

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 дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Термоелектромеханічний низькопотенційний конвертер
теплової енергії**

Виконав: студент (ка) 6 курсу, групи ЕЕ_{М3}-61

напряму підготовки (спеціальності)

**141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Пташник Олег Степанович

(прізвище та ініціали)

Керівник **Закордонець В.С.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент **Романюк Л.А.**

(прізвище та ініціали)

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

Пташник Олег Степанович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Термоелектромеханічний низькопотенційний конвертер теплової енергії

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

Затвержені наказом по університету від «_____» _____ 201__ 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 Пташника Олега Степановича містить: 64 сторінки, 24 рисунків, 11 таблиць, 48 посилань на першоджерела.

Метою роботи є створення та розрахунок параметрів нового пристрою – напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕМК), призначеного для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну.

Об'єктом дослідження є напівпровідниковий термоелектромеханічний низькопотенційний конвертер теплової енергії.

Предметом дослідження є низькопотенційні теплові машини з твердим робочим тілом.

Основні результати: Розраховано основні параметри нового пристрою – напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕМК), призначеного для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну. В основу роботи пристрою покладено принцип взаємодії термоелектричного струму, який генерується короткозамкнутим термоелектричним генератором з магнітним полем. У моторному режимі ТЕМК може працювати в якості механічного привода в автономних енергетичних системах. Обчислено механічну потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора і здійснено їх оптимізацію. Показано принципову можливість роботи в термopідігрівному і термоохододжуючому режимах.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Енергія Сонця	9
1.2 Енергія морських хвиль	11
1.3 Енергія вітру	12
1.4 Океанічний температурний градієнт	13
1.5 Геотермальна енергія	14
1.6 Низькопотенційні теплові машини	14
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	21
2.1 Метод електротермічної аналогії	21
2.2 Термоелектричні ефекти	24
2.3 Енергетичний розрахунок термоелемента	25
2.4 Особливості роботи короткозамкнутого ТЕГ	29
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	32
3.1 Будова і принцип дії конвертера	34
3.2 Розрахунок теплового режиму конвертера	35
3.3 Розрахунок електромеханічних параметрів конвертера	37
3.4 Обчислення ККД конвертера	41
3.5 Режими роботи пристрою	43
3.6 Охолоджувальна система конвертера	46
3.7 Магнітна система конвертера	48
3.8 Обчислення параметрів ТЕМК	52
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	53
4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів, електробезпеки, пожежної небезпеки	53
4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60

ВСТУП

Дуже швидко, всього протягом ХХ століття, людство витратило найціннішу сировину, що створювалася на Землі протягом сотень мільйонів років, - нафту. Витратило не розумним чином: близько половини нафти йде на виробництво палива для транспортних засобів. Крім цього, вкрай негативний вплив на довкілля відбувається внаслідок вилучення з надр нашої планети органічного палива. Проблеми пов'язані як із видобутком палива, так і з його транспортуванням і, найголовніше, з його спалюванням, оскільки при спалюванні навіть «чистих» видів палива утворюється багато шкідливих речовин, які надходять у навколишнє середовище.

Одним із основних напрямків розвитку економіки та науково-технічного прогресу у ХХІ столітті стає завдання пошуку перспективних технологій енергоперетворення та серійного виробництва нової техніки на основі високоефективних термодинамічних циклів з використанням відновлюваних видів палива та нових робочих тіл. Це означає створення, виробництво та впровадження у масове використання таких високоефективних та екологічно чистих енергосистем, які б забезпечували задоволення потреб промисловості та

У всіх розвинених країнах світу (насамперед ЄС та США) основою інноваційного розвитку промисловості стає завдання переходу на новий технологічний рівень, пов'язаний з екологією, енергозбереженням, та скороченням частки використання традиційних енергоресурсів. Зокрема, до 2025 року в країнах ЄС понад 20% енергії вироблятиметься за рахунок використання альтернативних та відновлюваних видів палива.

У зв'язку з величезними запасами теплових ресурсів в надрах Землі і збільшенням попиту на споживання електричної, механічної і теплової енергії розробка та оптимізація нових пристроїв, що генерують корисні види енергії з природного і техногенного тепла, є актуальним вирішенням проблеми енергетичного дефіциту [1-9]. Крім того, перетворення великої кількості тепла (близько 70% світової енергії), яка втрачається в різних технологічних процесах, допоможе запобігти можливому глобальному потеплінню та змінам клімату [8,10-

12]. Великою поробемою стала і світова екологічна криза. Викиди продуктів згоряння викопного палива в атмосферу досягли загрозливих масштабів.

Метою роботи є створення та розрахунок параметрів нового пристрою – напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕМК), призначеного для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну.

Об'єктом дослідження є напівпровідниковий термоелектромеханічний низькопотенційний конвертер теплової енергії.

Предметом дослідження є низькопотенційні теплові машини з твердим робочим тілом.

Основні результати: Розраховано основні параметри нового пристрою – напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕМК), призначеного для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну. В основу роботи пристрою покладено принцип взаємодії термоелектричного струму, який генерується короткозамкнутим термоелектричним генератором з магнітним полем. У моторному режимі ТЕМК може працювати в якості механічного привода в автономних енергетичних системах. Обчислено механічну потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора і здійснено їх оптимізацію. Показано принципову можливість роботи в термopідігрівному і термоохододжуючому режимах.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Сконструйовано новий пристрій - напівпровідниковий термоелектромеханічний конвертер теплової енергії (ТЕМК) з твердим робочим тілом, призначений для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну.
- Розраховано основні параметри ТЕМК в моторному режимі : механічну потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора та ККД.
- Проведено оптимізацію параметрів ТЕМК в режимах максимальної потужності та максимального ККД.
- Проведено розрахунок магнітної системи пристрою, яка не потребує додаткових затрат енергії на збудження магнітного потоку

- Проведено розрахунок охолоджувальної системи пристрою, оснащеної системою теплових трубок з'єднаних з пасивним радіатором великої площі.
- Показано принципову можливість роботи конвертера в термopідігpівному і термооxододжyючому режимах.
- **Практична цінність результатів дослідження**
- Запропоновано конструкцію нового пристрою - напівпровідникового термоелектромеханічного конвертера теплової енергії (ТЕМК), призначеного для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну.
- Запропоновано конструкцію високоефективної охолоджувальної системи пристрою, оснащеної системою теплових трубок з'єднаних з пасивним радіатором великої площі.
- Запропоновано конструкцію магнітної системи пристрою, яка не потребує додаткових затрат енергії на збудження магнітного потоку
- Представлені результати дослідження направлено на збільшення ефективності перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

НЕТРАДИЦІЙНІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

1.1. Енергія Сонця

Енергія на Сонці виробляється в результаті термоядерних реакцій перетворення водню в гелій. Щосекунди понад 4 млрд. кілограмів матерії перетворюється в енергію, що випромінюється Сонцем в космічний простір у вигляді електромагнітних хвиль. Сонячної енергії на Землю, потрапляє менше одного відсотка. Але цього було б цілком достатньо для забезпечення всіх енергетичних потреб людства.

Плоскі колектори. Як правило, плоскі колектори виготовляються у вигляді плоских водяних колекторів, які розміщуються на дахах будинків або інших поверхнях [1,2]. Кількість енергії, яка може бути реально використана, залежить від ефективності колектора і пристрою, який перетворює сонячну енергію в корисні види енергії. Оскільки інтенсивність сонячної радіації відносно невелика, то розміри колекторів для уловлювання сонячної енергії повинні бути значними. Наприклад, в сонячних районах США, розміри колектора, який зможе забезпечити потреби однієї людини в енергії близько 40м^2 .



Рис. 1.1. Плоский сонячний колектор

У найпростішому випадку плоский колектор являє собою темний металевий лист, покритий одним або двома шарами скла, який поглинає теплову енергію. Згодом тепло передається воді. Такі колектори можуть забезпечити нагрів теплоносія до $65\text{-}90\text{ }^\circ\text{C}$, і їх ефективність складає біля $20\text{-}80\%$.

При використанні рідкого теплоносія застосовують ряд паралельних труб діаметром 12-16 мм, які знаходяться в тепловому контакті з металевим листом і розташовані на відстані 50- 150 міліметрів одна від одної. Корпус колектора виготовляється з металу, дерева або пластику. Зовні корпус ізолюється теплоізоляторами.

Сонячні водонагрівачі. В даний час в світі в експлуатується понад 5 мільйонів сонячних водонагрівачів. Часто вони використовуються в ривтних житлових будинках, централізованих системах водопостачання гарячої води в житлові і громадські приміщення, лікарні, спортивно-оздоровчі комплекси і т. д. Промвиробництво таких нагрівачів налагоджено в багатьох країнах, зкрема в США, Австралії, Франції та ін.. Енергію Сонця доцільно використовувати в районах, що мають понад 1800 годин на рік сонячного випромінювання. Сонячні водонагрівальні установки досить популярні завдяки простоті конструкції, високій надійності та швидкій окупності [2]. Очевидно, що використання енергії Сонця стає символом ХХІ століття.

Колектори-концентратори використовуються тоді, коли потрібно досягти високих температур[2,3] . Встановлені в потрібних місцях, сонячні колектори-концентратори можуть фокусувати сонячне випромінювання на резервуарі з водою (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Сонячні колектори-концентратори

Найбільша сонячна електростанція знаходиться в пустелі Мохав у Каліфорнії. Вона складається з великої кількості параболічних дзеркал, в фокусі

яких розміщені трубки. По трубках циркулює вода, яка випаровується. Для отримання електроенергії, перегріта пара подається на турбогенератор. Головна незручність полягає в тому, що електроенергія виробляється тільки тоді, коли світить Сонце, і не виробляється в хмарні дні і вночі. Тому, часто, на сонячних електростанціях використовують гібридні технології – вдень використовують енергію Сонця, а вночі вмикають звичайні водонагрівні котли в яких спалюється природний газ.

Сонячна генерація здійснюється за рахунок прямого перетворення сонячного випромінювання в електроенергію за допомогою фотоелектричних елементів [4].

В 2020 році сумарна потужність всіх встановлених на Землі сонячних панелей складала понад 760 ГВт, що відповідало приблизно 2,7 % світової генерації електричної енергії. [4].



Рис. 1.3 Сонячна дахова електростанція

1.2. Енергія морських хвиль

Енергія хвиль на поверхні морів та океанів, як і будь-яка інша енергія, також може використовуватися для роботи електростанцій [5]. На думку експертів, хвилі Світового океану можуть задовольнити до 20% енергетичних потреб людства. За найсміливішими оцінками, морські хвилі генерують близько 2 ТВт енергії, що вдвічі перевищує сумарний обсяг виробництва електроенергії в усьому світі. Привабливість використання морських хвиль полягає в їх високій енергоємності. Зокрема, питома потужність води за своїм рівнем значно перевищує показники сонячної та вітрової енергетики. У випадку хвиль десятиметрової висоти

питома потужність складає 2 MWm на погонний метр. В основі роботи морських електростанцій лежить принцип дії хвиль на ті чи інші робочі тіла. В в ролі останніх можуть бути, залежно від конкретного проекту, лопаті турбін, насоси, маятники, та ін.. Рух морських хвиль в кінці кінців конвертується в обертання гідрогенераторів. Отримана внаслідок впливу хвиль електроенергія транспортується споживачам через морський кабель на узбережжя.

1.3. Енергія вітру

Вітрові електростанції виробляють електроенергію за рахунок використання кінетичної енергії повітря [6]. Вітрова електростанція - це щогла, на верху якої знаходиться контейнер з редуктором та генератором. До осі редуктора прикріплено вітряні лопаті. Контейнер електростанції повертається залежно від напрямку вітру. Основна проблема вітрових електростанцій полягає в непостійності вітру. Це приводить до зміни потужності генерації. Тому, для більш рівномірної та стабільної роботи системи вітряні електростанції для накопичення електроенергії обладнуються мають акумуляторами. По тій же причині, виникає необхідність об'єднання вітряних електростанцій в енергосистеми і генеруючі комплекси з іншими способами генерації електроенергії.

Вітроелектростанції застосовуються в країнах, що мають невисокий рельєф місцевості да достатню і стабільну швидкості вітру. Світовим лідером у використанні вітряних електростанцій є Німеччина. Тут, за невеликий проміжок часу побудовано понад електростанцій сумарною потужністю понад 9000 MWm .



Рис. 1.4 Вітрова електростанція

1.4. Океанічний температурний градієнт

Одним з видів відновлюваних джерел енергії, є енергія температурного градієнта морської води [7,8]. Його суть полягає у використанні сонячної енергії, яка акумулюється поверхнею Світового океану. Градієнтні енергетичні установки використовують різницю температур на поверхні і в його глибині. Рис. 1.3 наведений приблизний розподіл перепаду температури води між поверхнею і на глибині 1000 метрів в різних локаціях Світового океану. Оцінки показують, що у випадку використання 5 % енергії вертикального температурного градієнта тропічного океану на площі $4 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$ можна стабільно забезпечити генеруючі потужності до 10000ГВт.

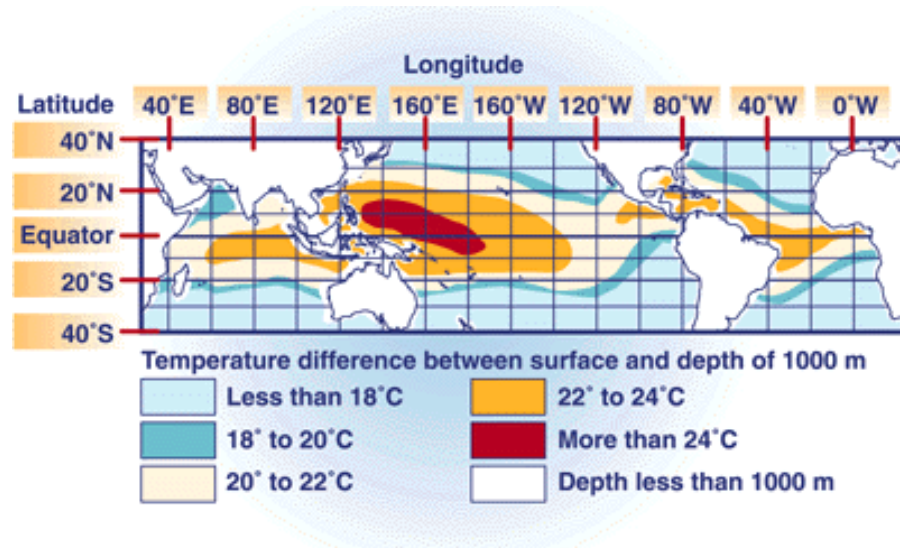


Рис. 1.5 Розподіл перепаду температури води між поверхнею і на глибині 1000 метрів Світового океану.

1.5. Геотермальна енергія

Геотермальна енергія, ще один із видів енергії, який використовується для генерації електроенергії. Запаси геотермальної енергії Землі величезні [9-14]. Зокрема, температура ядра перевищує 6000 °С, а швидкість його остигання не перевищує 300-500 °С за мільярд років [9,10]. Оцінки показують, що при охолодженні ядра Землі тільки на 1°С можна отримати кількість енергії, яка в 10000 разів більша від енергії, що міститься у всьому розвіданому викопному паливі [10-

12]. Використання навіть 1% цієї енергії еквівалентно роботі кількох сотень потужних електростанцій.



Рис. 1.6 Несьявеллір, Ісландія. Геотермальна ТЭС

1.6. Низькопотенційні теплові машини

Двигун Стірлінга є яскравим представником низькопотенційного конвертера теплової енергії [15-20]. Це один з різновидів теплових машин, в основі роботи якого лежить рух робочої рідини чи газоподібної суміші у замкнутому об'ємі. Двигун Стірлінга, є двигуном зовнішнього згорання. Його принцип роботи полягає у використанні енергії, яка виникає при нагріванні та охолодженні робочого тіла. Двигун було запропоновано в 1816 році шотландцем Робертом Стірлінгом. Проте на межі ХХ та ХХІ століть інтерес до такого типу теплових двигунів спалахнув з новою силою. В даний час, провідні компанії світу роблять нові і удосконалюють старі конструкції.

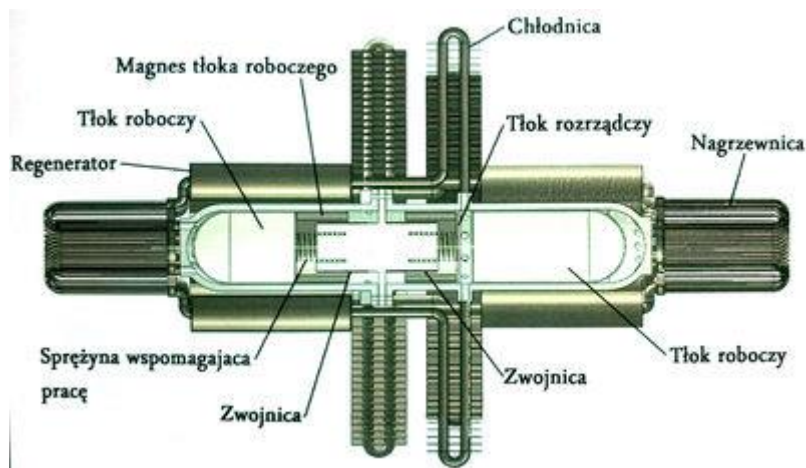


Рис. 1.7 Конструкція сучасного двигуна Стірлінга

Конструкція двигуна, зважаючи на відсутність в ньому різноманітних клапанів, розподільних валів та стартера дуже проста. Для роботи підходить будь-яке джерело теплової енергії [19,20]. Це може бути і енергія Сонця, і відходи сільського господарства, і корисні копалини і атомна енергія. Не дивлячись на простоту конструкції та абсолютну всеїдність двигун Стірлінга не поступається за потужністю та продуктивністю двигунам внутрішнього згоряння. Дуже важливою є і оборотність пристрою. Вона полягає у можливості роботи двигуна Стірлінга в режимі холодильника.



Рис. 1.8 Сучасний двигун Стірлінга з електричним генератором

Робочий цикл пристрою повністю залежить від тепла, одержуваного із зовні, причому джерело цього тепла абсолютно не важливе. Враховуючи ці особливості, можна стверджувати, що двигун Стірлінга ідеально підходить для використання в геліоенергетиці.



Рис. 1.9 Промисловий двигун Стірлінга потужністю 1 кВт

Завдяки використанню для виготовлення пристрою передових технологій, вдалося збільшити його ККД до 65-70% від циклу Карно [19,20]. У двигунів Стірлінга є як плюси, так і мінуси. Переваги двигуна Стірлінга полягають в тому, що:

- він практично не схильний до зносу, який притаманний двигунам внутрішнього згоряння;
- продуктивність двигуна стрімко збільшується із збільшенням температури;
- відсутність процесу внутрішнього згоряння, дозволяє пристрою працювати безшумно;
- він не схильний до максимальних навантажень на елементи пристрою;
- має можливість автономної роботи;
- не потребує ніяких спеціальних джерел, що випромінюють тепло;
- рівномірно спалює паливо без залишку.

Недоліки двигуна Стірлінга полягають в тому, що:

- має збільшені габарити через те, що горіння відбувається поза внутрішньою камерою, тепло віддається за допомогою радіатора;
- двигун матеріаломісткий. Для продуктивної роботи, його потрібно виготовляти з жаростійкої сталі, яка має низьку теплопровідність, і при цьому витримує високий тиск;

- потребує спеціальних мастил з низьким коефіцієнтом тертя, яке витримує високі температури;

- метою збільшення потужності, в якості робочого тіла використовується водень і гелій. Водень вибухонебезпечний, а під дією високих температур утворює металогідриди. Гелій має високу проникаючу здатність, а витік робочого тіла значно знижує робочий тиск.

Нітіоловий двигун Нітінол - сплав нікелю і титану. В нітіоловому двигуні виникнення механічних рушійних сил ґрунтується на структурних перетвореннях нітінолу [21,22]. Кристалічна решітка нітінолу може перебувати в одній з двох стбільних форм: або у вигляді об'ємо-центрованого куба (ОЦК), або ромбовидної структури з центрованими гранями (РГЦ). Такий стан кристалічної ґратки називається аустенітною формою. Перший стан називається мартенситною формою. Перехід ОЦК в РГЦ називається прямим мартенситним перетворенням. Зворотний перехід від структури РГЦ до структури ОЦК зворотним мартенситним перетворенням. На перетвореннях цих кристалічних структур ґрунтується явище ефекту пам'яті форми. Його називають також термопружним мартенситним перетворенням або переходом мартенсит-аустеніт і навпаки. Температура гістерезису нітінолу рівна різниці кінцевих температур аустенітно-мартенситного і мартенситно-аустенітного перетворень, відповідно. Враховуючи, що температура гістерезису - 30 С, в якості рушійних середовищ можна використовувати гарячу і холодну воду, або гарячу воду і навколишнє середовище. Побудований Р. Бенксом тепловий двигун на нітінолі безперервно працював протягом кількох місяців. При цьому він обертав електричний генератор потужністю понад 0.2 кВт. За час роботи двигун зробив більше 100 тисяч обертів. Схема нітіолового двигуна Бенкса показана на рис. 1.5.

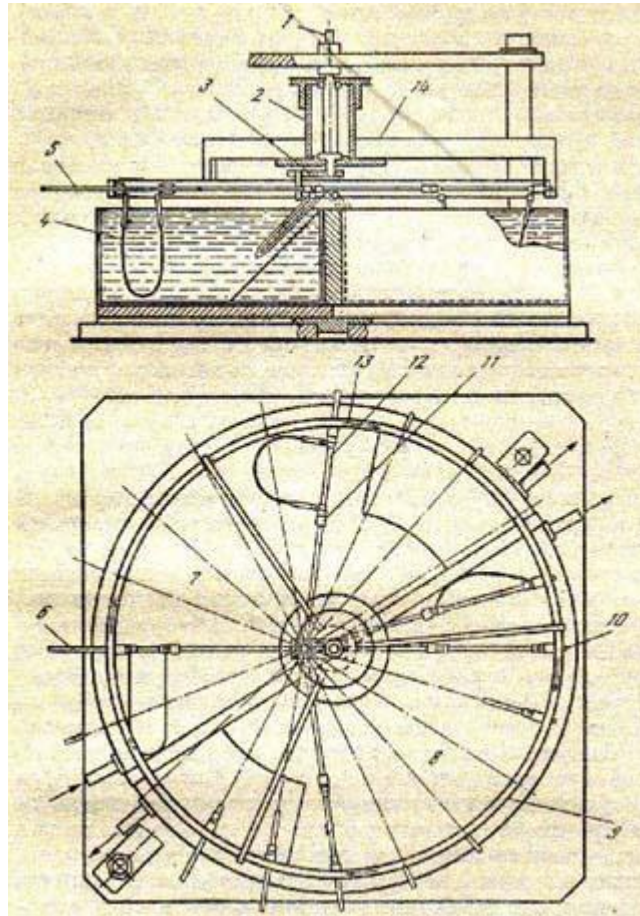


Рис. 1.10 Нітіноловий двигун Бенкса

У 1982 р. компанія International Innovative Technologies створила двигун, який мав 30 нітінолових петель. Діаметр перерізу однієї петлі був 22 міліметри. Нагрівачем та холодильником нітінолового двигуна були гаряча вода з температурою 55 С і навколишнє повітря з температурою 25°C. Частота обертів двигуна сягала 270 об/хв, розвиваючи потужність 0.5 кВт. Двигун мав високу надійність, і безвідмовно працював протягом 1.5 років [21]. Важливою особливістю нітінолових теплових двигунів є те, що вони, при малій частоті обертання мають великий крутний момент на валу і при малій масі розвивають велику питому потужність. Це пояснюється тим, що механічна напруга в нітинолі на порядок більша за тиск в циліндрах поршневих двигунів внутрішнього згорання.

П'єзоелектричний тепломеханічний двигун П'єзоелектричний тепломеханічний двигун-генератор відноситься до тепломеханічних приводів, які працюють при малому температурному градієнті [23]. Для перетворення низькопотенційної теплової енергії в механічну п'єзоелектричний тепломеханічний двигун одночасно використовує ефект пам'яті форми та п'єзоелектричний ефект. Двигун містить вал, встановлений на опорах з

можливістю обертання, і радіально розташовані нітінолові важелі. Нітінолові важелі мають ефект пам'яті форми і з'єднані з п'єзоелектричними елементами при допомозі електродів. Електроди, через систему важелів чинять тиск на п'єзоелектричні елементи та періодично їх деформують. Технічний результат – процес прямого перетворення теплової енергії в механічну з подальшою генерацією електричної енергії.

Термоелектричний насос

Термоелектричний насос (ТЕН) - пристрій, який перетворює теплову енергію електропровідної рідини в її кінетичну енергію [24]. Він є органічним об'єднанням в одному пристрої електромагнітного насоса і короткозамкнутого термоелектричного генератора. На відміну від електромагнітних насосів, які працюють від зовнішніх джерел електричного струму, термоелектричний насос не потребує зовнішнього живлення. Він діє за рахунок температурних градієнтів. Необхідні для роботи ТЕН температурні градієнти виникають за рахунок теплової енергії гарячої електропровідної рідини. ТЕН має ряд корисних особливостей:

- неперервність тривалої роботи, доки підтримується температурний градієнт;
- крім теплопередачі, ніякого контакту з навколишнім середовищем немає;
- можливість роботи в інтервалі температур від криогенних до 2000К.

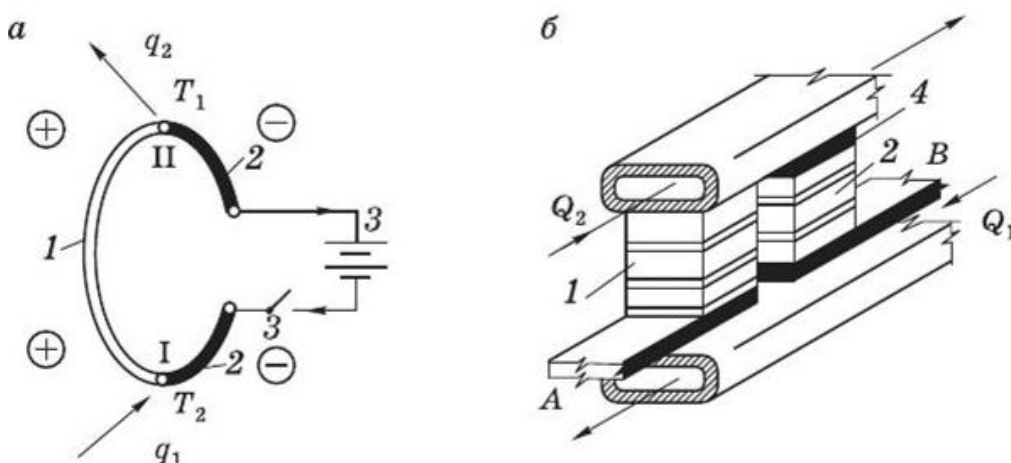


Рис. 1.11 Схема конструкції термоелектричного насоса.

Схема конструкції термоелектричного ТЕН показана на рис. 1.11. ТЕН є короткозамкнутим термоелектричним генератором, вітки якого за допомогою спеціальних комутаційних пластин, з'єднані послідовно. З'єднані комутаційними

пластинами вітки 1 і 2, утворюють спаї. В результаті цього утворюється група гарячих спаїв, які працюють при температурі T_1 , і холодних спаїв з робочою температурою T_2 . Повна ЕРС, що розвивається ТЕН, дорівнює сумі ЕРС окремих елементів. При замиканні полюсів ТЕН через термоелектроди та комутаційні пластини проходить термоелектричний струм. Оскільки, рідке робоче тіло знаходиться в зовнішньому магнітному полі, (магнітна система на схемі не показана) то на нього діє сила Ампера, яка приводить його в рух.

Джерела низькопотенційного тепла 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	-	-	-

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Метод електротермічної аналогії

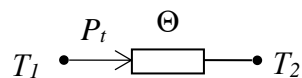
Розрахунок теплового режиму конвертера можна виконати використовуючи формальну подібність рівнянь електропровідності і теплопровідності [25,26]. Керуючись принципом подібності, процес теплопередачі може бути представлений у вигляді теплової схеми, елементами якої є джерела тепла, приймачі тепла та термічні опори, які знаходяться на шляху поширення тепла від джерела до приймача. При цьому, кожному вузлу теплової схеми ставиться у відповідність деяка температура T . Теплові потоки і перепади температур в тепловій схемі є змінними величинами і описуються законами Ома та Кірхгофа для теплових схем. Формально вони аналогічні законам Ома і Кірхгофа для електричних кіл. На підставі цих законів теплові схеми можуть бути перетворені і розраховані.

Тепло, яке підводиться до гарячих спаїв ТЕГ шляхом кондукції передається радіатору, а далі шляхом конвекції - навколишньому середовищу. Потік тепла, який прямує від вузла з температурою T_1 до вузла з температурою T_2 справедливий закон Ома

$$P_i = \frac{\Delta T}{\Theta}, \quad (2.1)$$

тут - $\Delta T = T_1 - T_2$ – перепад температур між кінцями,

Θ – термічний опір ділянки кола.



Термічний опір описується формулою:

$$\Theta = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S}, \quad (2.2)$$

де κ - питомий коефіцієнт теплопровідності;

ΔS - площа поперечного перерізу вітки,

Δl - довжина теплопровідної вітки.

Перепад температури між кінцями кількох послідовно з'єднаних віток теплового кола описується другим законом Кірхгофа

$$T_1 - T_2 = \Delta T = \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (2.3)$$

де

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

- перепад температури на i – тій вітці.

Термічний опір послідовно з'єднаних віток

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \Theta_i \quad (2.4)$$

де

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

- термічний опір i – тої вітки.

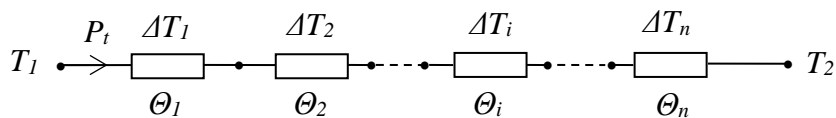


Рис. 2.1 - Теплова схема послідовного з'єднання термічних опорів

Потік тепла який прямує від ділянки кола з температурою T_1 до ділянки з температурою T_2 по кількох вітках описується першим законом Кірхгофа для теплових потоків:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{ii}, \quad (2.5)$$

де тепловий потік в i -тій вітці

$$P_{ii} = \frac{\Delta T}{\Theta_i}. \quad (2.6)$$

Таким чином, термічний опір паралельно з'єднаних віток

$$\Theta = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Theta_i} \right)^{-1}. \quad (2.7)$$

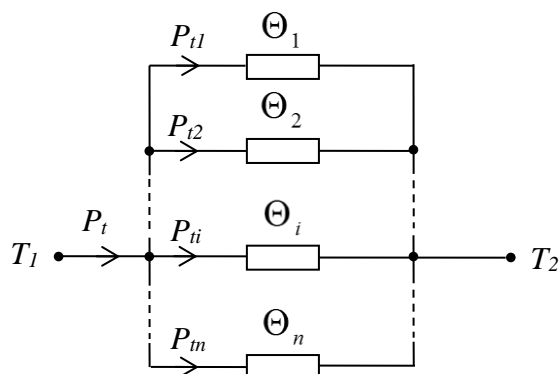


Рис. 2.2 - Теплова схема паралельного з'єднання термічних опорів

Потік конвективної складової теплового потоку описується співвідношенням:

$$P_c = \alpha S \Delta T, \quad (2.8)$$

де: α – конвективний коефіцієнт теплообміну;

S - площа поверхні радіатора;

ΔT - різниця температур між температурами радіатора і середовища.

Величина термічного опору теплообміну із середовищем шляхом конвекції описується співвідношенням [26]:

$$\Theta_c = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{\Delta S}, \quad (2.9)$$

Загальний термічний опір радіатора можна звести до двох складових: кондукційної, яка залежить від теплопровідності радіатора, і конвекційної, яка визначається теплорозсіюючою здатністю поверхні радіатора.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну α залежить від багатьох факторів, особливо від положення охолоджуючої поверхні в просторі. Зокрема, для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої горизонтально нагрітою поверхнею вверх коефіцієнт конвекційного теплообміну

$$\alpha = 1.3A \frac{\sqrt[4]{T_r - T_a}}{h} \quad (2.10)$$

Для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої вертикально:

$$\alpha = A \frac{\sqrt[4]{T_r - T_a}}{h} \quad (2.11)$$

Якщо радіатор знаходиться ізольовано, віддалено від інших джерел тепла величина складає $\alpha = 3 \div 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Для систем охолодження з примусовим обдувом $\alpha = 100 \div 1000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

2.2 Термоелектричні ефекти

Ефект Зеебека лежить в основі роботи термоелектричного генератора [26]. Він полягає в тому, що в розімкнутому електричному колі, яке складається з двох різнотипних послідовно з'єднаних напівпровідників, виникає термоЕРС. Таке з'єднання називається термопарою, або термоелементом. Різнотипними прийнято

вважати матеріали однакового хімічного складу, але з різним типом провідності. Якісно ефект Зеебека описується наступним чином. Якщо кінці напівпровідника n -типу підтримувати при різних температурах T_1 і T_2 , то електрони на гарячому кінці будуть мати більшу енергію і швидкість ніж на холодному. Крім того, в напівпровіднику із збільшенням температури концентрація вільних електронів збільшується і на гарячому кінці буде більшою ніж на холодному. В результаті цього, в електронному напівпровіднику в напрямку від гарячого до холодного кінця виникне потік електронів. При цьому, на холодному кінці буде накопичуватися негативний заряд. Процес накопичення заряду буде тривати до тих пір, доки виникаюча при цьому різниця потенціалів не спричинить вторинний потік електронів у зворотному напрямку, який рівний первинному. Коефіцієнт термоЕРС можна знайти із співвідношення:

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

де k - постійна Больцмана, e – заряд електрона, ε – середня енергія електрона, $\zeta = \eta/kT$ - приведений хімічний потенціал, η - хімічний потенціал електронів.

Описане явища в діркових напівпровідниках протікає аналогічно, з тією різницею, що в діркових напівпровідниках на холодному кінці накопичуються позитивні заряди. Тому в термоелементі, який складається з послідовно з'єднаних напівпровідникових віток з дірковим і електронним типом провідності термоЕРС віток додається. Сумарна термоЕРС термоелемента визначається співвідношенням.

$$E_{te} = (\alpha_n + \alpha_p)(T_1 - T_2) = \alpha_{pn}(T_1 - T_2), \quad (2.1)$$

де α_p - коефіцієнт термоЕРС вітки p - типу,

α_n - коефіцієнт термоЕРС вітки n - типу,

$\alpha_{pn} = \alpha_p + \alpha_n$ - коефіцієнт термоЕРС термопари.

Ефект Пельтьє [27] полягає в тому, що при пропусканні постійного струму через термоелемент, в місці контакту напівпровідників виділяється або поглинається певна теплова потужність (в залежності від напрямку струму)

$$P_{II} = \Pi I, \quad (2.2)$$

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

T – температура контакту,

I – сила струму.

Причиною тепла Пельтьє є перехід електронів через контакт в напрямку з матеріалу p -типу в n -тип. При цьому вони долають потенціальний бар'єр і забирають енергію в місці контакту, при цьому контакт охолоджується. При зміні напрямку струму на протилежний в місці контакту додатково до тепла Джоуля буде виділятися тепло Пельтьє. Ефект Пельтьє є поверхневим ефектом.

2.3 Енергетичний розрахунок термоелемента

Якщо до термоелемента приєднати навантаження у вигляді зовнішнього опору R , то в колі виникне електричний струм [28]. Величину струму знайдемо із закону Ома для повного кола

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

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

r_p і r_n опори віток p і n - типу провідності відповідно,

r_k - опір комутаційних пластин,

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

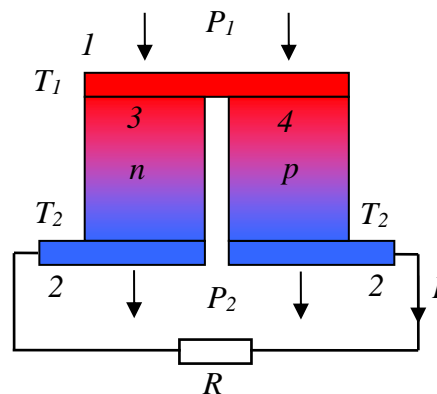


Рис. 2.1 Схема термоелемента із навантажувальним опором.

1 і 2 – холодний та гарячий колектори тепла, 3 і 4 - вітки термоелемента n - і p - типу провідності.

Якщо виразити опір комутації у вигляді відносної величини

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

а опори віток через їх геометричні розміри і питомі опори термоелектричних матеріалів, то

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

де ρ_p і ρ_n - питомі опори віток p і n - типів відповідно,

l – довжина віток,

S - площа поперечного перерізу віток.

Опір навантаження доцільно записати у вигляді

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

тоді формула (2.3) набере вигляду

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

а напруга на зовнішньому опорі

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

Знайдемо корисну електричну потужність, яку генерує ТЕГ

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

Робота термоелектричного генератора, як і будь-якої теплової машини, описується формулами термодинаміки. Тому його можна назвати не тільки термоелектричним, але і термодинамічним пристроєм. Щоб розглянути роботу ТЕГ з термодинамічної точки зору необхідно виразити перепад температур і його геометричні розміри через теплові потоки в термоелементі. При відсутності струму при умові адіабатичної ізоляції бічних граней віток кондуктивний потік тепла через термоелемент визначається теплопровідністю обох віток. Згідно із законом Фур'є при перепаді температур ΔT

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

де κ_p і κ_n – коефіцієнти теплопровідності віток p і n - типів відповідно.

При наявності струму в об'ємі обох віток виділяється потужність Джоуля

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

Крім вказаних потоків, на гарячому спаї поглинається

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

а на холодному спаї виділяється тепло Пельтьє

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

Будемо вважати, що половина потужності Джоуля йде до гарячого, а половина до холодного спаю. Тоді баланс потужності на гарячому і холодному спаях термоелемента буде мати вигляд

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

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

Оскільки потік тепла Фур'є не залежить від струму, то потоки тепла P_1 і P_2 зручно виразити через P_{κ}

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

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

Величина

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

яка залежить тільки від властивостей матеріалу напівпровідникових віток називається термоелектричною добротністю матеріалу, а величина

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

термоелектричною добротністю термоелемента.

В силу закону збереження енергії електричну потужність, яку генерує термоелемент, знайдемо як різницю підведеного і відведеного потоків тепла

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

Використовуючи (2.16) і (2.17) знайдемо ККД термоелемента як відношення корисної електричної потужності до підведеної

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

Перший множник описує ККД теплової машини, яка працює за оборотним циклом Карно, а другий - враховує його зменшення за рахунок незворотних втрат, обумовлених теплопровідністю термоелектричного матеріалу і виділенням тепла Джоуля.

Для отримання максимальної корисної потужності в залежності від опору навантаження, необхідно розв'язати рівняння

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

Очевидно, що максимальна потужність

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

досягається при $M=1$, що відповідає рівності опору навантаження внутрішньому опору термоелемента $R = r_{te}$. При цьому величина ККД складе величину

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

Крім режиму максимальної потужності термоелемент може працювати в режимі максимального ККД. Максимальний ККД [28]

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M_0 - 1}{M_0 + T_2/T_1}, \quad (2.25)$$

знаходиться із рівняння

$$\frac{d\eta_{te}}{dM} = 0, \quad (2.26)$$

при

$$M_0 = \sqrt{1 + z_{te} T_c}, \quad (2.27)$$

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

2.4 Особливості роботи короткозамкнутого термоелектричного генератора

Традиційний термоелектричний генератор складається з великої кількості послідовно і паралельно з'єднаних термоелементів. Кожен з термоелементів

контактує з гарячим і холодним металевими колекторами тепла. При цьому в місці контакту виникають паразитні термічні опори.

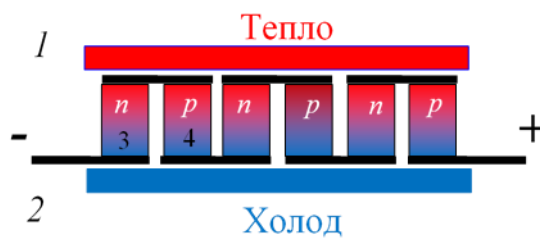


Рис. 2.2 - Схема традиційного термоелектричного генератора: 1 – гарячий колектор; 2 – холодний колектор, 3 – напівпровідникова вітка n -типу провідності, 4 – напівпровідникова вітка p -типу провідності.

Короткозамкнутий термоелектричний генератор складається лише з двох віток n - і p - типу провідності, тобто лише з одного термоелемента [27]. Площа віток може досягати площі панельної термобатарей.

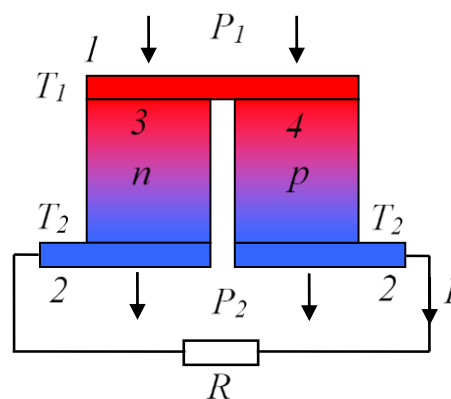


Рис. 2.1 Схема короткозамкнутого ТЕГ. 1 і 2 – холодний та гарячий колектори тепла, 3 і 4 - вітки термоелемента n - і p - типу провідності.

Як наслідок, термоелемент має велику площу і дуже малий електричний опір. В результаті цього, при незначній напрузі генерації (соті долі вольта), можна отримати струми у сотні і тисячі ампер [27,28].

Температурний та енергетичний рівень поверхневих низькопотенційних джерел енергії приведений в таблиці 2.1.

Джерела низькопотенційного тепла 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	-	-	-

Короткозамкнуті ТЕГ, в основному, застосовуються для живлення термоелектричних насосів, електромагнітів, конвертерів низької напруги у високу та ін. В короткозамкнутих ТЕГ джерело генерації електроенергії і її споживання інтегровані в одному електротехнічному пристрої. Для забезпечення температурного режиму віток ТЕГ, до нього приєднується активна або пасивна система охолодження. В короткозамкнутій конструкції ТЕГ напрям електричного струму співпадає з напрямом теплового потоку. Особливістю короткозамкнутих ТЕГ є те, що в них відсутні комутаційні спаї та шари електро та теплоізоляції. Деталі корпусу і кріплення в цьому випадку є одночасно провідниками тепла і електричного струму.

Поперечний переріз кріплення по відношенню до поперечного перерізу напівпровідника підбирають таким чином, щоб втрати електричного струму по замикаючому контуру не перевищували 5-10%. Джерелами тепла в короткозамкнутих ТЕГ можуть бути розплавлені теплоносії, радіоізотопи, ТВЕЛ ядерного реактора та ін.. Надійні теплові і електричні контакти напівпровідника з матеріалом теплопровода і корпусу забезпечуються притисканням, зваркою або пайкою через відповідні прокладки. Короткозамкнутий ТЕГ можна охолоджувати як радіаторами так і рідиною, яка циркулює в трубках що пронизують конструкцію ТЕГ.

Переваги короткозамкнутої конструкції ТЕГ – підвищення термодинамічного ККД генератора внаслідок відсутності комутаційних та ізоляційних шарів. В перспективі вони можуть використовуватися в термогенераторах потужністю в сотні і тисячі кіловат.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

Низькопотенційну теплову енергію в безпосередньо електричну можна перетворювати за допомогою термоелектричних генераторів (ТЕГ) [27, 28]. Однак, можливості термоелектричних генераторів, які працюють при малому перепаді температур між нагрівачем і охолоджувачем обмежені. При розрахунку ефективності термоелектричного процесу слід брати до уваги реальну конструкцію термоелектричного генератора, і враховувати додаткові втрати в електричній комутації термоелементів і теплоізоляції, розміщеній між термоелементами. Відомо, що для практичних потреб в основному використовуються багатоелементні конструкції термоелектричних перетворювачів. Це пов'язано з тим, що споживачі електричної енергії мають робочі напруги від декількох десятків до сотень вольт, тоді як напруга, яку дають окремі термоелементи, в межах десяти і, навіть, сотих долей вольт. Таким чином необхідно їх з'єднати в послідовне електричне коло. Враховуючи, що для підвищення надійності схема електричних з'єднань повинна мати паралельні кола, перетворювач повинен являти собою систему, яка складається з великої кількості окремих термоелементів, що з'єднані між собою по струму послідовно-паралельно, а по теплу — паралельно. ККД такого перетворювача визначається співвідношенням

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

де

$$\Delta T_r = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \Delta T_i \right]}{m}$$

- середньоарифметичний перепад температури, m – кількість послідовно з'єднаних елементів, M - відносне корисне навантаження, ΔT_i – перепад температури на i -тому термоелементі, T_i середня температура гарячого спаю i – того термоелемента,

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

- термоелектрична добротність перетворювача, $\alpha_i, \sigma_i, \kappa_i$ - середні коефіцієнти термоерс, електропровідності та теплопровідності термоелементів.

Якщо температурний режим термоелементів однаковий, то (3.2) перетвориться до вигляду

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

де Z_0 - добротність термоелектричного матеріалу, m_σ і m_κ коефіцієнти, що описують втрати теплової та електричної енергій на ізоляційних і комутаційних шарах та на елементах конструкції.

Втрати електричної потужності, спричинені втратами струму, можна представити у вигляді [28]

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

де P – потужність термоелектричного генератора,

M – відносне навантаження;

r_0 – внутрішній опір термоелемента;

r_i – опір його ізоляції;

n – кількість термоелементів у ТЕГ.

До тих пір, поки виконується умова

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

електричні втрати корисної потужності невеликі.

Однак, при виконанні умови

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

втрати потужності і зниження ККД будуть настільки значними, що не рахуватися з ними не можна. Тому термоелектричний генератор має обмеження на число послідовно з'єднаних елементів.

У цьому зв'язку стають очевидними переваги короткозамкнутих конструкцій ТЕГ [28]. Це, у першу чергу, збільшення внаслідок відсутності комутаційних та ізоляційних шарів термодинамічного ККД, висока надійність, простота і

дешевизна виготовлення термобатарей в цілому. Проте, короткозамкнуті ТЕГ застосовуються порівняно рідко. В основному через малу генеровану ними напругу і неможливість передачі без значних втрат до споживача струмів великої сили (десятки і сотні ампер). У світлі сказаного, найбільш перспективними, з точки зору ефективного перетворення низькопотенційної енергії, міг би стати термоелектричний низькопотенційний конвертер теплової енергії в механічну (ТЕНК) з твердим робочим тілом, запропонований у [31,32]. В ТЕНК процеси генерації, передачі і споживання термоелектричного струму інтегровані в одному пристрої.

3.1 Будова і принцип дії конвертера

Принцип дії термоелектромеханічного низькопотенційного конвертера пояснює схема, приведена на рисунку 3.1. Зокрема, феромагнітний диск (ротор), рухомо закріплений в циліндричному корпусі (статорі) таким чином, щоб міг обертатися навколо провідної осі. В роторі, з допомогою магнітної системи (для спрощення рисунка магнітна система на схемі не показана), в напрямку перпендикулярному до його поперечного перерізу збуджується магнітне поле індукцією B . Електричний струм, який виробляється короткозамкнутим термоелементом, вздовж струмопровідної шини протікає до осі, а потім, через низькоомні рідкометалеві контакти на феромагнітний ротор. В силу циліндричної симетрії ротора, струм по ньому розтікається радіально. Виникаюча при цьому сила Ампера F_a приводить ротор в обертовий рух. Напрямок обертання визначається за правилом правої руки, та залежить від напрямку струму в роторі та напрямку магнітної індукції

$$F_a = IBr,$$

де

I – радіальний струм в роторі,

B – магнітна індукція,

r – радіус ротора.

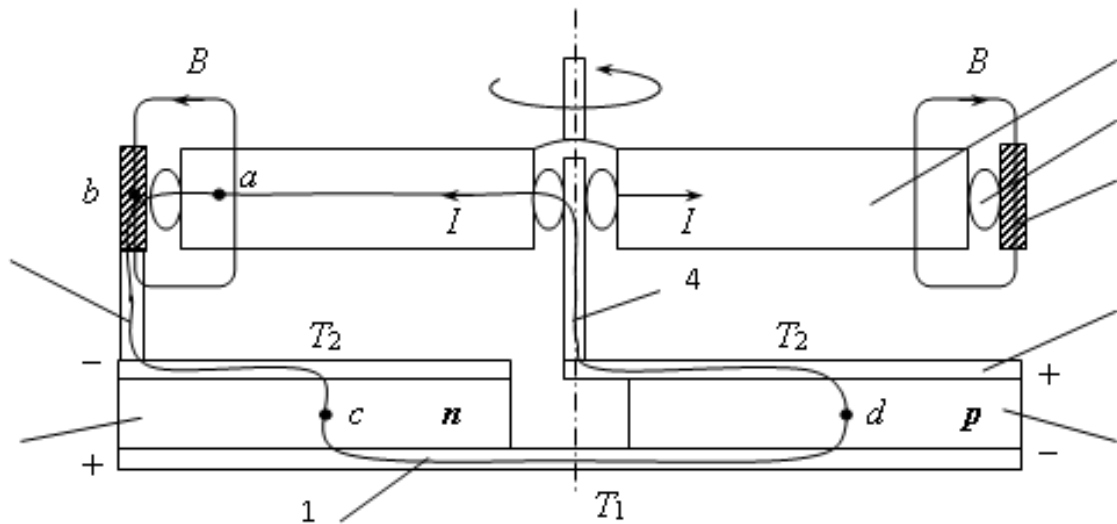


Рис. 3.1 Схема термоелектромеханічного низькопотенційного конвертера теплової енергії. 1 - колектор, 2 – термоелементи дріркового і електронного типів провідності, 3 – мідна комутаційна шина, 4 – провідна вісь обертання, 5 – низькоомні рідкометалеві контакти, 6 - статор, 7 – феромагнітний ротор.

3.2 Розрахунок теплового режиму конвертера

На схемі конвертера, як теплової машини, джерело теплової енергії характеризується заданою різницею температури ΔT . Струмоденеруючі вітки електронного і дріркового типу провідності по тепловому потоку з'єднані паралельно у вигляді двох незалежних термічних опорів Θ_n і Θ_p між нагрівачем, який характеризується температурою T_1 і холодильником (зовнішнім середовищем), яке має температуру T_2 . Термічні опори елементів змінюються. Вони зменшуються при збільшенні робочого струму, який протікає в електричному колі термоелемента. Термічні контактні опори, на яких з точки зору генерації струму непродуктивно витрачається деяка частка наявного термічного перепаду ΔT , зображені на рисунку у вигляді послідовно сполучених з вітками, термічних опорів Θ_1 і Θ_2 .

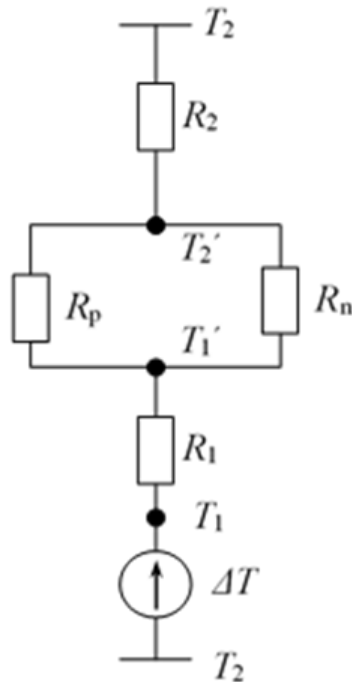


Рис. 3.2. Еквівалентна теплова схема конвертера:

ΔT – різниця температур між нагрівачем і холодильником,

Θ_1 – тепловий опір між нагрівачем і гарячим спаєм термоелемента,

Θ_p і Θ_n – тепловий опір віток діркового і електронного типів провідності,

Θ_2 – тепловий опір між холодильником і холодним спаєм термоелемента.

Застосовуючи метод електротермічної аналогії [26] та еквівалентну теплову схему конвертера знайдемо еквівалентний термічний опір між нагрівачем і холодильником

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

де

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

- еквівалентний опір паралельного сполучення термічних опорів,

Знайдемо температурний перепад між спаями

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

де $\Delta T = T_1 - T_2$,

T_1 і T_2 - температури нагрівача і холодильника,

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

T_1' і T_2' - температури гарячого і холодного спаїв відповідно.

Очевидно, що між спаями перепад температури менший ніж перепад температури між нагрівачем і холодильником. Це пояснюється наявністю втрат теплової енергії на комутаційних та ізоляційних спаях.

3.3 Розрахунок електромеханічних параметрів ТЕМК

Розглядатимемо термоелектричний конвертер як своєрідну струмогенеруючу p - n пару, особливістю якої є те, що вона не має традиційного активного опору з'єданого з позитивним і негативним полюсами p - n пари. При цьому роль опору виконує протиЕРС індукції Фарадея, яка виникає в електричному колі при обертанні в магнітному полі ротора конвертера, і направлена назустріч термоелектричному струму. Для розрахунку параметрів конвертера будемо використовувати еквівалентні схеми заміщення :еквівалентну електричну (рис.2а) і еквівалентну теплову (рис.2б), які побудовані на елементах із сконцентрованими параметрами.

Робота конвертера описується другим рівнянням Максвелла та узагальненим законом Ома

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (3.4)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \alpha \sigma \nabla T, \quad (3.5)$$

де E – напруженість електричного поля,

$\Phi = BS$ – магнітний потік, який проходить крізь поперечний переріз ротора,

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

r - радіус ротора,

B - магнітна індукція в роторі,

j – густина струму,

σ і α відповідно коефіцієнти електропровідності і термоЕРС віток термоелемента,

∇T – градієнт температури в термоелементі.

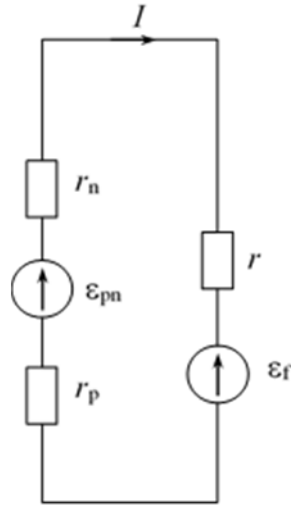


Рис. 3.4 Еквівалентна електрична схема конвертера:

r_p - електричний опір вітки діркового типу провідності,

r_n – електричний опір вітки електронного типу провідності,

r – сумарний опір колекторів, комутаційних шин, феромагнітного ротора і рідкометалевих низькоомних контактів,

ε_{pn} – термоЕРС термоелемента.

Інтегруючи (3.4) вздовж контура $a-b-c-d-a$ і використовуючи рівняння (3.5) отримаємо

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

де I - струм в колі,

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

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

α_p і α_n – коефіцієнти термоЕРС віток термоелемента.

Знайдемо ЕРС індукції Фарадея

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

$\varepsilon_f = -\Phi n$ – ЕРС індукції Фарадея,

n – частота обертання ротора.

Використовуючи (3.7) формулу (3.6) представимо у вигляді

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

де $m_\sigma = \frac{r}{r_{pn}}$ - коефіцієнт електричних втрат, який описує втрати електричної енергії

в електричній ізоляції та комутаційних спаях,

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

контактних термічних опорах.

У режимі холостого ходу частота обертання ротора досягає максимального значення, і викликана ним протиЕРС індукції повністю скомпенсовує термоЕРС. В цьому випадку в колі струму немає. Якщо $I = 0$, то з (3.8) отримаємо

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

В режимі короткого замикання, коли ротор нерухомий, струм у колі досягає максимального значення

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

Використовуючи (3.6) та (3.7), із формули (3.5) для частоти обертання ротора конвертера отримаємо

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

де

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

коефіцієнт ковзання, який введений по аналогії з коефіцієнтом ковзання в теорії асинхронних машин.

Як видно з рівнянь (3.11) та (3.12) в режимі короткого замикання ковзання $S=0$, і пропорційно збільшується при зменшенні частоти обертання ротора. Максимальне значення $S=1$ досягається в режимі короткого замикання.

Знайдемо механічну потужність конвертера як добуток ЕРС індукції на струм

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

Максимальну потужність знайдемо із умови $dP/dS=0$. Диференціюючи (3.10) отримаємо:

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

звідки видно, що максимум досягається при $S_P=1/2$.

Для максимальної потужності отримаємо:

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

Використовуючи формулу

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

Знайдемо електромагнітний момент конвертера

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

Залежність електромеханічних параметрів двигуна від ковзання наведена на рис.

3.5.

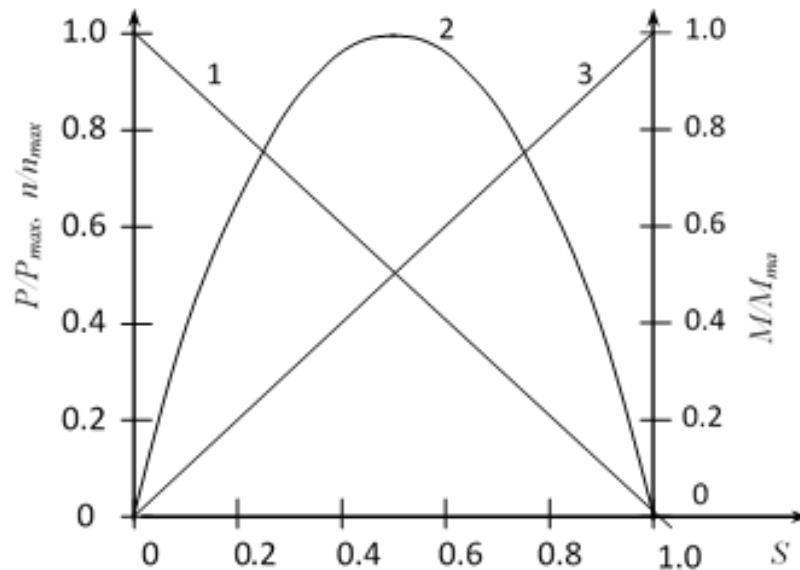


Рис. 3.5 Залежність електромеханічних параметрів конвертера від ковзання. Крива 1.- n/n_{\max} , 2. - P/P_{\max} , 3. - M/M_{\max} .

Очевидно, що в режимі максимальної потужності оптимальний струм, оптимальний електромагнітний момент та оптимальна частота обертання будуть описуватися співвідношеннями:

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

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

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

Як видно з отриманих співвідношень, величина електричної потужності від величини магнітного потоку не залежить. Це очевидно, адже електромагнітний момент ротора пропорційний, а частота його обертів обернено пропорційна магнітному потоку. В той же час механічна потужність визначається добутком вказаних параметрів.

3.4 Розрахунок ККД конвертера

Нехтуючи втратами механічної потужності на тертя та використовуючи формулу для ефективності термоелемента [28], отримуємо формулу для ККД конвертера:

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

де:

$\eta_\kappa = \Delta T/T_1$ - ККД теплової машини, яка працює за циклом Карно,

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

z - термоелектрична добротність матеріалу термоелемента [1].

В режимі максимальної механічної потужності при $S = 1/2$ з (3.20) отримаємо

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

Крім того, двигун може працювати в режимі максимальної ефективності. Оптимальне значення ковзання, при якому досягається цей режим, можна знайти з умови

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

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

де $T = (T_1 + T_2)/2$ – середня температура.

Максимальна величина ефективності при $S=S_0$ визначається формулою

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

В режимі максимального ККД оптимальні, потужність, електромагнітний момент та частота обертання будуть описуватися співвідношеннями:

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

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

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

де

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

Як видно з (3.27), нерівність $S_0 < 1/2$ виконується завжди. Нерівність збільшується із збільшенням параметра ZT . Це означає, що режим максимальної потужності та режим максимальної ефективності ніколи не будуть збігатися. Як видно з рис. 3.6, для сучасних термоелектричних матеріалів, для яких $ZT \leq 1$ співвідношення $\eta_p / \eta_{max} \geq 0.97$. Тому ККД в режимі максимальної потужності та максимального ККД відрізняється незначно.

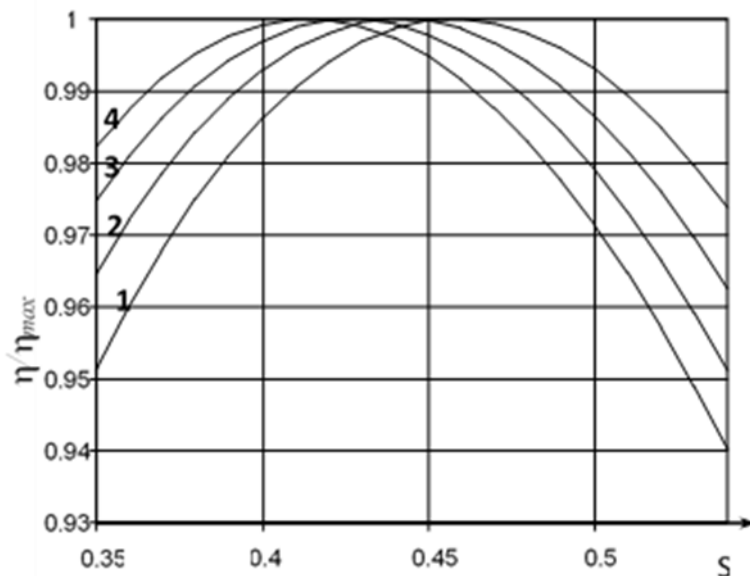


Рис.3.6 Залежність η/η_{\max} від ковзання при $T=300\text{ K}$: 1. - $ZT=0.4$, 2. - $ZT=0.6$, 3. - $ZT=0.8$, 4. - $ZT=1.0$.

3.5 Режими роботи пристрою

В результаті термодинамічної оборотності термоелектричних ефектів конвертер може працювати в трьох основних режимах: моторному (режим двигуна), термопідігрівному (режим теплового насоса) та термоохолоджуючому (режим термоелектричного холодильника). Схеми, які демонструють ці режими зображені на рисунку.

В моторному режимі ($0 \leq S \leq 1$), конвертер здійснює перетворення теплової енергії, яка надходить від нагрівача, в механічну роботу.

Схеми, які демонструють ці режими зображені на рис 3.7.

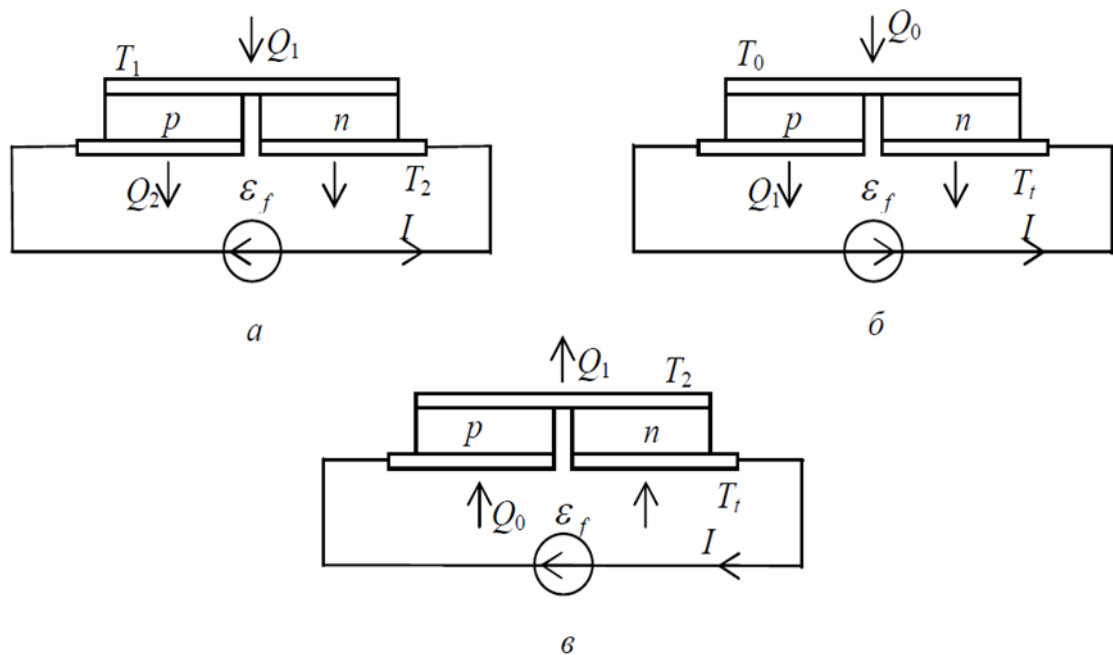


Рис.3.7 Режими роботи конвертера. а - моторний, б – термопідігрівний, в – термоохолоджуючий.

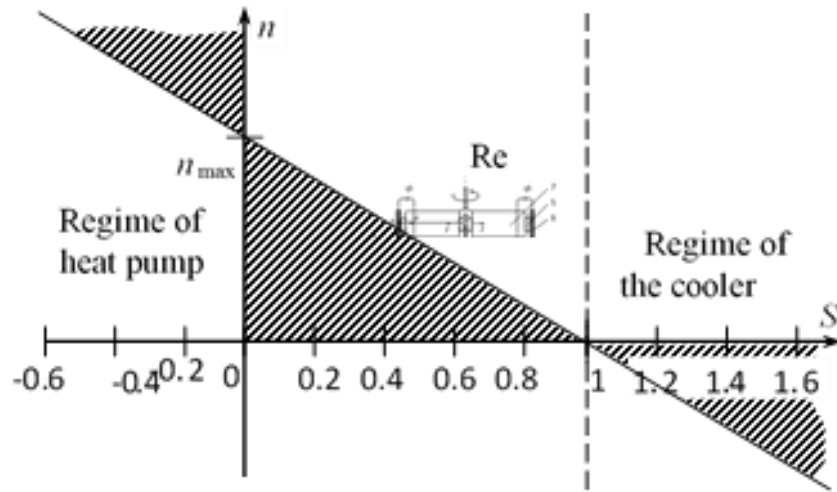


Рис 3.8 Залежність частоти обертання ротора конвертера від ковзання

Зменшення електромагнітного моменту на валу ротора до нуля відповідає режиму неробочого (холостого) ходу. Якщо продовжувати обертання ротора конвертера в тому ж напрямку, але вже з частотою $n > n_{max}$ ($-\infty < S < 0$), то при сумісній дії ефекту електромагнітної індукції та ефекту Пельтьє [27,28] тепла енергія від оточуючого середовища буде перекачуватися до колектора конвертера. Колекторна пластинка буде нагріватися за рахунок виділення тепла Пельтьє. Крім тепла Пельтьє в колекторній пластині буде виділятися також тепло Джоуля. Тому теплова ефективність такого нагрівача буде вищою, ніж нагрівання виключно теплом Джоуля. Двигун буде працювати в термopідгpівному режимі (режим теплового насоса) (рис. 3.6 б).

Якщо до ротора конвертера прикласти доволі великий тормозний момент, ротор зупиниться. При подальшому розкручуванні вала ротора у напрямку тормозного моменту ($1 < S < \infty$) напрям струму в електричному колі зміниться на протилежний. В результаті цього колектор конвертера буде поглинати теплову енергію із навколишнього простору. Двигун перейде в режим охолодження (рис. 3.6в). Потужність тепла, яка поглинається колектором конвертера є його холодопродуктивністю:

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

Потужність тепла, яка виділяється на радіаторі P_h визначається формулою

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

тут α - коефіцієнт термоЕРС,

κ – теплопровідність,

R – сумарний опір віток,

T_c - температура холодного колектора,

T_h - температура гарячого колектора,

I – величина струму.

Теплова потужність P_h при допомозі радіатора відводиться в навколишнє середовище.

Теплова потужність, яка йде від гарячих пластин до холодних шляхом кондукції

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

Очевидно, що потужність тепла, яке виділяється на гарячій пластині термопари буде більшою від потужності тепла яка поглинається холодною пластиною на величину затрат електричної потужності джерела енергії W

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

При обертанні ротора в напрямку, коли виникаючий індукційний струм буде протікати від вітки n -типу до вітки p -типу, внаслідок дії ефекту Пельтьє здійснюється перенесення тепла Q_0 від колектора з температурою T_0 до термостата з температурою T_t .

3.6 Магнітна система конвертера

Магнітну систему ТЕМК схематично зображено на рис.3.9.

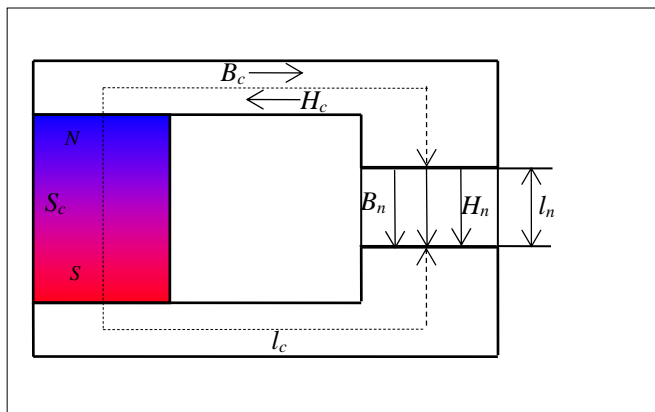


Рис.3.9 Схема магнітопроводу ТЕМК з повітряним проміжком

Вона являє собою магнітне коло із двох ділянок: сталюого магнітопроводу, в якому напруженість магнітного поля H_c можна вважати однаковою в усіх точках середньої лінії, і повітряного проміжку, напруженість магнітного поля в якому зв'язана з магнітною індукцією співвідношенням

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

При незначній дожині повітряного проміжку можна прийняти переріз повітряного проміжку S_n рівним перерізу магнітопроводу S_c тобто вважати індукцію у всіх точках магнітного кола однаковою

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

Вибираючи контур інтегрування вздовж середньої лінії по напрямку магнітної індукції $B_c = B_n$ запишемо закон повного струму в інтегральній формі. Оскільки в колі намагнічуючого струму немає, то

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

звідки

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

де

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

- коефіцієнт розмагнічування по індукції.

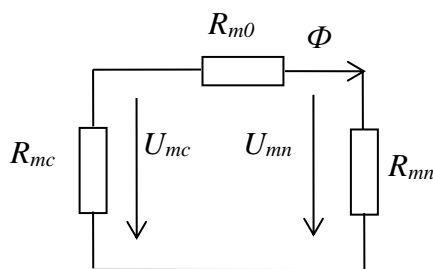


Рис. 3.10 Схема магнітного кола ТЕМК

Таким чином, незважаючи на відсутність намагнічуючих струмів, напруженість магнітного поля в усіх точках магнітопроводу відмінна від нуля. В повітряному проміжку напрям вектора магнітного поля збігається з напрямком вектора магнітної індукції, а всередині магнітопроводу вони направлені протилежно (рис.3.5). Оскільки негативному значенню напруженості магнітного поля H_c

відповідають позитивні значення магнітної індукції $B_c = B_n$, то магнітний стан магнітопроводу визначається рівнянням магнітного стану

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

де B_r – залишкове намагнічування,

H_c – коерцитивна сила постійного магніта.

Розв'язуючи систему рівнянь (3.32) і (3.34) відносно магнітної індукції отримаємо:

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

Параметри постійних магнітів. Таблиця 3.1

Grade	Equivalent MPPA Class	Br		H _{cb}		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		
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 збудження магнітного потоку в ТЕМК використаємо постійний магніт із сплаву ALNICO-5DG із залишковою індукцією $B_r = 1.30T$ і коерцитивною силою $H_{cb} = -56000 A/m$. Покладемо довжини $l_c = 125mm$, і $l_n = 10mm$ і знайдемо величину магнітної індукції $B_c = B_n = 0.53T$. При цьому величина коерцитивної сили складає $H_{cb} = -33530 A/m$. Знайдемо магнітний потік через переріз ротора конвертера

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

3.7 Охолоджувальна система конвертера

При розробці теплових машин, до яких відноситься і конвертер, важливим завданням є вибір системи охолодження. Системи охолодження поділяються на пасивні і активні. Пасивні системи охолодження є найпростішим і найпоширенішим способом термостабілізації різноманітної апаратури.

Тепло, яке підводиться від нагрівача до конвертера, кондуктивним шляхом передається до гарячого колектора конвертера, а далі конвективним шляхом і шляхом випромінювання передається холодильнику в ролі якого виступає навколишнє середовище. Цей спосіб охолодження характеризується доволі низькою ефективністю.

Конвекцію можна підсилити, якщо до конвертера приєднати масивний радіатор. Це різко збільшить площу поверхні теплообміну з навколишнім середовищем. Завдяки кондукції тепло від корпусу конвертера передається до радіатора. Далі, шляхом конвекції – оточуючому середовищу. Радіатори відрізняються конструкцією, матеріалом та способом виготовлення. За конструкцією радіатори бувають голчасті, пластинчаті або ребристо-пластинчаті. Голчасті радіатори краще застосовувати в умовах природної конвенції. Інші конструкції доцільно застосовувати у випадку примусового обдуву повітрям. За матеріалом виготовлення радіатори виготовлені з кольорових металів: міді та її сплавів, алюмінію та його сплавів. За способом виготовлення можна виділити наступні типи радіаторів:

- виготовлені шляхом гарячого порошкового пресування;
- отримані методом холодної ковки
- виготовлені шляхом фрезерування із шматка металу;
- та ін..

Теплопровідність деяких матеріалів. 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

Часто до радіаторів ставляться досить жорсткі вимоги по габаритах. Внаслідок цього може виникнути потреба у виготовленні радіатора під конкретні вимоги. При конструюванні радіатора треба враховувати сумарну кінцеву вагу пристрою, його вартість та можливість подальшого серійного виробництва. Найчастіше використовуються литі або ковани алюмінієві радіатори. Цілком очевидно, що площа розсіюючої поверхні радіатора повинна бути досить великою. Для грубої оцінки прийнято вважати, що на $1Вт$ розсіяного тепла треба взяти радіатор з розсіюючою площею $30 - 60 см^2$.

Якщо з відведенням надлишкової теплової енергії пасивне охолодження не справляється, потрібно використовувати активні способи охолодження. Існує дуже багато способів активного охолодження. Це і вентилятори і теплові трубки, рідинне охолодження і термоелектричні модулі Пельтьє.

Рідинне охолодження використовують для розсіювання потужностей в десятки і сотні ват. Для максимальної ефективності відводу тепла в цьому випадку треба використовувати радіатори з тепловим опором не більше $0.05-0.1 К/Вт$. Досягти такого малого теплового опору допоможуть рідинні охолоджувачі.



Рис 3.11 Рідинний охолоджувач

Суть рідинного охолодження полягає у відводі надлишкового тепла від робочого тіла за допомогою контакту з теплоносієм. Рідина-теплоносій циркулює в герметичному контурі, поглинаючи тепло і віддаючи його в контурі охолодження. В ролі теплоносія, в основному, використовують дистильовану воду, іноді тосол, масло, рідкі метали та ін..

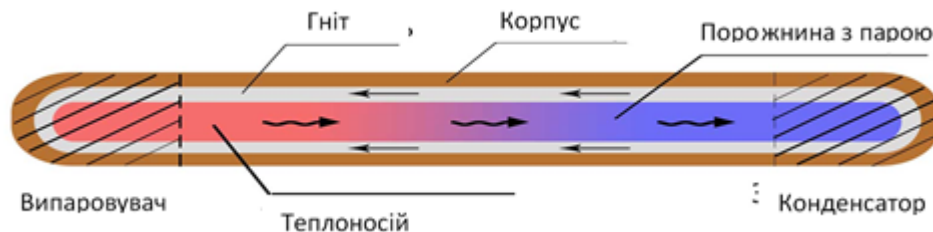


Рис 3.12 Схема будови теплової трубки

Теплова трубка (ТТ), це теплопровід, який може передавати великі теплові потоки при малих градієнтах температури на поверхні трубки і рівномірною тепловіддачею з її поверхні. Це обумовлено на кілька порядків більшим коефіцієнтом теплопровідності трубок в порівнянні з коефіцієнтом теплопровідності металів. Теплова трубка являє собою герметично запаяний контейнер, який частково заповнений рідким теплоносієм. В області нагрівання рідкий теплоносій поглинаючи теплоту пароутворення випаровується, а в області охолодження газоподібна фракція теплоносія, яка переміщується із області випаровування конденсується виділяючи теплоту конденсації. Рух пари від області нагріву до області конденсації відбувається за рахунок різниці тисків насиченої пари, яка визначається різницею температур в областях випаровування і конденсації.



Рис. 3.13 Система охолодження на теплових трубках

Повернення конденсату в область випаровування здійснюється під дією капілярної різниці тисків гноту, розташованого всередині теплової трубки. В зв'язку з тим, що для повернення конденсату теплові трубки з капілярною структурою можуть працювати незалежно від орієнтації в гравітаційному полі і в невагомості, найбільш поширений саме такий тип теплових трубок. Відношення щільності теплового потоку через поперечний переріз теплової трубки (ефективна теплопровідність) до падіння температури на одиницю довжини трубки в десятки тисяч разів більше, ніж теплопровідність металів і складає ($10^6 - 10^7$) $Вт/м \cdot К$. Слід зазначити, що перегрів області випаровування неприпустимий. Внаслідок перегріву може наступити криза процесу кипіння, при якій вся рідина випарується і передача тепла піде по металевих стінках теплової трубки. При цьому сумарна теплопровідність трубки впаде, а транспортування теплоти припиниться.

3.8 Обчислення параметрів ТЕМК

Оцінимо параметри конвертера, який працює в режимі максимальної потужності. Припустимо, що вітки пристрою виготовлені з термоелектричного матеріалу на основі сплаву $Bi-Te-Sb-Se$ загальною площею $S = 30 \text{ см}^2$ товщиною $h = 0.4 \text{ см}$. Нехай радіус ротора - $r = 5 \text{ см}$, а індукція магнітного поля $B = 0,53 \text{ Т}$. Потужність, електромагнітний момент, частота обертання ротора та струм в режимі максимальної потужності при середній температурі $T = 300 \text{ К}$ приведені в таблиці 3.2.

Параметри ТЕМК в режимі максимальної потужності. Таблиця 3.3

$\Delta T, (K)$	m_{σ}	m_{κ}	$P_{max} \cdot 10^2, (Вт)$	$I_p, (A)$	$M \cdot 10^2 (Н \cdot м)$	$n, (с^{-1})$
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

Природно, що зі збільшенням геометричних розмірів двигуна та при використанні більш досконаlih термоелектричних і електротехнічних матеріалів його потужність та ККД будуть збільшуватися. Оскільки всі теплові машини, які працюють при таких же температурах нагрівача і холодильника мають однакові термодинамічні умови, – величина ККД не повинна бути єдиним критерієм при їх порівнянні.

Термоелектромеханічний конвертер можна використати в місцях, де потреба в енергії не може бути задоволена звичайними джерелами, а також у місцях, де необхідне аварійне резервування. Виконаний в мініатюрних розмірах конвертер можна застосувати для створення автономних лічильників теплової енергії [32].

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

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, 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 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 неізольовані 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 – напівпровідниковий термоелектромеханічний конвертер теплової енергії (ТЕМК), в якому процеси генерації, передачі і споживання термоелектричного струму інтегровані в одному пристрої.

2. ТЕМК призначений для перетворення низькопотенційної теплової енергії (декілька десятків градусів) в механічну (моторний режим).

3. Показано можливість роботи ТЕМК в термопідігрівному і термоохолоджуючому режимах.

4. Розраховано основні параметри ТЕМК: потужність, електромагнітний момент, частоту обертів, ККД і здійснено їх оптимізацію в режимах максимальної потужності і максимального ККД.

5. Показано, що потужність ТЕМК прямо пропорційна квадрату різниці температур між нагрівачем і холодильником і буде збільшуватися при збільшенні лінійних розмірів пристрою, покращенні характеристик матеріалів та зменшенні непродуктивних втрат електричної та теплової енергії.

6. ТЕМК є низькооборотним пристроєм. Частота обертання ротора складає всього $n=20-60$ об/хв.

7. Оскільки електромагнітний момент ТЕМК знаходиться в прямій залежності від магнітного потоку, а частота обертання ротора – в оберненій, то величина механічної потужності ТЕМК від величини магнітного потоку не залежить.

8. Використання запропонованої схеми збудження магнітного потоку дозволить підтримувати стабільну роботу ТЕМК в широкому діапазоні температур.

9. Для термостабілізації робочої температури «холодного» колектора ТЕМК може бути застосована система теплових трубок, з'єднаних з пасивним радіатором великої площі.

10. Коефіцієнт корисної дії ТЕМК складає кілька процентів в зв'язку з тим, що на його роботу накладені термодинамічні обмеження циклу Карно. Однак, такі обмеження характерні для всіх теплових машин, які працюють при малому

перепаді температури між нагрівачем і холодильником, і не повинно служити єдиним критерієм при оцінці їх роботи.

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-vetrovye-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. Закордонцев, 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. Закордонєць, 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. Закордонєць В. Стабілізація теплового режиму світлодіодних систем термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонєць, 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. Закордонєць В. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонєць, 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. Закордонєць В.С. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби / В. С. Закордонєць, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №4, 2018. — С. 60–67.
38. Закордонєць В.С. Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіодів / В. С. Закордонєць, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №5, 2018. — С. 45–54.
39. Закордонєць В.С. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонєць, 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 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