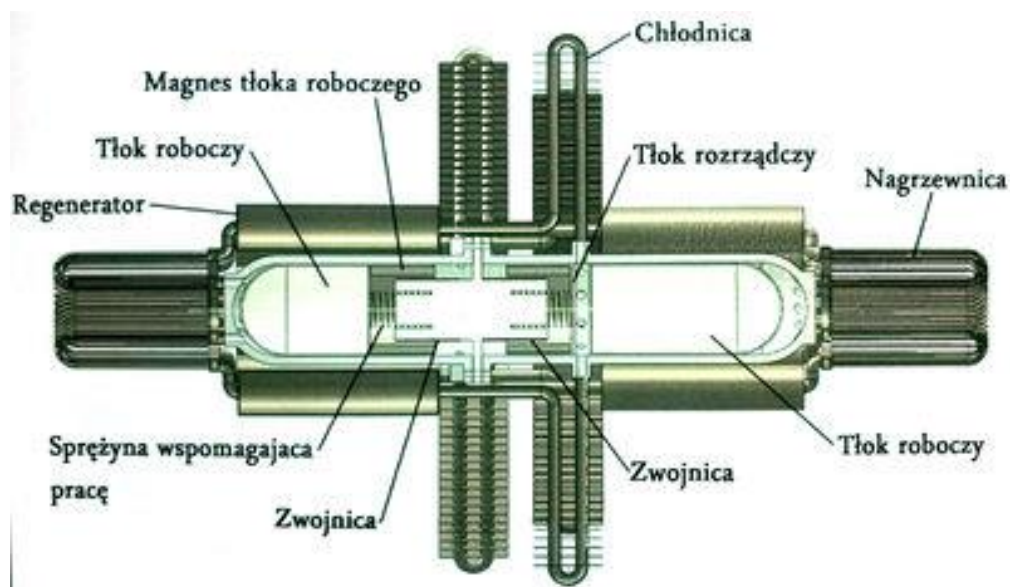


Рис. 1.7 Конструкція теплового двигуна Стірлінга

Для роботи двигуна Стірлінга згодиться будь-яке джерело тепла [19,20]. Це і енергія біомаси, і відходи сільського господарства, і геотермальна енергія. Не дивлячись на таку всеїдність, ДС не поступається за ККД та потужністю бензиновим та дизельним двигунам внутрішнього згорання. Дуже важливою є і

його термодинамічна оборотність, яка полягає в можливості роботи в режимі холодильника.



Рис. 1.8 Сучасний двигун Стірлінга

Робочий цикл двигуна визначається тепловою енергією, яку він отримує із зовні. Причому, якість теплової енергії не має ніякого значення. Враховуючи цю обставину можна говорити, що в своєму класі двигун Стірлінга є ідеальною низькопотенціальною тепловою машиною.



Рис. 1.9 Промисловий зразок двигуна Стірлінга потужністю 1.5 кВт

З метою збільшення потужності двигуна, замість повітря в якості робочого тіла використовується водень і гелій.

Завдяки використанню сучасних матеріалів та передових технології вдалося підняти ККД двигуна Стірлінга до 65-70% від циклу Карно [19,20].

Ще одним представником низькопотенціальної теплової машини є нітіноловий двигун.

Нітінол, це сплав нікелю з титаном. В нітіноловому тепловому двигуні механічні рушійні сили виникають внаслідок структурних перетворень нітінолу [21,22]. На взаємних перетвореннях форм базується явище ефекту пам'яті форми. Температура гістерезису нітінолу складає всього 30 С, тому в якості рушійних середовищ можна використовувати, наприклад, гаряче повітря навколишнього середовища і холодну воду водоюми. Перший нітіноловий тепловий двигун, побудований Р. Бенксом безперервно працював протягом кількох місяців і за цей час зробив більше 100 тисяч обертів. При цьому він розвивав механічну потужність понад 0.2 кВт. Конструкція нітінолового двигуна зображена на рис. 1.5.

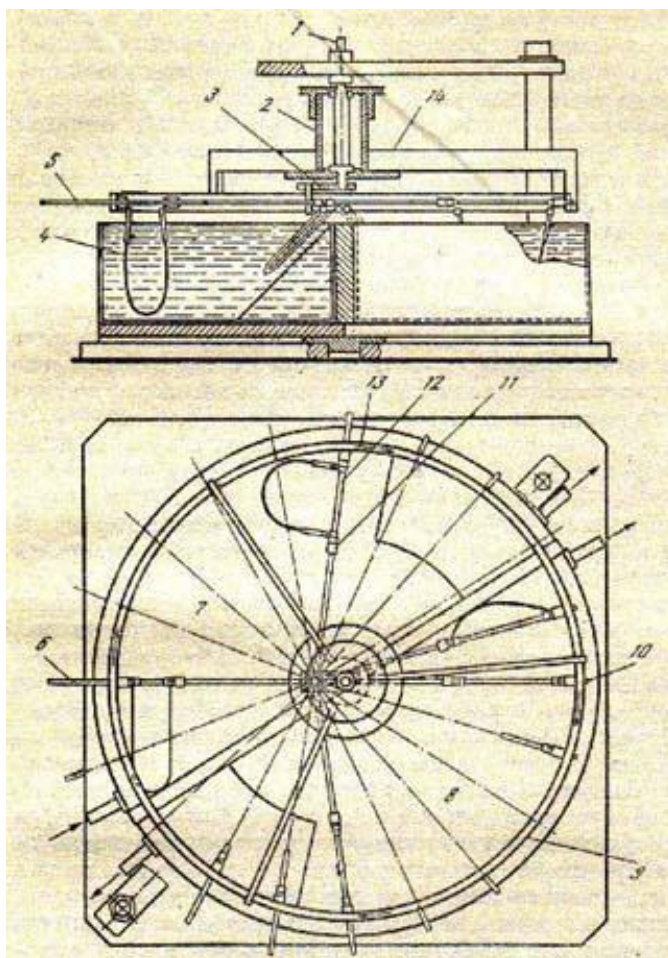


Рис. 1.10 Низькопотенціальний тепловий двигун Бенкса

На початку 80-х підприємство ІТ (International Innovative Technologies) створила та випробувала тепловий двигун, який мав 30 нітінолових петель. Діаметр перерізу петель - 22 міліметри. Нагрівачем нітінлового двигуна була ванна з гарячою водою температурою 55 С, а холодильником - навколишнє середовище з температурою 25°C. Частота обертання колеса двигуна складала 270 об/хв. При цьому потужність досягала 0.5 кВт. Нітіноловий двигун був досить надійним, і без поломок працював на протязі 1.5 років [21]. Характерною особливістю теплових нітінолових двигунів є великий крутний момент на валу і мала частота обертання. При цьому, при малій масі вони розвивають велику потужність.

В даний час, для перетворення теплової енергії в електричну застосовують термоелектричні генератори (ТЕГ). Складовою частиною ТЕГ є термоелектрична пара (термопара). Вона складається з двох напівпровідникових гілок n - і p - типу провідності. Напівпровідникові гілки щільно упаковані між двома керамічними колекторами. Колектори добре проводять тепло, але є добрими ізоляторами (рис. 1.11).

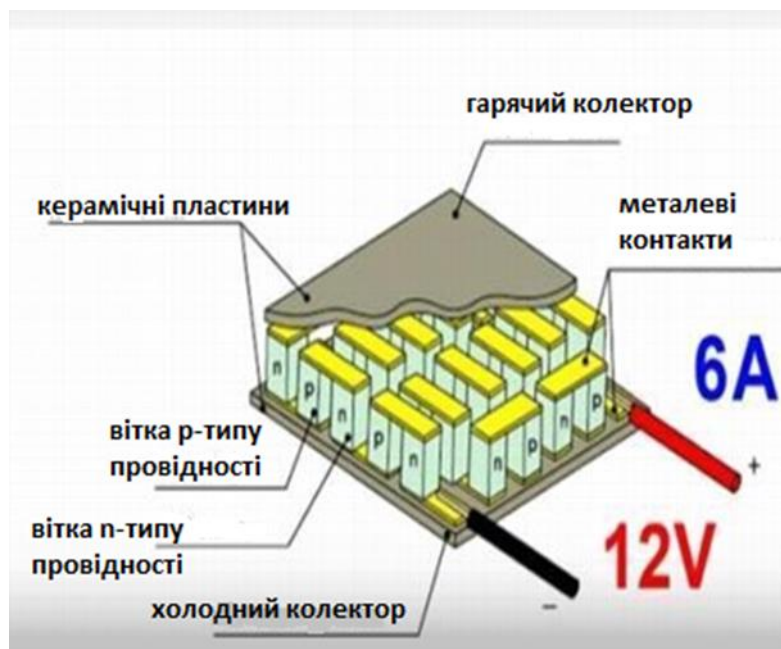


Рис. 1.11 - Будова термоелектричного генератора.

Гілки послідовно сполучені металевими комутаційними шинами. Кількість гілок в різних ТЕГ може змінюватися від кількох штук до кількох

сотень. Це відкриває феноменальні можливості для виготовлення ТЕГ з наперед заданою величиною напруги.

П'єзоелектричний тепловий двигун відноситься до механічних приводів, які працюють при малому перепаді температури між нагрівачем і холодильником [23]. Для перетворення теплової енергії в механічну п'єзоелектричний тепловий двигун використовує п'єзоелектричний ефект і ефект пам'яті форми. Двигун має вал, який закріплений на опорах, і має можливість обертатися, і радіальні нітіолові важелі. Важелі володіють ефектом пам'яті форми. Вони сполучені з п'єзоелектричними елементами при допомозі електродів. Електроди, при допомозі системи важелів чинять тиск на п'єзоелектричні елементи і їх періодично деформують. Технічний результат – отримання механічної енергії шляхом конвертації низькопотенціальної теплової.

Ще одним представником конвертерів теплової енергії є термоелектричний насос (ТЕН). ТЕН - пристрій, який конвертує теплову енергію гарячої електропровідної рідини в її кінетичну енергію [24]. Термоелектричний насос є об'єднанням в одному пристрої короткозамкнутого ТЕГ і електромагнітного насоса. В основу його роботи покладений принцип взаємодії короткозамкнутого термоелектричного струму з магнітним полем. На відміну від відомих на сьогодні електромагнітних насосів, які функціонують за рахунок зовнішніх джерел електроенергії, ТЕН не потребує зовнішнього живлення. Необхідна для роботи ТЕН тепла енергія підводиться від зовнішніх джерел.

Термоелектричний насос має ряд корисних особливостей:

- тривала робота без технічного обслуговування;
- можливість роботи в широкому інтервалі температур;
- неперервність функціонування, поки підтримується температурний градієнт.

Схема конструкції термоелектричного насоса зображена на рис. 1.11.

ТЕН є короткозамкнутим термоелектричним генератором, гілки якого при допомозі комутаційних шин, сполучені послідовно.

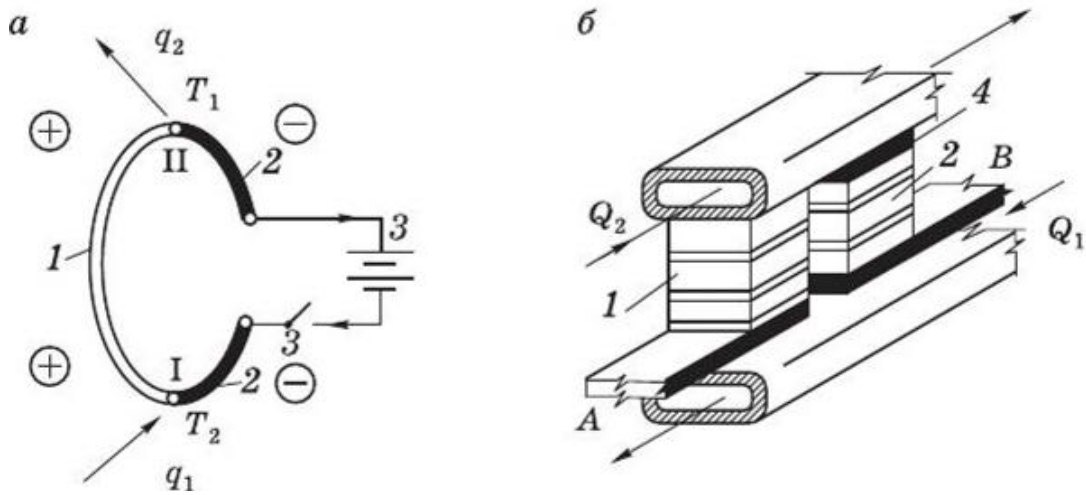


Рис. 1.12 Конструкція теплового термоелектричного насоса.

Напівпровідникові гілки 1 і 2 разом із шинами утворюють гарячі і холодні спаї. ЕРС яку розвиває ТЕН, рівна сумі ЕРС окремих елементів. При замиканні полюсів насоса через гілки та комутаційні шини протікає термоелектричний струм. Оскільки робоча рідина знаходиться в зовнішньому магнітному полі, то на нього діє магніторухійна сила Ампера, яка приводить її в рух.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Термоелектричні явища

В основу роботи термоелектричного генератора покладене явище Зеебека [26]. Суть явища полягає в тому, що в електричному колі, яке складене з двох різних, послідовно сполучених провідників виникає електрорушійна сила, яка називається термоЕРС. Явище Зеебека в багато разів сильніше проявляється в колі з напівпровідниками різного типу провідності, зокрема – n - типу і p - типу. В напівпровіднику n - типу провідності основними носіями заряду є електрони, а в напівпровіднику p - типу - дірки. Послідовне сполучення називають термоелементом, або термопарою.

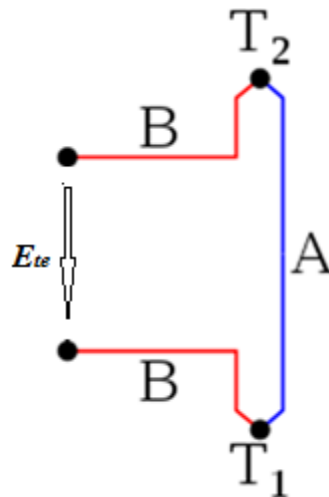


Рис 2.1 Схема виникнення термоелектричного явища Зеебека в термопарі.

Причина виникнення явища Зеебека в полягає в залежності концентрації і середньої енергії носіїв заряду від температури. Наприклад, якщо один кінець напівпровідника n-типу підтримувати при температурі T_2 , а другий при температурі T_1 , причому, $T_2 > T_1$ то електрони на гарячому кінці будуть мати більшу концентрацію ніж на холодному. Крім того, в напівпровіднику із збільшенням температури збільшується середня кінетична енергія. В результаті сукупної дії цих факторів в напівпровіднику n-типу в напрямку від гарячого до холодного кінця виникне градієнт концентрації, який зумовить потік електронів. Зрозуміло, що при цьому, на холодному кінці будуть накопичуватися електрони. Накопичення електронів триватиме до того часу, поки виникаюча при цьому напруга не спричинить зворотний потік електронів в протилежному напрямку,

який рівний первинному. Описане явище в напівпровідниках р – типу відбувається так само, з тією відмінністю, що в напівпровідниках р – типу на холодному кінці накопичуються позитивні заряди. По тій причині, в термопарі, яка складається з послідовно сполучених гілок п - і р – типу провідності термоЕРС гілок додається. Слід зазначити, що коефіцієнт термоЕРС напівпровідника п – типу негативний.

ТермоЕРС термопарі визначається співвідношенням:

$$E_{te} = (\alpha_p - \alpha_n) (T_2 - T_1) = \alpha \Delta T \quad (2.1)$$

де

α_p - коефіцієнт термоЕРС напівпровідника р – типу,

α_n - коефіцієнт термоЕРС напівпровідника п – типу,

α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС термопарі,

T_1 – температура холодного кінця термопарі,

T_2 – температура гарячого кінця термопарі.

Термоелектричне явище Пельтьє полягає у виділенні або поглинанні енергії у місці контакту двох напівпровідників з різним типом провідності. Кількість енергії і її знак залежить від напрямку протікання струму і від його величини.

$$P_{\Pi} = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I, \quad (2.2)$$

тут $\Pi = \alpha T$ – коефіцієнт Пельтьє,

α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС,

T – абсолютна температура контакту,

I – сила струму.

В даний час, для практичного використання застосовують термоелектричні генератори (ТЕГ). Це пристрої, складовою частиною яких є термоелектрична пара (термопара), яка складається з двох напівпровідників з п - і р - типом провідності. Термопарі щільно упаковані між двома керамічними пластинами - колекторами, які добре проводять тепло, але одночасно є хорошими електроізоляторами (рис. 2.2).

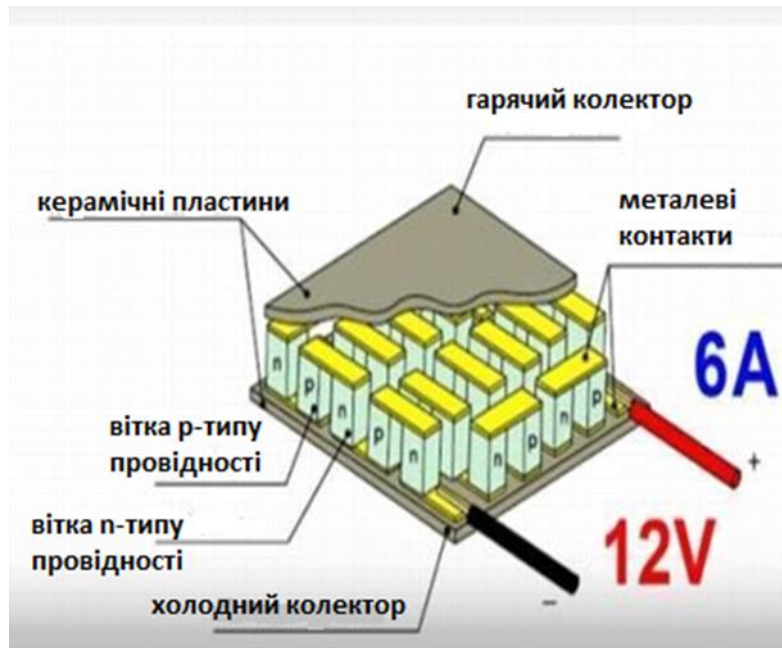


Рис. 2.2 - Будова термоелектричного генератора.

Термопари по електричному струму мідними комутаційними шинами сполучені послідовно, а по тепловому потоку - паралельно. Кількість термопар в різних термоелектричних генераторах може варюватися від кількох до кількох сотень. Це відкриває широкі можливості для виготовлення ТЕГ з довільною напругою генерації від мілівольт до декількох десятків вольт.

Причиною виникнення явища Пельтьє є контактна різниця потенціалів. Зокрема, в місці контакту двох напівпровідників виникає контактна різниця потенціалів, яка створює внутрішнє контактне поле. Якщо через контакт пропустити постійний електричний струм, то контактна різниця потенціалів або сприятиме, або заважатиме його проходженню.

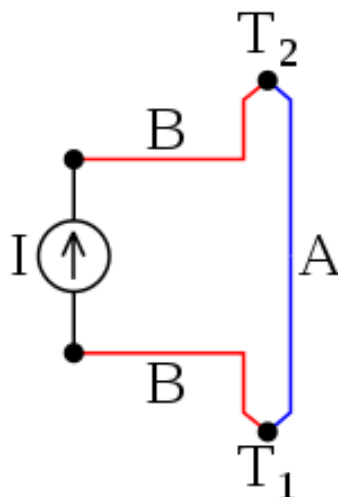


Рис 2.3 Схема виникнення явища Пельтьє

Якщо електричний струм протікає назустріч контактному полю, то зовнішнє джерело електроенергії повинно виконати додаткову роботу, яка виділиться в місці контакту у вигляді додаткового тепла. Якщо електричний струм протікає в напрямку контактного поля, то контактне поле підтримує струм і само виконує роботу по переміщенню зарядів. Необхідна енергія забирається від контакту і він охолоджується.

2.2 Термодинамічний розрахунок термопари

Якщо до термопари приєднати зовнішній опір R , то в електричному колі виникне струм [28]. Його величину знайдемо із другого закону Кірхгофа для електричного кола

$$I = \frac{E_{te}}{R + r_{te}}, \quad (2.3)$$

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

r_p і r_n опори гілок p - і n - типу,

r_k - опір комутаційних шин,

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

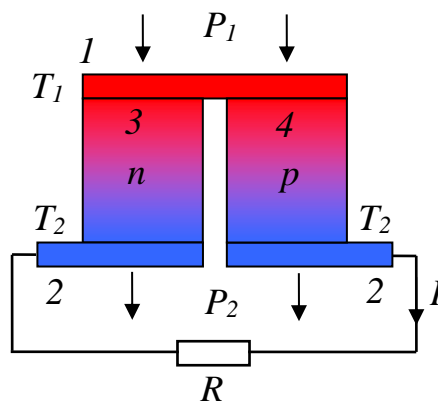


Рис. 2.4 Схема термопари із зовнішнім опором. 1 і 2 –холодний і гарячий колектори, 3 і 4 - гілки термоелемента n - і p - типу.

Опір комутації знайдемо у вигляді безрозмірної величини

$$m_p = \frac{r_k}{r_p + r_n}. \quad (2.4)$$

Знайдемо сумарний опір гілок

$$r_{te} = (\rho_p + \rho_n)(1 + m_p) \frac{l}{S}, \quad (2.5)$$

тут ρ_p і ρ_n - питомі опори гілок p і n - типу,

l – довжина гілок,

S - площа перерізу гілок.

Зовнішній опір корисно записати у вигляді безрозмірної величини

$$M = \frac{R}{r_{te}}, \quad (2.6)$$

тоді співвідношення (2.3) можна привести до вигляду

$$I = \frac{E_{te}}{r_{te}} \frac{1}{(M + 1)}, \quad (2.7)$$

а напруга на навантаженні

$$U = E_{te} \frac{M}{(M + 1)}. \quad (2.8)$$

Використовуючи закон Джоуля знайдемо потужність генерації ТЕГ

$$P_{te} = UI = \frac{E_{te}^2}{r_{te}} \frac{M}{(M + 1)^2} = \frac{\alpha_{pn}^2 (\Delta T)^2}{(1 + m_p)(\rho_p + \rho_n) \frac{l}{S}}. \quad (2.9)$$

Термоелектричний генератор є твердотільною тепловою машиною, в якій робочим тілом є електронний газ. Тому роботу ТЕГ можна розглянути з термодинамічної точки зору. Виразмо перепад температур між колекторами ТЕГ через теплові потоки у гілках та його матеріальні параметри. В умовах адіабатичної ізоляції бокових граней гілок термопари та при розімкнутому електричному колі тепловий потік через термопару описується законом Фур'є

$$P_{\kappa} = \Delta T (\kappa_p + \kappa_n) \frac{S}{l}. \quad (2.10)$$

де κ_p – коефіцієнт теплопровідності гілки p – типу,

κ_n – коефіцієнт теплопровідності гілки n – типу,

ΔT - перепад температури між колекторами.

При протіканні електричного струму в обох вітках генерується тепло Джоуля

$$P_j = I^2 r_{te}, \quad (2.11)$$

Крім того, на гарячому колекторі поглинається потужність Пельтьє

$$P_1^{\Pi} = I \alpha_{pn} T_1, \quad (2.12)$$

а на холодному колекторі потужність Пельтьє

$$P_2^{\Pi} = I \alpha_{pn} T_2. \quad (2.13)$$

Складемо баланс потужностей на гарячому і холодному колекторах термопари. Вважатимемо, що половина тепла Джоуля йде до гарячого, а половина до холодного колектора

$$P_1 = P_1^{\Pi} + P_{\kappa} - \frac{1}{2} P_j, \quad (2.14)$$

$$P_2 = P_2^{\Pi} + P_{\kappa} + \frac{1}{2} P_j, \quad (2.15)$$

Оскільки потік кондуктивного тепла не залежить від сили струму, то потужності P_1 і P_2 доцільно виразити через P_{κ}

$$\frac{P_1}{P_{\kappa}} = 1 + \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)(1 + m_p)} \frac{1}{M + 1} \left[T_1 - \frac{\Delta T}{2(M + 1)} \right], \quad (2.16)$$

$$\frac{P_2}{P_{\kappa}} = 1 + \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)(1 + m_p)} \frac{1}{M + 1} \left[T_2 - \frac{\Delta T}{2(M + 1)} \right], \quad (2.17)$$

Величина

$$z = \frac{\alpha_{pn}^2}{(\kappa_p + \kappa_n)(\rho_p + \rho_n)}, \quad (2.18)$$

яка характеризується тільки матеріальними параметрами напівпровідникових гілок називається термоелектричною добротністю матеріалу, а величина

$$z_{te} = \frac{z}{(1 + m_p)}, \quad (2.19)$$

термоелектричною добротністю термопари.

Керуючись балансом потужностей, знайдемо електричну потужність, яку генерує термоелемент

$$P_{te} = P_1 - P_2. \quad (2.20)$$

ККД термопари знайдемо як відношення корисної електричної потужності до теплової потужності, підведеної до гарячого колектора

$$\eta = \frac{P_{te}}{P_1} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M/(M+1)}{1 + \frac{M+1}{z_{te}T_1} - \frac{\Delta T}{2T_1} \frac{1}{M+1}}. \quad (2.21)$$

Перший член описує ККД ідеальної теплової машини Карно, а другий – його зменшення за рахунок незворотних теплових втрат, викликаних теплопровідністю гілок і тепловою генерацією Джоуля.

Максимальну електричну потужність генерації знайдемо з умови

$$\frac{dP_{te}}{dM} = \frac{E_{te}^2}{r_{te}} \frac{d}{dM} \left(\frac{M}{(M+1)^2} \right) = 0. \quad (2.22)$$

Вона досягається при $M=1$, що відповідає рівності навантажувального опору і внутрішнього опору термоелемента. При $R = r_{te}$ максимальна потужність

$$P_{te}^{\max} = \frac{E_{te}^2}{4r_{te}}. \quad (2.23)$$

При цій умові величина ККД термопари

$$\eta_p = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{1}{4/(z_{te}T_1) + 2 - \Delta T/2T_1}. \quad (2.24)$$

Максимальний ККД знайдемо з умови

$$\frac{d\eta_{te}}{dM} = 0. \quad (2.25)$$

При

$$M_0 = \sqrt{1 + z_{te}T_c}, \quad (2.26)$$

ККД досягне максимальної величини [28]

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M_0 - 1}{M_0 + T_2/T_1}, \quad (2.27)$$

тут $T_c = (T_1 + T_2)/2$ - абсолютна середня температура.

2.3 Короткозамкнутий термоелектричний генератор

Класичний термоелектричний генератор містить велику кількість послідовно сполучених термопар. Кожна термопара має тепловий контакт з гарячим і холодним колектором.

Короткозамкнутий термоелектричний генератор містить лише дві гілки n- і p- типу провідності, тобто лише одну термопару [27]. При цьому площа віток

може бути майже рівною площі панельної термобатареї. В такому випадку термопара буде мати малий омичний і тепловий опір і малу генеровану термоЕРС. Однак, відношення напруги генерації до омичного опору може дати значний струм. Зокрема, в нашому випадку, в залежності від режиму роботи пристрою, струм може досягати сотень і тисяч ампер [27,28].

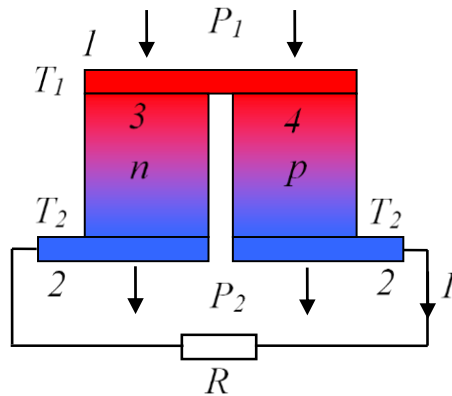


Рис. 2.5 Схема короткозамкнутого термоелектричного генератора. 1 і 2 – холодний та гарячий теплові колектори, 3 і 4 - гілки термопари n- і р- типу.

Омичний опір термопари описується співвідношенням

$$R = \rho_n \frac{l_n}{S_n} + \rho_p \frac{l_p}{S_p}, \quad (2.28)$$

де ρ_n – питомий опір гілки n- типу провідності,

ρ_p – питомий опір гілки р - типу провідності,

l_n – висота гілки n - типу провідності,

ρ_p – висота гілки р - типу провідності,

S_n – площа гілки n - типу провідності,

S_p – площа гілки р - типу провідності.

Тепловий опір термопари знаходять за формулою,

$$\Theta = \frac{1}{\kappa_n} \frac{l_n}{S_n} + \frac{1}{\kappa_p} \frac{l_p}{S_p}, \quad (2.29)$$

де κ_n – питомий коефіцієнт теплопровідності гілки n- типу провідності,

κ_p – питомий коефіцієнт теплопровідності гілки р - типу провідності.

Короткозамкнуті термоелектричні генератори застосовуються дуже рідко. Як правило, це джерела живлення для електромагнітів, термоелектричних насосів для прокачування рідких металів і електролітів, конвертерів напруги з

низької у високу тощо. В короткозамкнутих генераторах, для охолодження напівпровідникових віток використовуються засоби активного охолодження. Визначальною особливістю короткозамкнутого термоелектричного генератора є мала кількість комутаційних сполучень та теплоізоляційних шарів, що без сумніву підвищує його термодинамічний ККД.

Тепловий та температурний рівень низькопотенціальних джерел енергії наведений в таблиці 2.1.

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	-	-	-

Джерелами теплової енергії в короткозамкнутих термоелектричних генераторах також можуть бути розплавлені метали, солі, радіоізотопи, ТВЕЛ ядерних реакторів та ін.. Надійний тепловий і електричний контакт напівпровідникової гілки з корпусом теплопровода забезпечуються шляхом пайки, зварки або сильного притиску через теплопровідні прокладки.

Переваги короткозамкнутої конструкції ТЕГ очевидні. Це, в першу чергу, підвищення термодинамічного ККД внаслідок відсутності ізоляційних шарів та шарів комутації. В недалекій перспективі їх можна використовувати в надпотужних термоелектричних генераторах.

2.4 Коструювання системи охолодження

Короткозамкнуті ТЕГ, як і звичайні потребують охолодження. Для цього можуть використовуватися як активні повітряні радіатори і рідиннеохолодження. Особливо вдалим є поєднання ТЕКТЕ з тепловою трубкою. Хоч сама трубка не охолоджує пристрою, вона може швидко поглинати великі кількості тепла і виносити його в зону охолодження.

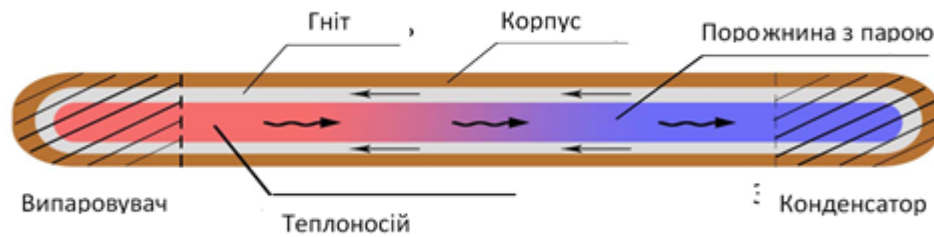


Рис 2.6 Схематична будова теплової трубки

Теплова трубка (ТТ) являє собою теплопровід, який передає велику кількість тепла при малих температурних градієнтах на корпусі. Це продиктовано більшим на кілька порядків ефективним коефіцієнтом теплопровідності теплових трубок порівняно з коефіцієнтом теплопровідності металу. ТТ є герметично запаяним контейнером, в якому знаходиться деяка кількість рідкого теплоносія. В місці нагріву рідина поглинає теплову енергію і випаровується, а в місці охолодження пара рідини, яка перемістилася з місця нагрівання конденсується. При цьому виділяється теплота конденсації. Рух газоподібної фракції рідини з місця нагріву в місце конденсації здійснюється за рахунок виникнення градієнту тиску насиченої пари. Градієнт залежить від різниці температури в місцях випаровування і конденсації.



Рис. 2.7 Охолодження ТЕКТЕ тепловими трубками

При цьому ефективний коефіцієнт теплопровідності трубки різко падає і передача тепла зупиниться. Для запобігання таким явищам треба грамотно підходити до вибору теплоносія.

Як видно з табличних даних, ідеальним переносником теплової енергії є вода. Вона має багато переваг перед іншими носіями. Зокрема, у води в широкому інтервалі температур, при наявності найбільшого коефіцієнта питомої теплоти пароутворення є найменша ймовірність виникнення центрів пароутворення. При фінальному виборі переносників тепла визначальну роль відіграє доступність і легкість заправки в систему охолодження. Після заливання води в трубку, її розпікають до високої температури, після чого заварюють. Після такої процедури певна частина повітря вийде, а в трубці встановиться оптимально низький тиск. Завдяки оптимальному тиску властивості води сильно зміняться. Наприклад, знизиться температура кипіння. Тиск водяної пари теплової трубки і кількість води підбирають так, щоб температура кипіння складала не більше 30°C .

Теплопровідність типових матеріалів для виготовлення капсул теплових трубок.

Таблиця 2.1

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності Вт/м·К
Графен	4000 - 5780
Алюміній	202 - 236
Бронза	47 - 180
Латунь	86 - 111
Мідь	389 - 401
Залізо -	74 - 92
Нікель	55 - 93
Сталь	11 - 78
Титан	14 - 16

Повторне транспортування конденсату в місце випаровування відбувається за рахунок капілярної різниці тисків у гноті.

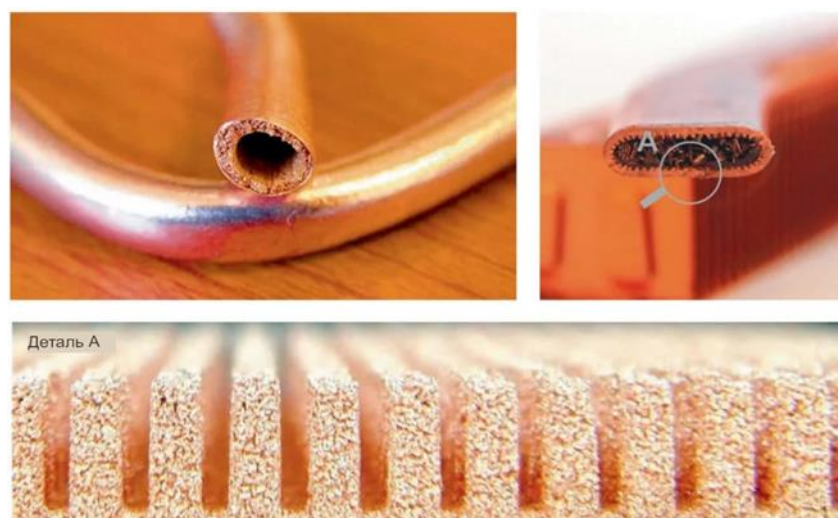


Рис. 2.4 Структура поперечного перерізу теплової трубки з капілярно – пористим гнотом

Гніт знаходиться на внутрішній поверхні, розташованого всередині теплової трубки. В зв'язку з тим, що капілярна структура трубок байдужа до орієнтації в гравітаційному полі, найбільше використовується якраз такий тип ТТ. Відношення ефективної теплопровідності теплової трубки до коефіцієнта теплопровідності металів на кілька порядків більша. Зокрема, ефективний коефіцієнт теплопровідності ТТ складає $10^6 - 10^7$ Вт/м К, в той час, як коефіцієнт

теплопровідності металів порядку 10^2 Вт/м К . Треба відмітити, що перегрів рідини в місці випаровування небезпечний. При перегріві настає криза кипіння, при якій вся вода випарується. Тоді транспортування тепла йде по металевих стінках ТТ. Як правило, ефективний коефіцієнт теплопровідності є малим. Адже стінки є тонкими, і не завжди мають великий коефіцієнт теплопровідності.

Кількість перенесеного тепловою трубкою тепла прямопропорційна об'єму теплоносія. Зрозуміло що, для перенесення великих теплових потоків, кількість теплоносія також повинна бути великою. Це значить, що діаметр і довжина теплової трубки повинні бути значними. Однак, збільшуючи діаметр трубками автоматично збільшимо тепловий опір в радіальному напрямку. Це вплине на здатність переносу тепла в радіальному напрямку і зменшенню теплотранспортних можливостей трубки в цілому. Крім цього, кількість відведеної теплоти пропорційна швидкості і частоті переходів рідина–пара–рідина. Тому треба вибирати трубку оптимальної площі поперечного перерізу і оптимальної довжини. Найкращий результат вибору технічних параметрів трубки дає експеримент.

Отже, тепловим трубкам немає альтернативи, якщо потрібно забезпечити швидке і дієве охолодження елементів конструкції ТЕКТЕ, які мають високу питому потужність, а також коли необхідно відвести тепло з важко доступних місць. Для цього трубку вигинають забезпечуючи необхідний профіль теплопроводу.

Хоч і вигини ТТ знижують ефективність теплотранспортних властивостей, але в багатьох випадках можуть виявитися визначальними. Адже пристосування форми трубки до потреб користувача дозволить обійти інші компоненти конструкції ТЕКТЕ, полегшуючи конструювання пристрою.

Теплоносіїв	Температура кипіння (С°) (при тиску 101.3 кПа)	Питома теплота пароутворення (кДж/кг)	Кількість речовини, що випарувалася (г)
Вода	100	2256	0.44
Пропіловий спирт	97.2	750	1.33
Бензол	80.1	394	2.5
Етиловий спирт	78.3	840	1.2
Тетрахлорметан	76.6	195	5.13
Метиловий спирт	64.6	1100	0.9
Хлороформ	61.3	279	3.58
Ацетон	56.3	525	1.9
Фреон 113	48	260	3.85
Пентан	36.1	360	2.8
Диетилефір	34.5	384	2.6
Фреон (11)	24	200	5
Диметилефір	-24.8	467	2.14
Фреон 12	-24.9	162	6.17
Аміак	-33.4	1370	0.73

2.5 Електротепловий метод розрахунку

Розрахунок параметрів ТЕНТЕК, як теплової машини з твердим робочим тілом, будемо проводити використовуючи подібність рівнянь електропровідності поза джерелами ЕРС і теплопровідності поза джерелами тепла [25,26]. Керуючись подібністю рівнянь процеси теплопереносу представляють в формі теплових схем, складовими якої є джерела, приймачі та теплові опори. Актуальними також є поняття теплового вузла і теплового контура. Кожному вузлу теплової схеми ставиться у відповідність певна температура T . Теплові опори, які сполучають вузли, знаходяться на шляху поширення тепла від місць з вищою температурою до місць з нижчою температурою. Потоки тепла і перепади температур в тепловій схемі описуються

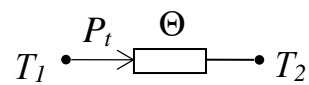
законами Ома та Кірхгофа для теплових схем. Вони повністю подібні до законів Ома і Кірхгофа для електричних схем. На підставі цих законів можна складати теплові схеми, їх аналізувати, робити еквівалентні перетворення та розрахунки.

Потік тепла, який йде від вузла з температурою T_1 до вузла з температурою T_2 описують законом Ома

$$P_t = \frac{\Delta T}{\Theta}, \quad (2.30)$$

тут - $\Delta T = T_1 - T_2$ – різниця температур між вузлами,

Θ – тепловий опір гілки теплового кола.



Різниця температур між кінцями кількох послідовно з'єднаних гілок теплового кола описується другим законом Кірхгофа

$$T_1 - T_2 = \Delta T = \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (2.31)$$

тут

$$\Delta T_i = \Theta_i P_t,$$

- різниця температур між кінцями i – тої гілки.

Тепловий опір кількох послідовно з'єднаних гілок

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \Theta_i \quad (2.32)$$

тут

$$\Theta_i = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l_i}{\Delta S_i},$$

- тепловий опір i – тої гілки.

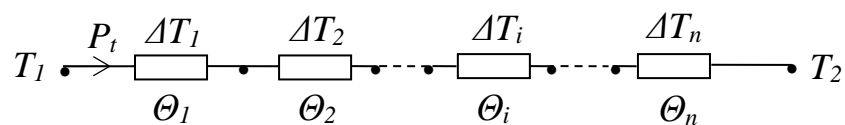


Рис. 2.7 – Еквівалентна теплова схема послідовного сполучення теплових опорів

Потік тепла який йде від вузла теплового кола з температурою T_1 до вузла з температурою T_2 по кількох гілках описується першим законом Кірхгофа для теплових потоків:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{ii}, \quad (2.33)$$

де потік тепла в i -тій гілці

$$P_{ii} = \frac{\Delta T}{\Theta_i}. \quad (2.34)$$

Отже, тепловий опір паралельно з'єднаних гілок

$$\Theta = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Theta_i} \right)^{-1}. \quad (2.35)$$

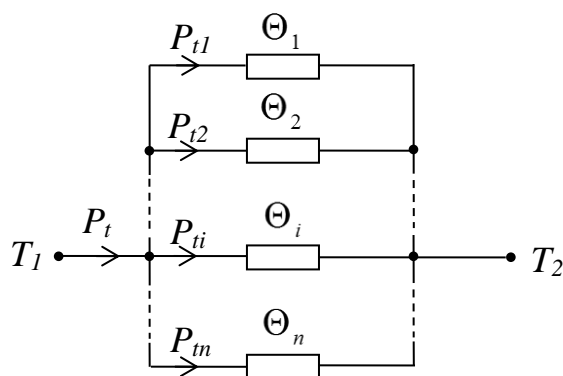


Рис. 2.8 - Теплова схема паралельного сполучення кількох теплових гілок.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Багатоелементні ТЕГ

Пряме перетворення низькопотенціальної теплової енергії в електричну здійснюється термоелектричними генераторами (ТЕГ) [27, 28]. Проте, можливості ТЕГ, які працюють при малій різниці температур між гарячим і холодним колекторами обмежені. При ККД термоелектричного перетворення треба враховувати реальну конструкцію ТЕГ, і брати до уваги непродуктивні втрати енергії в на комутаційних спаях та електричній ізоляції. Загальновідомо, що для практичних застосувань часто використовуються багатоелементні термоелектричні генератори. Це є наслідком того, що споживачі електроенергії живляться напругами від декількох вольт до десятків вольт, в той час як напруга, яку дають окремі термопари складає десятки і соті долі вольта. Отже, їх необхідно сполучати послідовно. Але при виході з ладу однієї з гілок вся конструкція перестане працювати. Тому, для підвищення надійності електричної схеми ТЕГ вона повинна мати паралельні гілки. В результаті, схема електричних сполучень реального ТЕГ має сотні і тисячі елементів, які сполучені один з одним послідовно-паралельно по струму, і паралельно по теплу. ККД такого ТЕГ описується формулою

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

де

$$\Delta T_G = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \Delta T_i \right]}{m} - \text{усереднений перепад температури,}$$

m – кількість з'єднаних послідовно гілок,

M – приведене навантаження,

ΔT_i – перепад температури на i -тій термопарі,

T_i – температура гарячого спаю i – тої термопари,

$$Z_G = \frac{\sum_{i=1}^m (\alpha_i \Delta T_i)^2}{(1+m_\sigma)(1+m_\kappa) \Delta T_G \sum_{i=1}^m (\sigma_i)^{-1} \sum_{i=1}^m (\kappa_i)^{-1} \Delta T_i} \quad (3.2)$$

- термоелектрична добротність ТЕГ,
- α_i коефіцієнт термоЕРС,
- σ_i коефіцієнт електропровідності,
- κ_i - коефіцієнт теплопровідності термоелементів.

Якщо режим роботи термопар подібний, то співвідношення (3.2) зведеться до вигляду

$$Z_r = \frac{Z_0}{(1 + m_\sigma)(1 + m_\kappa)} \quad (3.3)$$

де Z_0 – термоелектрична добротність матеріалу,
 m_κ - коефіцієнт, який описує втрати тепла,
 m_σ - коефіцієнт, який описує втрати електроенергії.

Електричну потужність, викликану втратами струму через ізоляцію можна записати так [28]

$$P_0 = P \frac{M}{2} \frac{r_0}{r_i} n^2$$

де P – потужність ТЕГ,
 M – приведена величина опору навантаження;
 r_0 – внутрішній опір термопари;
 r_i – омичний опір ізоляції термопари;
 n – кількість термопар в генераторі.

Допоки справедлива нерівність

$$\frac{r_0}{r_i} n^2 \ll 1,$$

електричні втрати корисної потужності невеликі.

Проте, при

$$\frac{r_0}{r_i} n^2 > 1,$$

електричні втрати і зниження ефективності буде настільки великим, що його потрібно враховувати. Через це ТЕГ на кількість послідовно-паралельних сполучень має обмеження.

В світлі сказаного очевидні переваги короткозамкнутих термоелектричних генераторів [28]. По-перше, це збільшення термодинамічного ККД, по-друге-висока надійність і простота конструкції. Однак, короткозамкнуті термоелектричні генератори використовуються вкрай рідко. Причиною цього є низька напруга генерації, і неможливість транспортування на великі відстані струмів в десятки і сотні ампер. В зв'язку із цим, найперспективнішим, з точки зору ККД перетворення, міг би стати термоелектричний низькопотенціальний конвертер теплової тепла в механічну енергію (ТЕНП), описаний в [31,32]. В ТЕНП процеси генерації і конвертації короткозамкнутого струму відбувається в межах одного пристрою.

3.2 Будова і принцип дії ТЕКТЕ

Принцип дії термоелектричного низькопотенціального конвертера теплової енергії в механічну пояснює рис. 3.1. Так, на рисунку показаний ротор, який закріплений в циліндричному статорі з можливістю обертання навколо провідної осі. Магнітна система ТЕКТЕ (на схемі не показана) в напрямку нормальному до площини ротора збуджує магнітне поле. Струм, який генерується короткозамкнутим ТЕГ, по провідній шині прямує до осі, а згодом, через рідкометалеві контакти на ротор. Оскільки ротор має циліндричну симетрію, струм в ньому протікає вздовж радіусів. При цьому виникає сила Ампера, яка обертає ротор. Напрямок обертання залежить від напрямків струму в роторі та магнітної індукції

$$F_a = IBr ,$$

де

I – струм ротора,

B – магнітна індукція в роторі,

r – його радіус.

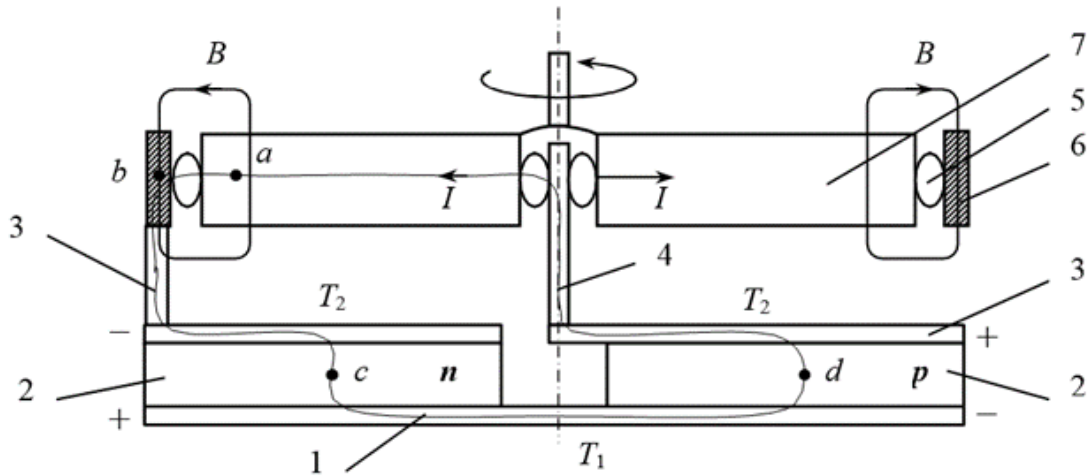


Рис. 3.1 Схема термоелектричного низькопотенціального конвертера теплової енергії в механічну (ТЕКТЕ). 1 – гарячий колектор, 2 – гілки термопар р- і n - типу провідності, 3 – шини комутації, 4 – провідна вісь обертання, 5 – рідкометалеві контакти, 6 - статор, 7 – ротор.

3.3 Розрахунок теплового режиму

На схемі термоелектричного конвертера теплової енергії, джерело тепла характеризується перепадом температури ΔT . Генеруючі вітки n-типу і р- типу провідності по потоку тепла сполучені паралельно. На еквівалентній тепловій схемі вони зображені у вигляді двох теплових опорів Θ_n і Θ_p між нагрівачем, який має температуру T_1 і охолоджувачем з температурою T_2 . Теплові опори елементів - змінні величини і залежать від величини струму генерації.

Знайдемо еквівалентний тепловий опір між нагрівачем та охолоджувачем. Для цього спочатку знайдемо тепловий опір паралельно сполучених напівпровідникових гілок.

$$\Theta_{pn} = \frac{\Theta_p \Theta_n}{\Theta_p + \Theta_n}.$$

Керуючись еквівалентною тепловою схемою ТЕКТЕ знайдемо його повний тепловий опір

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_{pn},$$

Використовуючи закон Ома для теплового кола знайдемо різницю температури між спаями ТЕКТЕ

$$\Delta T' = \Delta T \frac{\Theta_{pn}}{\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_{pn}},$$

де $\Delta T = T_1 - T_2$,

T_1 і T_2 - температури гарячого і холодного колекторів,

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

T_1' і T_2' - температури гарячого і холодного спаяв ТЕКТЕ.

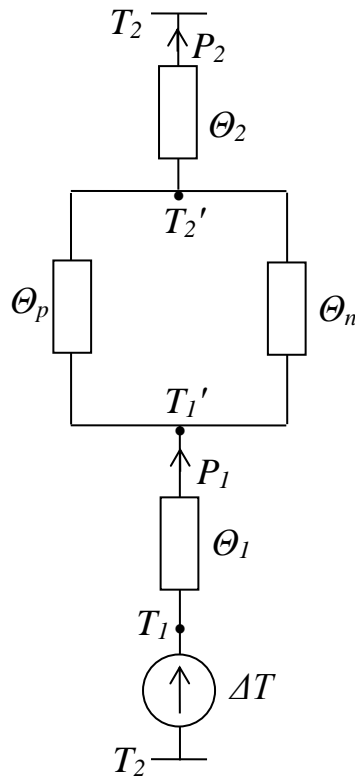


Рис. 3.2. Еквівалентна теплова схема ТЕКТЕ:

ΔT – перепад температури між нагрівачем і охолоджувачем,

θ_1 – тепловий опір між нагрівачем і гарячим колектором термопари,

θ_2 – тепловий опір між охолоджувачем і холодним колектором термопари,

θ_n – тепловий опір гілки n- типу,

θ_p - тепловий опір гілки p- типу.

Зрозуміло, що між спаями термопари різниця температури буде меншою ніж різниця температури між нагрівачем і охолоджувачем. Це можна пояснити тепловими втратами на електроізоляційних і комутаційних та спаях.

3.4 Розрахунок технічних параметрів

Будемо розглядати термопару, своєрідний термоелектричний генератор. Його особливістю є відсутність омичного опору з'єднаного з полюсами джерела

напруги. Роль омичного опору виконує електрорушійна сила індукції Фарадея, при генерується при обертанні ротора ТЕКТЕ в магнітному полі. Індукційна ЕРС направлена назустріч термоелектричному струму і зрівноважує його. Розрахуємо технічні параметри ТЕКТЕ. Для цього скористаємося еквівалентними схемами заміщення. Розглянемо електричну (рис.3а) і теплову (рис.3б) схему.

Роботу ТЕКТЕ можна описати узагальненим законом Ома і другим рівнянням Максвелла в інтегральній формі

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \alpha \sigma \nabla T, \quad (3.4)$$

$$\oint \vec{E} dl = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3.5)$$

де E – вектор напруженості електричного поля,

$S = \pi r^2$ - площа перерізу ротора пристрою,

$\Phi = BS$ – магнітний потік,

r - радіус ротора,

B - магнітна індукція,

j – густина електричного струму,

σ – середній коефіцієнт електропровідності гілок термопари,

α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС гілок термопари

∇T – температурний градієнт в термопарі.

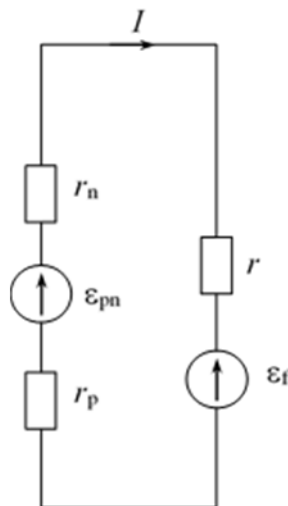


Рис. 3.3 Електрична еквівалентна схема ТЕКТЕ:

r_p - омичний опір вітки р - типу,

r_n – омичний опір вітки n - типу,

r – сумарний опір електричного кола ТЕКТЕ,

ε_{pn} – ЕРС термопари.

Проінтегруємо рівняння (3.5) по замкнутому контуру $a - b - c - d - a$ і врахуємо співвідношення (3.4)

$$I(r_{pn} + r) - \alpha \Delta T' = \varepsilon_f, \quad (3.6)$$

де I - сила струму,

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

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

α_p і α_n – коефіцієнти термоЕРС гілок термопари.

Знайдемо електрорушійну силу

$$\varepsilon_f = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(BS) = -B \frac{\partial S}{\partial t} = -B \pi r^2 n = -BSn = -\Phi n \quad (3.7)$$

де n – частота обертів.

Формулу (3.6) запишемо у вигляді

$$I r_{pn} (1 + m_\sigma) - \frac{\alpha_{pn}}{1 + m_\kappa} \Delta T = -\Phi n, \quad (3.8)$$

де $m_\sigma = \frac{r}{r_{pn}}$ - безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати електроенергії,

$m_\kappa = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{\Theta_{pn}}$ - безрозмірний коефіцієнт, який описує втрати теплової

енергії,

В режимі неробочого ходу (НХ) частота обертів ротора є максимальною.

При цьому, струм в колі відсутній. Якщо $I = 0$, то з формули (3.8) отримаємо

$$n_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T'}{\Phi} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi} \cdot \frac{1}{1 + m_\kappa}. \quad (3.9)$$

Якщо ротор нерухомий - реалізується режим короткого замикання (КЗ).

При цьому струм максимальний

$$I_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{r_{pn}} \cdot \frac{1}{(1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)}. \quad (3.10)$$

Аналогічно, для частоти обертів ротора ТЕКТЕ маємо

$$n = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi (1 + m_\kappa)} (1 - S), \quad (3.11)$$

де

$$S = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}}, \quad (3.12)$$

безрозмірний коефіцієнт ковзання.

Як видно з рівнянь (3.11) та (3.12) в режимі КЗ коефіцієнт $S=0$, і зростає при зменшенні частоти n . Максимуму $S=1$ ковзання набуває в режимі КЗ.

Механічну потужність ТЕКТЕ знайдемо як добуток ε_f на струм I

$$P = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn} (1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)^2} S(1 - S). \quad (3.13)$$

Екстремум потужності знайдем із рівняння $\partial P / \partial S = 0$. Отримаємо:

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

або $1 - 2S = 0$. Очевидно, що максимум наступить при $S = 1/2$.

Знайдемо максимальну потужність:

$$P_{\max} = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{4r_{pn} (1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)^2} \quad (3.14)$$

Відомо, що механічний момент зв'язаний з потужністю співвідношенням

$$M = \frac{P}{2\pi n}, \quad (3.15)$$

тому для максимального механічного моменту ТЕКТЕ отримаємо

$$M_{\max} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{2\pi r_{pn} (1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)} S. \quad (3.16)$$

Залежність технічних параметрів ТЕКТЕ від коефіцієнта ковзання приведена нижче.

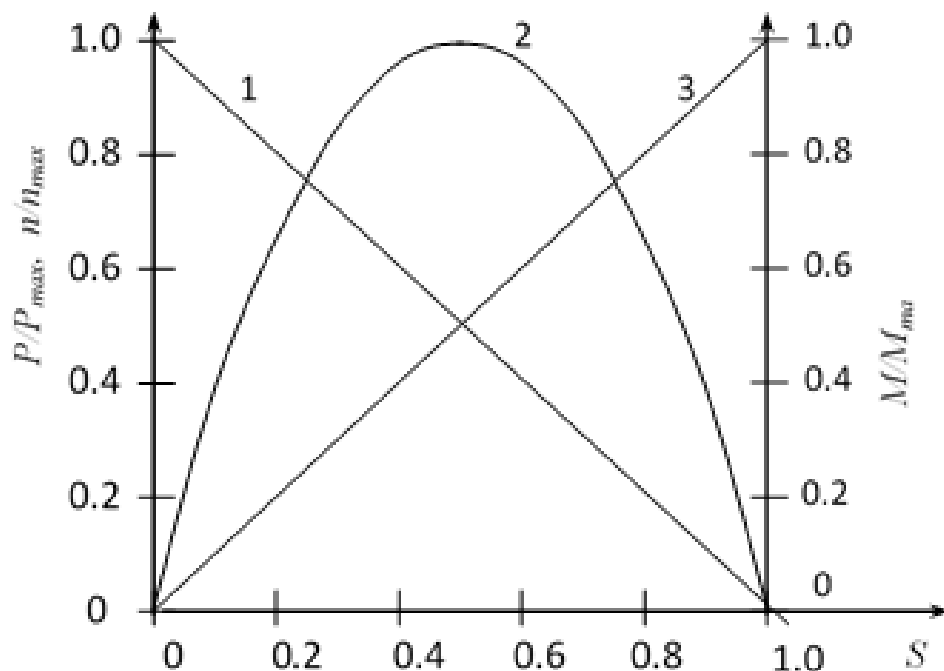


Рис. 3.4 Залежність технічних параметрів ТЕКТЕ від коефіцієнта ковзання. Криві 1 – n/n_{max} , 2 – P/P_{max} , 3 – M/M_{max} .

Знайдемо технічні параметри в режимі максимальної потужності. При $S = 1/2$ маємо

$$I_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2r_{pn}} \cdot \frac{1}{(1+m_\sigma) \cdot (1+m_\kappa)}, \quad (3.17)$$

$$M_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{4\pi r_{pn} (1+m_\sigma) \cdot (1+m_\kappa)}, \quad (3.18)$$

$$n_p = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{2\Phi(1+m_\kappa)}. \quad (3.19)$$

З отриманих залежностей робимо висновок, що потужність не залежить від магнітної індукції. Це цілком зрозуміло, адже момент прямо пропорційний, а частота обертання ротора обернено пропорційна до магнітної індукції.

3.5 Розрахунок ефективності

Якщо втратами потужності ТЕКТЕ на тертя знехтувати, то для ККД пристрою отримаємо співвідношення

$$\eta = \eta_\kappa \frac{S(1-S)}{(Z^* T_1)^{-1} + S - S^2 (\Delta T / 2T_1)}, \quad (3.20)$$

де:

$\eta_\kappa = \Delta T / T_1$ - ККД циклу Карно,

$$z_k = z/(1 + m_\sigma)(1 + m_k)$$

z - термоелектрична добротність термоелектрика [1].

При максимальній механічній потужності ТЕКТЕ для ККД маємо:

$$\eta_p = \eta_\kappa \frac{1}{4(Z^*T_1)^{-1} + 2 - \Delta T/2T_1} \quad (3.21)$$

Режимами ТЕКТЕ можна керувати. Зокрема, він може працювати в режимі максимального ККД. Ковзання, при якому реалізується цей режим знайдемо з умови екстремуму

$$\frac{d\eta}{dS} = 0.$$

$$S_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + ZT}}, \quad (3.22)$$

тут $T = (T_1 + T_2)/2$ – середня абсолютна температура колекторів.

При $S = S_0$ для технічних параметрів ТЕКТЕ маємо:

$$\eta_p = \eta_\kappa \frac{1}{1 + 2(1 + \sqrt{1 + ZT})(Z^*T_1)^{-1}} \quad (3.23)$$

$$P_\eta = \frac{(\alpha_{pn} \Delta T)^2}{r_{pn} (1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)^2} S_0 (1 - S_0). \quad (3.24)$$

$$M_\eta = \frac{\alpha_{pn} \Delta T \Phi}{2\pi r_{pn} (1 + m_\sigma) \cdot (1 + m_\kappa)} S_0. \quad (3.25)$$

$$n_\eta = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\Phi(1 + m_\kappa)} (1 - S_0), \quad (3.26)$$

тут

$$S_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + ZT}}. \quad (3.27)$$

Цікаво, що умова $S_0 < 1/2$ реалізовується завжди. Умова посилюється при збільшенні безрозмірного параметра ZT . Це значить, що режими максимального ККД і максимальної потужності не співпадуть ніколи. Однак, для сучасних термоелектриків, для яких $ZT < 1$ величини ефективностей є майже однаковими. Зокрема, $\eta_p/\eta_{max} \geq 0.97$.

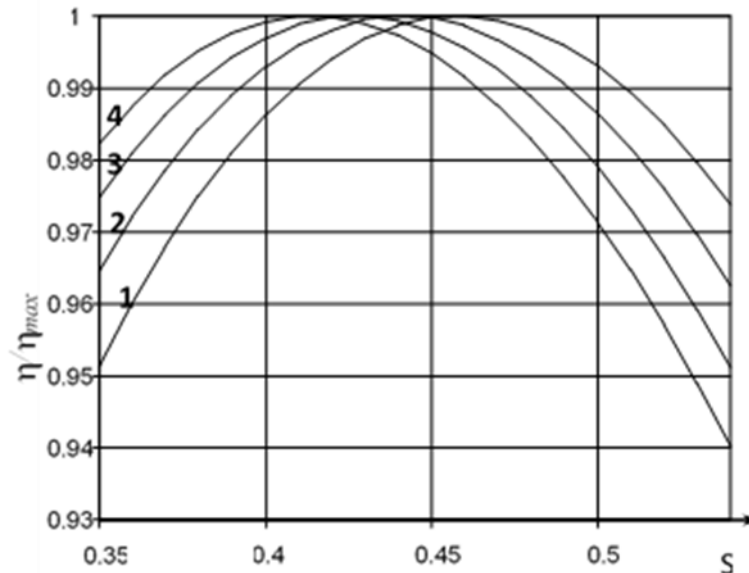


Рис.3.5 Графічні залежності η/η_{\max} від ковзання при температурі $T=300\text{ K}$ та при: 1 – $ZT = 0.4$, 2 – $ZT = 0.6$, 3 – $ZT = 0.8$, 4 – $ZT = 1.0$.

3.6 Режими роботи

ТЕКТЕ може функціонувати в трьох режимах: в режимі механічного привода, в режимі термоелектричного охолоджувача і в режимі термоелектричного підігрівача. Причина цього криється в термодинамічній оборотності пристрою. Схеми роботи ТЕКТЕ в цих режимах демонструє рисунок.

Режим механічного привода реалізується, коли ковзання $0 \leq S \leq 1$. Тоді ТЕКТЕ здійснює перетворення тепла, яке підводиться від джерела теплової енергії підводиться до гарячого колектора

Нульова величина електромагнітного моменту характерна для режиму холостого ходу. Якщо обертати ротор ТЕКТЕ в напрямку його попереднього обертання, але з більшою частотою ($n > n_{\max}$) або ($-\infty < S < 0$), то внаслідок ефекту Пельтьє [27,28] тепло від навколишнього середовища буде перекачуватися до гарячого колектора ТЕКТЕ. Колектор нагріватиметься за рахунок виділення тепла Пельтьє. Крім теплової енергії Пельтьє в колекторі буде виділятися також тепла енергія Джоуля. Звичайно, що тепла ефективність нагрівання буде вищою, ніж нагрів тільки теплом Джоуля. ТЕКТЕ працюватиме в режимі термоелектричного підігрівача (теплового насоса) (рис. 3.6 б).

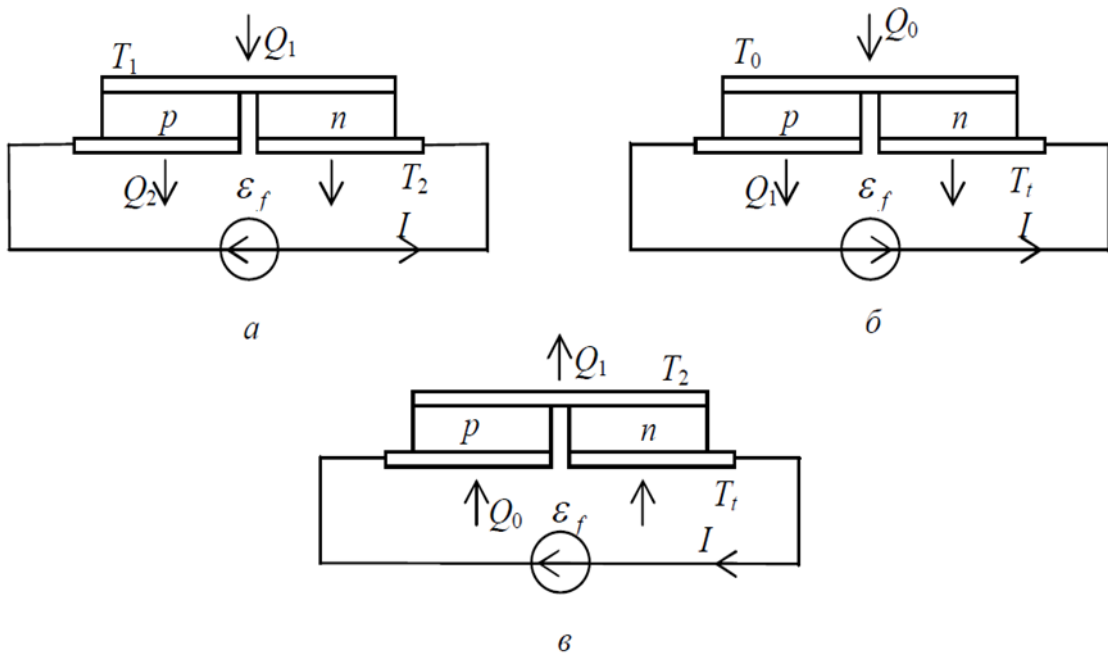


Рис.3.6 Режими роботи ТЕКТЕ. *а* – механічного привода, *б* – термоелектричного нагрівача, *в* – термоелектричного охолоджувача.

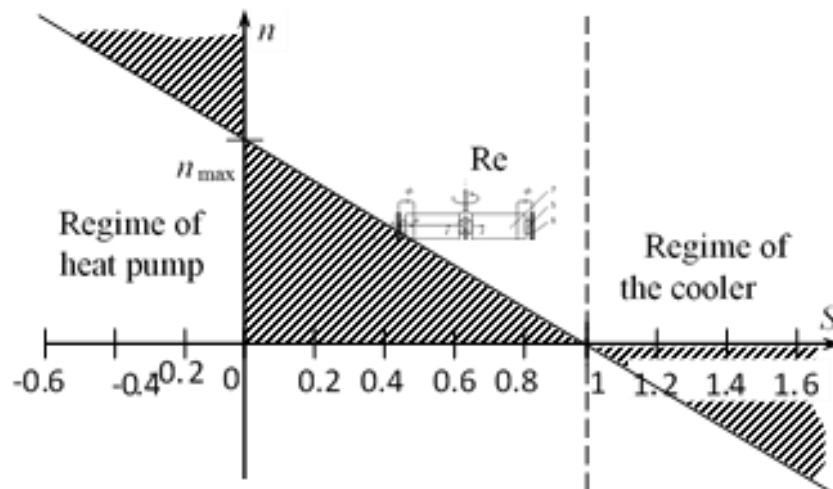


Рис 3.7 Залежність частоти обертів ротора ТЕКТЕ від ковзання

Якщо ротор ТЕКТЕ крутити в напрямку, протилежному до попереднього напрямку обертання, (напрямок тормозного моменту) ($I < S < \infty$) то напрям струму в колі зміниться на протилежний. При цьому колектор ТЕКТЕ буде поглинати тепло енергію із довкілля. ТЕКТЕ перейде в режим термоелектричного охолоджувача (рис. 3.6в). Тепло, яке поглинається колектором ТЕКТЕ:

$$P_c = \alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa (T_h - T_c). \quad (3.28)$$

Тепло, яка виділяється на гарячому колекторі P_h визначається співвідношенням

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_h - T_c), \quad (3.29)$$

тут α – коефіцієнт диференціальної термоЕРС,

κ – коефіцієнт теплопровідності,

R – сумарний тепловий опір гілок,

T_h - температура гарячого колектора ТЕКТЕ,

T_c - температура холодного колектора ТЕКТЕ,

I – сила струму.

В умовах теплової рівноваги ця ж тепла потужність при допомозі радіатора відводиться в навколишнє середовище.

Потужність тепла, яке поширюється від гарячого колектора до холодного шляхом кондукції

$$P_\kappa = \kappa(T_h - T_c), \quad (3.30)$$

Теплова потужність, яка виділяється на гарячому колекторі ТЕКТЕ є більшою від теплової потужності яка поглинається холодним колектором на величину потужності джерела живлення W

$$P_h = P_c + W. \quad (3.31)$$

При обертанні ротора ТЕКТЕ в напрямку, коли струм буде йти від гілки провідності n -типу до гілки провідності p -типу, внаслідок дії ефекту Пельтьє, буде перекачуватися потужність тепла Q_0 від колектора з температурою T_0 до колектора температура якого T_1 .

3.7 Розрахунок магнітної системи

Магнітна система ТЕКТЕ приведена на рисунку.

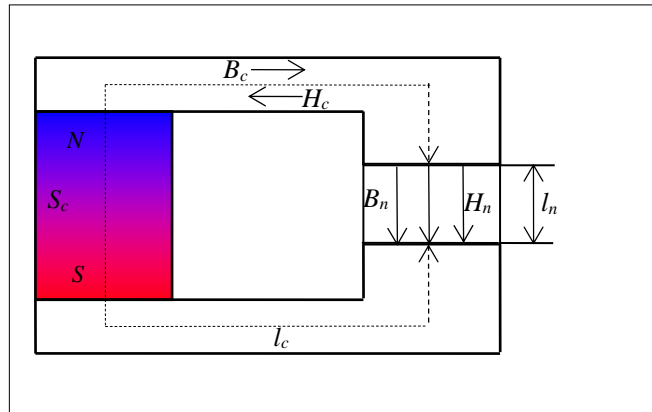


Рис.3.8 Схема магнітної системи ТЕКТЕ з немагнітним проміжком

Магнітна система складається з трьох однорідних ділянок: постійного магніта, магнітного осердя (магнітопровода) і немагнітного (повітряного) проміжку. Постійний магніт використовується для збудження магнітного потоку в системі. Магнітопровід, для його транспортування і розподілу в тілі ротора і немагнітного проміжку.

При малій довжині немагнітного проміжку магнітним потоком розсіювання будемо нехтувати. Це значить, що

$$S_n = S_c.$$

Знайдемо магнітну індукцію

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

Знайдемо напруженість магнітного поля в проміжку

$$H_n = \frac{B_n}{\mu_0}, \quad (3.34)$$

де $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м- магнітна постійна.

Виберемо контур інтегрування вздовж середньої лінії і скористаємося законом повного струму. Оскільки, в магнітопроводі намагнічуючого струму нема, то

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = H_c l_c + H_n l_n = 0. \quad (3.35)$$

Знайдемо напруженість магнітного поля в магнітопроводі

$$H_c = -H_n \frac{l_n}{l_c} = -\frac{B_c}{\mu_0} \frac{l_n}{l_c} = -N_B \frac{B_c}{\mu_0}, \quad (3.36)$$

тут

$$N_B = \frac{l_n}{l_c}, \quad (3.37)$$

- коефіцієнт розмагнічування по магнітній індукції.

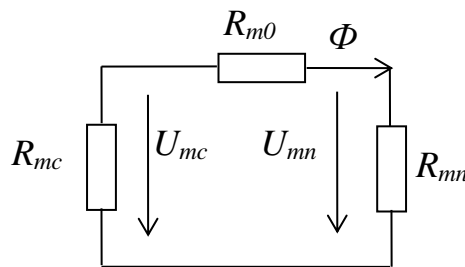


Рис. 3.10 Схема магнітного кола ТЕКТЕ

Отже, хоч намагнічуючих струмів нема, магнітне поле в усіх елементах ТЕКТЕ присутнє. Зауважимо, що в магніті і магнітопроводі вектор напруженості магнітного поля і магнітної індукції взаємно протилежний в той час, як в немагнітному проміжку мають однаковий напрямок (рис.3.5). Враховуючи цей факт, рівняння магнітного стану запишемо у вигляді

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

тут B_r – залишкове намагнічування постійного магніта,

H_c – його коерцитивна сила

Сумісно розв'язуючи отримані рівняння відносно магнітної індукції B_c знайдемо

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

Значення залишкового намагнічування і коерцитивної сили сучасних постійних магнітів наведені в таблиці.

Технічні параметри магнітів.

Таблиця 3.1

Grade	Equivalent MPPA Class	Br		Hcb		BH(max)		WT	Remark
		mT	Gs	kA/m	Oe	kJ/m ³	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		
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		

В нашому випадку, для збудження магнітного поля в ТЕКТЕ використаний магнітний сплав ALNICO-5DG. Параметри сплаву - $B_r = 1.20 \text{ T}$ і $H_{cb} = -56000 \text{ A/m}$. Нехай довжина $l_c = 0.12 \text{ м}$, і $l_n = 0.01 \text{ м}$. Знайдемо магнітну індукцію. Отримаємо $B_c = B_n = 0.53 \text{ Тл}$. При такій індукції коерцитивна сила рівна $H_{cb} = -33530 \text{ A/m}$. Для магнітного потоку маємо

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

3.8 Розрахунок охолоджувальної системи

При конструюванні теплових механізмів, до яких відноситься і ТЕКТЕ, важливо вибрати систему каналізації теплової енергії, яка виникає в процесі роботи. Системи каналізації можуть бути пасивними і активними. Пасивні системи каналізації є найпростішими, найдешевшими і такими, що набули широкого поширення.

Розглянемо механізм відводу тепла. Теплова енергія, яка підводиться до конвертера, від джерела тепла, шляхом теплопровідності передається гарячому

коллектора ТЕКТЕ, а потім шляхами конвекції і випромінювання передається навколишньому середовищу. Цей спосіб має досить малу ефективність.

Як правило конвекцію інтенсифікують, приєднавши об'ємний радіатор. Це багатократно збільшує теплообмінну площу поверхні з довкіллям. Дякуючи процесам кондукції теплова енергія від корпусу ТЕКТЕ прямує до радіатора, а далі, конвективним шляхом – довкіллям. Охолоджувальні радіатори різняться конструкцією, способом виготовлення та матеріалом. За формою радіатори бувають голчастими або пластинчатими. Перші доцільніше застосовувати при природній конвенції. Радіатори, виготовлені з кольорових металів: міді та її сплавів, алюмінію та його сплавів вважаються ефективнішими. На якість радіатора впливає спосіб виготовлення. Виділяють наступні способи:

- спосіб гарячого пресування;
- спосіб холодної ковки
- спосіб фрезерування;
- інші способи.

Теплопровідність матеріалів, які використовуються в ТЕКТЕ

Таблиця 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

Як правило, до охолоджувальних радіаторів ставлять досить високі масо-габаритні вимоги. Тому часто виникає потреба у конструюванні радіатора під конкретний виріб. При виготовленні радіатора враховують кінцеву масу

радіатора, його ціну та можливість серійного виготовлення. Найбільшого поширення набули ковани або вифрезеровані алюмінієві радіатори. Зрозуміло, площа поверхні розсіювання радіатора повинна бути якнайбільшою. Для оцінки необхідної розсіюючої площі вважають, що на кожен ват розсіяної теплової енергії потрібен радіатор з площею розсіювання $40 - 80 \text{ см}^2$.

Якщо надлишкове тепло каналізувати пасивним способом не вдається - потрібно використовувати активні способи. Для цього є багато способів. Це і вентилятори, і рідинні охолоджувачі, і теплові трубки, і модулі Пельтьє.

Рідинні охолоджувачі застосовують для каналізації потужностей в кілька сотень ват. Для ефективного тепловідводу треба застосовувати радіатори з тепловим опором не більше $0.05-0.15 \text{ К/Вт}$. Добитися такого малого теплового опору можуть водяні охолоджувачі.



Рис 3.10 Водяний охолоджувач ТЕКТЕ шляхом циркуляції рідини

Суть водяного охолодження полягає в каналізації надлишкового тепла об'єкта охолодження за допомогою безпосереднього контакту з носієм тепла. Теплоносій циркулює в замкнутому контурі, і поглинає тепло. В контурі охолодження тепло віддається. В ролі теплоносія можна використовувати не тільки дистильовану воду, але і тосол, масло, рідкий метал, тощо..

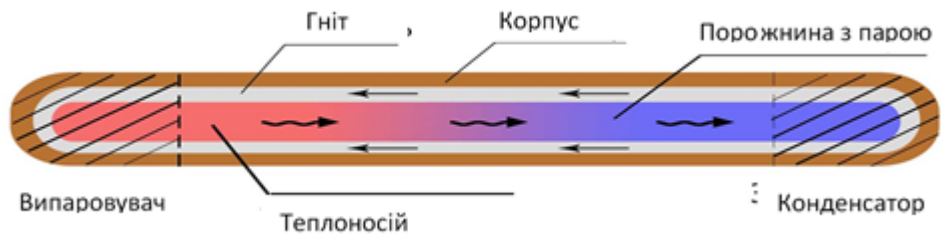


Рис 3.11 Схематична будова теплової трубки

Теплова трубка (ТТ) являє собою теплопровід, який передає велику кількість тепла при малих температурних градієнтах на корпусі. Це продиктовано більшим на кілька порядків ефективним коефіцієнтом теплопровідності теплових трубок порівняно з коефіцієнтом теплопровідності металу. ТТ є герметично запаяним контейнером, в якому знаходиться деяка кількість рідкого теплоносія. В місці нагріву рідина поглинає теплову енергію і випаровується, а в місці охолодження пара рідини, яка перемістилася з місця нагрівання конденсується. При цьому виділяється теплота конденсації. Рух газоподібної фракції рідини з місця нагріву в місце конденсації здійснюється за рахунок виникнення градієнту тиску насиченої пари. Градієнт залежить від різниці температури в місцях випаровування і конденсації.

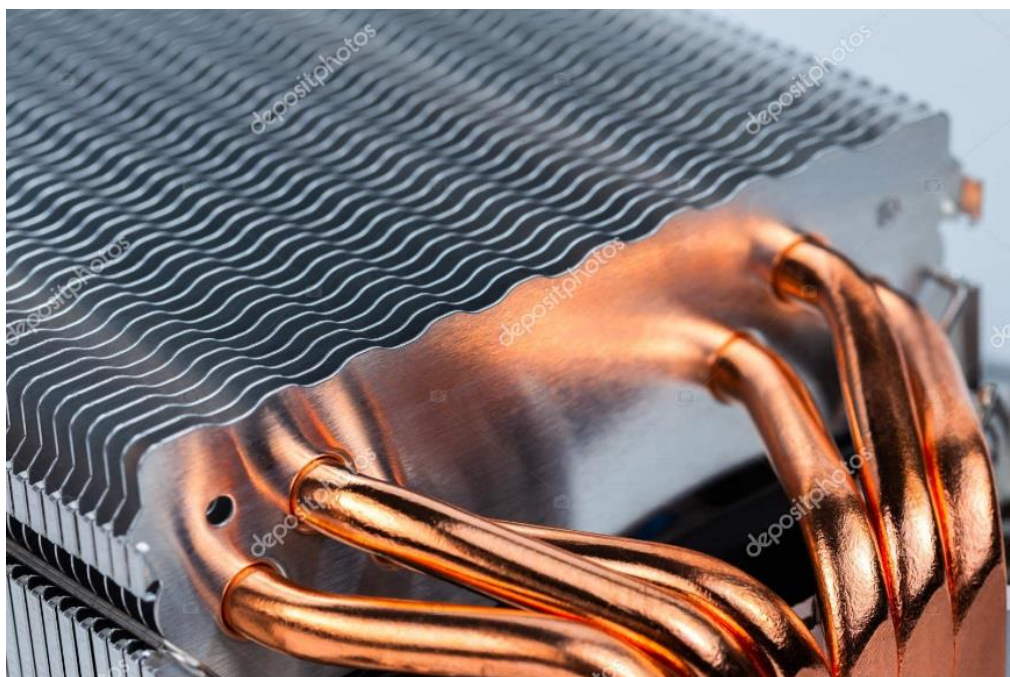


Рис. 3.12 Охолодження ТЕКТЕ тепловими трубками

Повторне транспортування конденсату в місце випаровування відбувається за рахунок капілярної різниці тисків у гноті. Гніт знаходиться на внутрішній поверхні, розташованого всередині теплової трубки. В зв'язку з тим, що капілярна структура трубок байдужа до орієнтації в гравітаційному полі, найбільше використовується якраз такий тип ТТ. Відношення ефективної теплопровідності теплової трубки до коефіцієнта теплопровідності металів на кілька порядків більша. Зокрема, ефективний коефіцієнт теплопровідності ТТ складає $10^6 - 10^7 \text{ Вт/м К}$, в той час, як коефіцієнт теплопровідності металів порядку 10^2 Вт/м К . Треба відмітити, що перегрів рідини в місці випаровування небезпечний. При перегріві настає криза кипіння, при якій вся вода випарується. Тоді транспортування тепла йде по металевих стінках ТТ. При ефективний коефіцієнт теплопровідності трубки різко падає і передача тепла зупиниться.

3.9 Обчислення технічних параметрів

Розрахуємо технічні параметри ТЕКТЕ, який працює в режимі максимальної електричної потужності. Нехай гілки ТЕКТЕ виконані із термоелектрика на базі сплаву вісмут-телур, вісмут -селен сумарною площею $S = 1000 \text{ мм}^2$ і висотою $h=4\text{мм}$. Покладемо радіус ротора рівним $r=50 \text{ мм}$, а індукцію магнітного потоку $B = 0,50\text{Т}$. Електромехані параметри: електричну потужність, механічний момент, частоту обертів ротора та силу струму в режимі генерації максимальної потужності, при температурі $T = 300\text{К}$ наведені в таблиці.

Очевидно, що при збільшенні розмірів ТЕКТЕ та при використанні досконаліших термоелектриків його потужність та ККД збільшаться. Так як всі теплові машини, які працюють в таких же температурних умовах охолоджувача і нагрівача мають однакові термодинамічні обмеження на величину ККД, він повинен бути єдиним параметром при їх порівнянні.

Конвертер можна застосовувати в місцях, де потребу в механічній енергії не можна забезпечити традиційними джерелами, а також там, де потрібне чергове резервування. Виконаний в малих геометричних розмірах ТЕКТЕ можна використати для виготовлення автономних лічильників тепла [32].

Параметри ТЕКТЕ в режимі генерації 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

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

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

Підстерігати безпека 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, охопленої 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 десятків частот 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. Одним із напрямків енергоощадних технологій може стати розробка низькопотенціальних конвертерів теплової енергії.

2. Термоелектромеханічний конвертер теплової енергії (ТЕКТЕ) служить для перетворення низькопотенціальної (кілька десятків градусів) теплової енергії в механічну.

3. В основу роботи ТЕКТЕ покладений принцип пондеромоторної взаємодії термоелектричного струму з магнітним полем. При цьому явища генерації термоелектричного струму і його споживання локалізовані в межах одного пристрою.

4. Ефективність пристрою - кілька процентів. Це пов'язано з тим, що на ККД конвертора накладені термодинамічні обмеження Карно. Однак, такі обмеження є спільними для всіх теплових машин, які працюють при малому перепаді температури між нагрівачем і охолоджувачем.

5. ККД пристрою буде квадратично збільшуватися при збільшенні різниці температур між нагрівачем і охолоджувачем, а також при збільшенні геометричних розмірів і термоелектричної добротності термоелектрика.

6. Термоелектромеханічний конвертер не є альтернативою вже існуючим тепловим машинам, він лише покликаний заповнити енергетичну нішу по використанню низькопотенціальної теплової енергії, запаси якої практично невичерпні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Плоские солнечные коллекторы. <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/heliosystemy/plaski-kolektory.html>
2. Солнечные водонагреватели. М. Згут. [Ловушки для солнца](#) // Наука и жизнь, Правда. 1988 № 6, стр 87-88.
3. *Г. В. Казаков* Принципы совершенствования гелиоархитектуры. Свит, 1990
4. Солнечные панели. <https://eenergy.com.ua/tag/sun-energy/>
5. Морские волны и течения. <http://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volnyi-i-techeniya/>
6. Энергия ветра. <https://fdlx.com/tech/86785-tri-strany-dogovorilis-postroit-na-ostrove-etrovye-elektrostantsii.html>.
7. Renewable Energy From The Ocean — A Guide To OTEC, William H. Avery, Chih Wu, Oxford University Press, 1994
8. Как заставить работать тепловую энергию океана? // Энергетика и промышленность России — избранные материалы. ВЫПУСК 144. [1]
9. Геотермальная энергетика. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-8>
10. *Дегтярев К.* [Тепло земли](#) // [Наука и жизнь](#). — 2013. — № 9-10.
11. *Дворов И. М.* [Глубинное тепло Земли](#) / Отв. ред. д.г.-м.н. [А. В. Щербаков](#). — М.: [Наука](#), 1972. — 208 с. — ([Настоящее и будущее человечества](#)). — 15 000 экз.
12. Берман Э., Маврицкий Б. Ф. Геотермальная энергия. М.: Мир, 1978. 416 с.
13. Севастопольский А. Е. Геотермальная энергия: Ресурсы, разработка, использование : Пер. с англ. М.: Мир, 1975.
14. *Баева А. Г., Москвичёва В. Н.* Геотермальная энергия: проблемы, ресурсы, использование. Библиографический указатель. Издательство СО АН СССР, Институт теплофизики, 1979
15. Двигатель с внешним подводом теплоты" Заявка №99110725 от 31 мая 1999 г., РФ

16. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ. Под ред. В.М. Бродянского. М.: Мир, 1975.
17. Двигатели Стирлинга/В.Н. Даниличев, С.И. Ефимов, В.А. Звонок и др.; под ред. М.Г. Круглова. - М.: "Машиностроение", 1977.
18. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга: Пер. с англ. М.: Энергия, 1978.
19. 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.
20. Лабейш В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003. 79 с.
21. Алхасов А.Б. Возобновляемые источники энергии. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — [ISBN 978-5-383-00960-4](https://www.isbn-international.org/product/978-5-383-00960-4).
22. Бэнкс Р. Тепловые двигатели из нитинола. Эффект памяти формы в сплавах. – М.: Металлургия, 1979. – 442 с.
23. П'єзоелектричний теплоелектричний двигун-генератор. <https://www.freepatent.ru/patents/2225671>.
24. Черкасский А.Х. Термоэлектрический насос. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
25. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
26. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. – 327 с.
27. Анатычук Л.Н. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
28. Охотин А.С., Ефремов А.А., Охотин В.С., Пушкарский А.С. Термоэлектрические генераторы ... М. Атомиздат. 1971. 292 с.
29. А. с. 1670723 СССР, В.С. Закордонець, 1991.
30. Bulat L.P., Zakordonets V.S. Semiconductors thermal mechanical energy converter // Cold fusion source book, Hal Fox, USA, 1994. – P. 230–242.

31. Peters F. *Thermoelemente und Nhermosoulen*. Halle, 1998.
32. Пат. 28983А, G01K17/10 Україна, В.С. Закордонець, 2000.
33. 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.
34. 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).
35. 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).
36. 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.
37. Закордонець В.С. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №4, 2018. — С. 60–67.
38. Закордонець В.С. Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіодів / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №5, 2018. — С. 45–54.
39. 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).
- 40.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.
- 41.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.
- 42.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.
- 43.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.
- 44.Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н.Ткачук, М.О.Халімовський,
- 45.В.В.Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006 – 448 с.
- 46.2. Охорона праці в в медичних закладах: Довідник / Укладачі, Зеркалов Д.В., Теленгатор
- 47.О.Я., Ушкевич Б.А., Дериземля І.О.; За ред. Зеркалова Д.В. - К. : Основа, 2008. - 728 с.
- 48.В.П. Быстров Охрана труда: Справ. пособие для руководителей

предприятий, учреждений, организаций, лечебных и учебных заведений.-С., мсп «Ната»,2005.-500 с