

## ДОВІДНИК ІЗ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ

Термоелектричні ефекти

Термоелектричні охолоджувачі

Що таке термоелектричний охолоджувач?

Принцип роботи термоелектричного охолоджувача

Однокаскадний модуль охолодження

Багатокаскадний модуль охолодження

Характеристики термоелектричного охолоджувача

Режими роботи модуля охолодження

Математичний опис термоелектричного охолоджувача

Термоелектричні генератори

Що таке термоелектричний генератор?

Принцип роботи термоелектричного генератора

Генераторний модуль

Характеристики термоелектричного генератора

Режими роботи термоелектричного генератора

Математичний опис термоелектричного генератора

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЕФЕКТИ

Найбільшого практичного застосування набули два термоелектричні ефекти: ефект Пельтьє та ефект Зеєбека.

Ефект Зеєбека (відкритий у 1822 р.)

В електричному колі, що складається з двох різних провідників, контакти яких перебувають за різних температур  $T_h$  і  $T_c$ , виникає електрорушійна сила, так звана термоЕРС

$U = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_h - T_c)$ ; де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - коефіцієнти термоЕРС або, як їх називають, коефіцієнти Зеєбека матеріалів провідників.

Найбільше значення термоЕРС спостерігається в ланцюзі, що складається з напівпровідникових матеріалів n- і p-типу провідності.

Ефект Зеєбека знайшов застосування в термоелектричних генераторах і детекторах.

Ефект Пельтьє (відкритий у 1834 р.)

За умови проходження електричного струму  $I$  через контакт двох різних провідників у місці контакту залежно від напрямку струму виділяється або поглинається тепло.

Потужність охолодження (нагрівання)  $Q = \Pi \cdot I$ , де  $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T$  - коефіцієнт Пельтьє.

Найбільше значення коефіцієнта Пельтьє спостерігається в електричному колі, що складається з напівпровідникових матеріалів n- і p-типу провідності.

Ефект Пельтьє знайшов застосування в термоелектричних охолоджувачах і нагрівачах.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ

Що таке термоелектричний охолоджувач?

Термоелектричний охолоджувач - це твердотільний тепловий насос, робота якого заснована на ефекті Пельтьє. Такий охолоджувач не має рухомих частин, тому є дуже надійним пристроєм.

Термоелектричний охолоджувач складається з одного або декількох термоелектричних модулів і тепловідводу.

Стандартний термоелектричний модуль складається з напівпровідникових термопар, що з'єднані послідовно електрично та паралельно термічно, розташовані між двома керамічними пластинами та утворюють нерозбірну конструкцію. Термоелектричний модуль є основним компонентом термоелектричного приладобудування.

Модулі різних конструкцій і з різними характеристиками виробляються промислово для створення термоелектричних пристроїв.

## ПРИНЦИП РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА

Рисунок 1 ілюструє роботу термоелектричного модуля в режимі охолодження.



Коли позитивний вивід джерела постійного струму під'єднують до елемента n-типу в термопарі, електрони переходять з низького енергетичного рівня в елементі p-типу на високий енергетичний рівень в елементі n-типу. У результаті на контакті поглинається тепло Пельтьє і цей контакт (спай) охолоджується. Це

тепло пропорційне струму і числу термопар. Потім тепло переноситься по елементах термопари до протилежного спаю і виділяється на контакті, оскільки електрони повертаються на низький енергетичний рівень в елемент р-типу. Цей спай нагрівається. Зміна напрямку струму змінює напрямок потоку тепла. Регулювання напрямку і значення струму з використанням температурного контролера дає змогу термоелектричному модулю охолоджувати, нагрівати або стабілізувати температуру.

Крім поглинання і виділення тепла Пельтьє на спаях термопар відбувається виділення тепла Джоуля в об'ємі гілок термопар. Приблизно половина тепла Джоуля надходить на холодний спай, а половина на гарячий. Оскільки тепло Пельтьє, що поглинається на холодному спаї, пропорційне до струму, а тепло Джоуля, що надходить, пропорційне квадрату величини струму, то існує певне значення струму, перевищення якого буде зменшувати охолодження. Значення струму, яке реалізує найбільше охолодження  $\Delta T_{max}$ , позначають  $I_{max}$ .

Практично охолодження не може бути реалізовано без ефективного відведення тепла від гарячої поверхні. Для відведення тепла від гарячої поверхні модуля в навколишнє середовище використовують тепловідведення (повітряні або рідинні теплообмінники). Тепловідведення характеризується тепловим опором  $R_{th}$ . Величина  $R_{th}$  дорівнює величині перевищення температури тепловідведення над температурою довкілля під час розсіювання потоку тепла 1Вт.

## ОДНОКАСКАДНИЙ МОДУЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ

Однокаскадний термоелектричний модуль охолодження складається з низки термопар, з'єднаних послідовно електрично і паралельно термічно. Кожна термопара складається з послідовно з'єднаних напівпровідникових елементів р- і n-типу провідності. Як матеріали для елементів використовують зазвичай напівпровідникові матеріали на основі  $Bi_2Te_3$ , які мають найбільшу ефективність. Максимальний перепад температури однокаскадного стандартного модуля за температури гарячої поверхні  $25^\circ C$  становить  $68-74^\circ C$ . Підвищення температури гарячої сторони призводить до зростання  $\Delta T_{max}$ .

Стандартний модуль може містити одну або більше кількості термопар, розташованих між двома керамічними пластинами. Ці пластини утворюють гарячу та холодну поверхні модуля та забезпечують цілісність конструкції. Завдяки тому, що пластини є хорошим електричним ізолятором і провідником тепла, вони виконують роль поверхні охолодження і тепловідведення.

Контактні поверхні керамічних пластин мають бути з високою точністю паралельні одна одній і мати низьку шорсткість. Це суттєво зменшує контактний тепловий опір змонтованого модуля. Контактні поверхні пластин можуть містити багатощарове металеве покриття, необхідне для монтажу модуля методом пайки.

Електричні виводи модуля розташовані на гарячій стороні і мають таку довжину, яка дає змогу проводити комутацію методом пайки, не завдаючи шкоди модулю. Позитивний вивід дроту має червоний колір.

Максимальна робоча температура модуля обмежена і становить зазвичай 120-150°C. Високотемпературні модулі можуть допускати роботу за максимальної температури 200°C.

З метою підвищення ресурсу роботи модуля формуються спеціальні високонадійні контакти елементів термопар. Такі модулі витримують велику кількість глибоких термоциклів і мають тривалий ресурс роботи без зниження  $\Delta T_{max}$ . Вартість такого модуля вища, ніж у звичайного, і його може бути виготовлено на замовлення.

Модуль може виготовлятися герметичним, у ньому термопари захищені герметиком. Це захищає термопари від впливу вологи і знижує втрати тепла.

За геометричною конфігурацією стандартні модулі можуть бути прямокутні та круглі. В оптиці можуть застосовуватися модулі з круглим отвором.

## БАГАТОКАСКАДНИЙ МОДУЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ

Багатокаскадний термоелектричний модуль охолодження утворюється кількома однокаскадними модулями, встановленими вертикально один над одним термічно паралельно. У такому модулі відбувається охолодження верхніх каскадів нижніми. Модулі каскадів підбирають так, щоб нижній модуль поглинав усе тепло, що виділяється верхнім каскадом.

Багатокаскадні модулі мають дві основні переваги:

1. Для заданого перепаду температури багатокаскадний модуль має більшу ефективність, ніж однокаскадний. Ефективність істотно зростає при переході від одно- до двокаскадного модуля. Застосування трьохкаскадного модуля дає вже набагато менший ефект і практично вичерпує можливість подальшого істотного підвищення ефективності.

2. За допомогою багатокаскадного модуля досягається більший перепад температури  $\Delta T_{max}$ , оскільки нижній каскад знижує температурний рівень верхнього каскаду.

$\Delta T_{max}$  визначається числом каскадів і ефективністю термоелектричних матеріалів, які застосовуються. За необхідності глибокого охолодження кількість каскадів може бути 5-7. На семикаскадному модулі за температури гарячої сторони 27°C досягнуто  $\Delta T_{max}=150^\circ\text{C}$ .

Значення холодопродуктивності багатокаскадного модуля становить від декількох часток Вата до 50Вт. Зазвичай для збільшення холодопродуктивності з'єднують кілька модулів.

За функціональним призначенням багатокаскадні модулі можуть бути стандартними, високотемпературними і з підвищеним ресурсом роботи.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА

Температура холодної сторони,  $T_c$ , °C.

Температура гарячої сторони,  $T_h$ , °C.

Перепад температури на модулі,  $\Delta T = T_h - T_c$ , °C.

Максимальні та робочі характеристики модуля визначаються для заданого значення  $T_h$ .

Максимальні характеристики

Максимальний струм,  $I_{max}$ , A; струм, який реалізує максимальне охолодження.

Максимальна напруга,  $U_{max}$ , В; електрична напруга на модулі за струму  $I_{max}$  і відсутності теплового навантаження на холодній стороні модуля ( $Q_c = 0$ ).

Максимальний перепад температури,  $\Delta T_{max}$ , °C; перепад температури на модулі за струму  $I_{max}$  і відсутності теплового навантаження на холодній стороні модуля ( $Q_c = 0$ ).

Максимальна холодопродуктивність,  $Q_{max}$ , Вт; потужність теплового потоку на холодній стороні модуля за струму  $I_{max}$  і відсутності перепаду температури на модулі ( $\Delta T = 0$ ).

Робочі характеристики

Робочий струм,  $I$ , A; струм через модуль, який реалізує необхідне охолодження.

Робоча напруга,  $U$ , В; напруга на модулі за робочого струму.

Електрична потужність,  $P$ , Вт; електрична потужність модуля визначається за формулою  $P = I \cdot U$ .

Холодопродуктивність,  $Q_c$ , Вт; потужність теплового потоку на холодній стороні модуля, за якої в режимі робочого струму реалізується необхідний перепад температури.

Тепловий потік на гарячій стороні,  $Q_h$ , Вт визначається за формулою  $Q_h = Q_c + P$ .

Холодильний коефіцієнт, COP; ефективність модуля, яка визначається за формулою  $COP = Q_c / P$

Геометричні розміри модуля.

A, B - розміри холодної поверхні модуля охолодження, мм;

C, E - розміри гарячої поверхні модуля охолодження  
(з електричними виводами), мм;

H - товщина модуля, мм.

## РЕЖИМИ РОБОТИ МОДУЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ

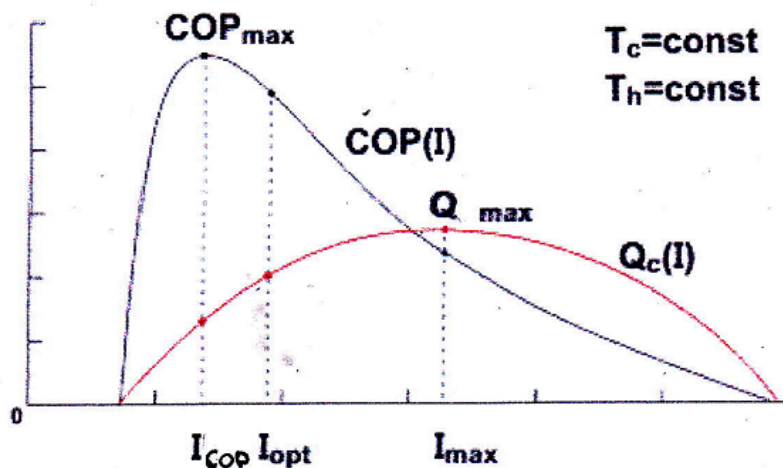
Існує три основні режими роботи термоелектричного модуля охолодження:

режим максимального перепаду температури -  $\Delta T_{max}$ ;

режим максимальної холодопродуктивності -  $Q_{max}$ ;

режим максимальної ефективності (максимального холодильного коефіцієнта) -  $COP_{max}$ .

На Рисунку 2 схематично показано співвідношення між режимами роботи модуля охолодження.



Перепад температури, що виникає в модулі, визначається не тільки процесами всередині термопари, а й величиною теплового навантаження на холодній поверхні модуля. Чим менший потік тепла надходить з навколишнього середовища на холодну поверхню, тим сильніше вдається знизити її температуру.

Максимальний перепад температури  $\Delta T_{max}$  досягається в умовах термічної ізоляції холодної сторони  $Q_c=0$  за значення струму  $I_{max}$ .

Максимальна холодопродуктивність  $Q_{max}$  досягається за умови  $\Delta T=0$ , оскільки в цьому разі відсутній потік тепла між гарячою і холодною стороною. Значення максимальної холодопродуктивності визначають за величини струму  $I_{max}$ .

Режим  $Q_{max}$  знаходить застосування в тому випадку, коли потрібно досягти низької вартості пристрою і швидкого охолодження, а вимоги до економічності не є високими.

Максимальне значення холодильного коефіцієнта  $COP_{max}$  досягається за струму  $I_{COP} < I_{max}$ . Холодопродуктивність  $Q_c$  у режимі  $COP_{max}$  помітно менша. Ця відмінність зростає зі збільшенням перепаду температури. У режимі  $COP_{max}$  потрібна більша кількість термопар (модулів) для реалізації заданого значення  $Q_c$ , ніж у режимі  $Q_{max}$ . У режимі  $COP_{max}$  низька споживана потужність, але висока вартість пристрою. Перевага цього режиму в тому, що відомі нині термоелектричні матеріали не забезпечують настільки високого значення COP, щоб можна було дозволити його зниження для зменшення вартості пристрою.

Практичний інтерес становить проміжний оптимальний режим COP-10%. Зменшення струму від  $I_{COP}$  до  $I_{opt}$  знижує холодильний коефіцієнт не більше ніж на 10%. При цьому холодопродуктивність порівняно з режимом  $COP_{max}$  помітно вища, а значить вартість пристрою менша.

Формули, які описують прилад: термоелектричний охолоджувач.

Максимальний перепад температури,  $\Delta T_{\max}$

$$\Delta T_{\max} = \frac{Z_d T_c^2}{2}$$

Максимальний струм,  $I_{\max}$

$$I_{\max} = \frac{\alpha T_c}{R}$$

Напруга,  $U$

$$U = IR + \alpha(T_h - T_c)$$

$$U_{\max} = I_{\max} R + \alpha \Delta T_{\max}$$

Холодопродуктивність,  $Q_c$

$$Q_c = \alpha T_c I - 0.5 I^2 R - L(T_h - T_c)$$

$$Q_{\max} = \alpha T_c I_{\max} - 0.5 I_{\max}^2 R$$

Холодильний коефіцієнт, COP

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{UI}$$

$$\text{COP}_{\max} = \frac{MT_c - T_h}{(T_h - T_c)(M + 1)}$$

Електричний опір приладу,  $R$

$$R = \left( r_p + r_n + 4 \frac{r_k}{l} \right) \frac{N}{G}$$

Теплопровідність приладу,  $L$

$$L = (k_p + k_n)GN$$

Напруга Зеебека приладу,  $\alpha$

$$\alpha = (\alpha_p - \alpha_n)N$$

Термоелектрична добротність приладу,  $Z_d$

$$Z_d = \frac{\alpha^2}{RL}$$

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР (ТЕГ)

Що таке термоелектричний генератор?

Термоелектричний генератор - це твердотільний перетворювач теплової енергії в електричну, робота якого базується на ефекті Зеебека. Такий генератор не має рухомих частин, тому є дуже надійним пристроєм.

Конструкція термоелектричного генератора включає джерело тепла (колектор теплового потоку), один або кілька термоелектричних модулів і тепловідведення.

Стандартний термоелектричний модуль складається з батареї напівпровідникових термопар, які з'єднані послідовно електрично та паралельно термічно, розташовані між двома керамічними пластинами й утворюють нерозбірну конструкцію. Термоелектричний модуль є основним компонентом термоелектричного приладобудування.

## ПРИНЦИП РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

У термоелектричному генераторі використовується термоелектричний ефект, відкритий Зеебеком. Принцип роботи ґрунтується на фізичному явищі виникнення різниці електричних потенціалів в електричному колі, утвореному двома різними провідниками, якщо один контакт підтримують за вищої температури, ніж інший.

Рисунок 3 ілюструє роботу термоелектричного генератора.



Причиною виникнення ефекту Зеебека є залежність енергії носіїв заряду від температури. Вища температура призводить до зростання енергії носіїв заряду і спричиняє їхню дифузійну рух в напрямку зменшення температури. Дірки, або позитивні носії заряду, рухаються в елементі р-типу в бік тепловідведення та забезпечують позитивний заряд у зоні контакту на холодній стороні.

Аналогічно, потік електронів в елементі n-типу забезпечує негативний заряд на холодній стороні в елементі n-типу. Перерозподіл носіїв заряду в елементах призводить до появи електричного поля, яке компенсує дифузійний потік носіїв заряду. У замкнутому колі буде протікати електричний струм.

Електрична потужність, що генерується в ТЕГ, є наслідком перетворення теплової енергії потоку носіїв заряду в електричну. Практично генерація



електроенергії не може відбуватися без ефективного відведення тепла. Для відведення тепла від гарячої поверхні модуля в навколишнє середовище використовують тепловідведення (радіатор, повітряний або рідинний теплообмінники).

Тепловідведення ТЕГ характеризується тепловим опором  $R_{tc}$ . Величина  $R_{tc}$  дорівнює величині перевищення температури тепловідведення над температурою довкілля під час розсіювання потоку тепла 1Вт.

## ГЕНЕРАТОРНИЙ МОДУЛЬ

Стандартні модулі охолодження використовуються в режимі генерації та знаходять застосування для перетворення низькопотенційного тепла. Зазвичай у стандартних модулях охолодження використовують термоелектричні матеріали на основі  $Bi_2Te_3$ , які мають максимальну добротність за температури близької до  $25^{\circ}C$ . ККД стандартного модуля за температури гарячої поверхні  $150^{\circ}C$  і холодної поверхні  $25^{\circ}C$  становить 4.1-5.1%. Граничний ККД модуля для цього інтервалу температури становить 5.5%. Зростання перепаду температури призводить до зростання ККД.

Для збільшення ККД генераторного модуля необхідно застосовувати термоелектричні матеріали, у яких максимум добротності знаходиться всередині робочого діапазону температур. Тому високотемпературний модуль охолодження можна застосовувати як ТЕГ із більшою ефективністю.

Однокаскадний термоелектричний модуль складається з одного ряду термопар, з'єднаних послідовно електрично і паралельно термічно. Кожна термопара складається з послідовно з'єднаних напівпровідникових елементів p- і n-типу. Як матеріал елементів використовують зазвичай напівпровідникові матеріали на основі  $Bi_2Te_3$ , які мають найбільшу термоелектричну добротність.

Стандартний модуль може містити одну або більше термопар, розташованих між двома керамічними пластинами. Ці пластини утворюють гарячу та холодну сторони модуля та забезпечують цілісність конструкції. Завдяки тому, що пластини є хорошим електричним ізолятором і провідником тепла, вони виконують роль поверхні охолодження і тепловідведення.

Контактні поверхні керамічних пластин мають бути з високою точністю паралельні одна одній і мати низьку шорсткість. Це суттєво зменшує контактний тепловий опір змонтованого модуля. Контактні поверхні пластин можуть містити багатощарове металеве покриття, необхідне для монтажу модуля методом пайки.

Електричні виводи модуля розташовані на холодній стороні модуля і мають таку довжину, яка дає змогу проводити комутацію методом пайки, не

завдаючи шкоди модулю. Позитивний вивід дроту має червоний колір.

Максимальна робоча температура модуля обмежена і становить зазвичай  $150^{\circ}\text{C}$ . Високотемпературні модулі можуть допускати роботу за максимальної температури  $200^{\circ}\text{C}$ .

З метою підвищення ресурсу роботи модуля формуються спеціальні високонадійні контакти на елементах термопар. Такі модулі витримують велику кількість глибоких термоциклів і мають тривалий ресурс роботи. Вартість такого модуля вища, ніж у звичайного, і його може бути виготовлено на замовлення.

Модуль може виготовлятися герметичним, у ньому термопари захищені герметиком. Це захищає їх від впливу вологи і знижує втрати тепла.

Для створення ТЕГ застосовуються модулі прямокутної та круглої форми.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

Температура гарячої сторони,  $T_h$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температура холодної сторони,  $T_c$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Перепад температури на модулі,  $\Delta T = T_h - T_c$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Максимальні та робочі характеристики модуля в режимі генерації визначаються для заданих значень  $T_h$  і  $T_c$ .

Максимальні характеристики

Максимальна електрична потужність,  $P_{g.\max}$ ,  $\text{W}$ ;

максимальна електрична потужність на опорі навантаження.

Струм максимальної потужності,  $I_{g.\max}$ ,  $\text{A}$ ;

електричний струм, що реалізує максимальну потужність

Напруга максимальної потужності,  $U_{g.\max}$ ,  $\text{V}$ ;

електрична напруга, що реалізує максимальну потужність

Електричний опір максимальної потужності,  $R_{\max}$ ,  $\text{Om}$

опір навантаження, на якому досягається максимальна електрична потужність.

Максимальна ефективність (коефіцієнт корисної дії),  $\eta_{\max}$ ;

максимальна ефективність перетворення теплової енергії в електричну.

Струм максимальної ефективності,  $I_e$ ,  $\text{A}$ ;

електричний струм, що реалізує максимальну ефективність.

Напруга максимальної ефективності,  $U_e$ ,  $\text{V}$ ;

електрична напруга, що реалізує максимальну ефективність

Електричний опір максимальної ефективності,  $R_e$ ,  $\text{Om}$

опір навантаження, за якого досягається максимальна ефективність.

Електрорушійна сила (ЕРС),  $E_0$ ,  $\text{V}$ ;

електрорушійна сила модуля в розімкнутому ланцюзі ( $I=0$ ).

Струм короткого замикання,  $I_0$ ,  $\text{A}$ ;

струм в електричному колі модуля за величини опору навантаження, що дорівнює нулю.

## Робочі характеристики

Електричний струм,  $I_g$ , А;

необхідний електричний струм на опорі навантаження

Електрична напруга,  $U_g$ , В;

необхідна електрична напруга на опорі навантаження

Електрична потужність,  $P_g$ , Вт;

необхідна електрична потужність на опорі навантаження; визначається за формулою  $P_g = I_g \cdot U_g$ .

Електричний опір навантаження,  $R_{load}$ , Ом

опір навантаження, на якому досягається необхідна електрична потужність.

Потужність теплового потоку на гарячій стороні,  $Q_{gh}$ , Вт;

потужність теплового потоку, який надходить на гарячу поверхню модуля від джерела тепла.

Потужність теплового потоку на холодній стороні,  $Q_{gc}$ , Вт;

потужність теплового потоку на холодній стороні модуля, який розсіюється тепловідведенням; визначається за формулою  $Q_c = Q_{gh} - P_g$

Ефективність (коефіцієнт корисної дії),  $\eta$ ;

ефективність перетворення теплової енергії в електричну; визначається за формулою  $\eta = P_g / Q_{gh}$ .

Геометричні розміри модуля.

А, В - розміри гарячої поверхні генераторного модуля, мм;

С, D - розміри холодної поверхні генераторного модуля  
(з електричними виводами), мм;

Е - товщина модуля, мм.

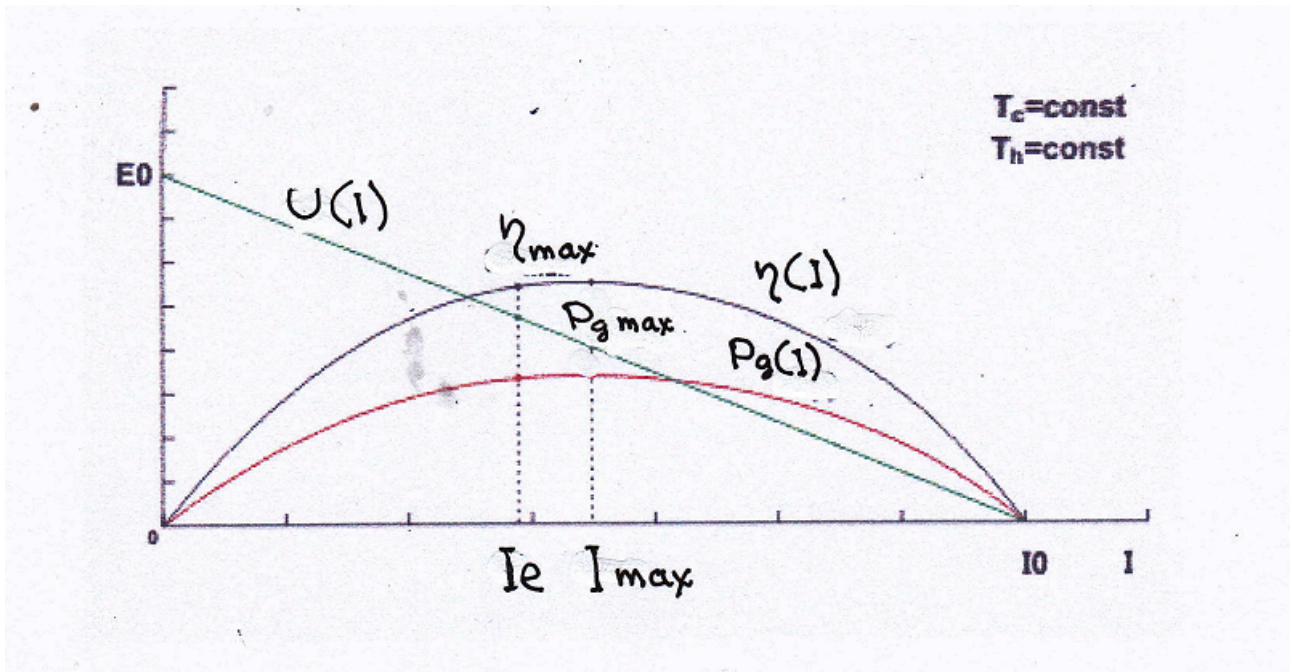
## РЕЖИМИ РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

Існує два режими роботи термоелектричного генератора: режим максимальної потужності та режим максимальної ефективності (максимального ККД).

Електрична потужність досягає максимуму, коли опір навантаження  $R_{load}$  дорівнює опору генератора  $R$  в робочому інтервалі температур ( $R_{load} = R$ ).

Значення максимальної ефективності досягається для опору навантаження  $R_{load} \leq 1.35 \cdot R$  і залежить від добротності модуля  $Z_d$ .

На Рисунку 4 схематично показано співвідношення між режимами роботи термоелектричного генератора.



Формули, які описують прилад: термоелектричний генератор

Потужність

$$P_g = \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2}{R} \frac{m}{(m+1)^2}$$

Струм на навантаженні

$$I_g = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{(m+1)R}$$

Напруга на навантаженні

$$U_g = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{(m+1)}$$

Електрорушійна сила розімкненого кола

$$E_0 = \alpha(T_h - T_c)$$

Ефективність (коефіцієнт корисної дії, ККД)

$$\eta = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} \frac{\frac{m}{(m+1)}}{1 + \frac{m+1}{Z_d T_h} - 0.5 \frac{(T_h - T_c)}{T_h} \frac{1}{(m+1)}}$$

Навантажувальний коефіцієнт

$$m = \frac{R_{load}}{R}$$

Робочі умови

Максимальна потужність  $P_g \max = P_g (m=1)$

Максимальний ККД  $\eta \max = \eta (m=M)$

$$R = (r_p + r_n + 4 \frac{r_k}{l}) \frac{N}{G}$$

Електричний опір приладу

Теплопровідність приладу, L

$$L = (k_p + k_n)GN$$

Напруга Зеебека приладу,  $\alpha$

$$\alpha = (\alpha_p - \alpha_n)N$$

Термоелектрична добротність приладу,  $Z_d$

$$Z_d = \frac{\alpha^2}{RL}$$

### Позначення

Th - hot side temperature, K;

температура гарячої поверхні, К.

Tc - cold side temperature, K;

температура холодної поверхні, К.

G=s/l; s - area of thermoelectric element;

Площа поперечного перерізу термоелектричного елемента;

l - length of thermoelectric element;

довжина термоелектричного елемента

N - number of thermoelectric couple;

кількість термопар;

$$M = (1 + 0.5 \cdot Z_d \cdot (T_h + T_c))^{0.5}$$

$\alpha_p, \alpha_n$  – mean Seebeck coefficient of p-, n-type thermoelectric material,  $\mu V/K$ .

середнє значення коефіцієнта Зеебека для p-, n-типу термоелектричного матеріалу, мкВ/К;

$r_p, r_n$  – mean resistivity of p-, n-type thermoelectric material,  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

середнє значення питомого опору для p-, n-типу термоелектричного матеріалу, Ом · см;

$k_p, k_n$  - mean thermal conductivity of p-, n-type thermoelectric material,  $W/(cm \cdot K)$ ;

середнє значення питомої теплопровідності для p-, n-типу термоелектричного матеріалу, Вт/(см · К);

$r_k$  – контактний опір, Ом · см<sup>2</sup>.