

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta



Termoelektrický jev a jeho využití

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Vladmír Ryženko, Ph.D.

Autor: Monika Vinarčíková

Praha 2019

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá termoelektrickým javom, ako prostriedkom k meraniu teploty či získaniu elektrickej energie. Popisuje jeho históriu, princíp vzniku a zvlášť sa venuje trom najvýznamnejším termoelektrickým javom. Na základe využitia sú v práci termoelektrické články rozdelené do dvoch hlavných skupín. Typy termočlánkov sú jednotlivo popísané z hľadiska ich využitia, materiálov a výhod a nevýhod používania. V závere práca uvádza výskum využitia termoelektrického generátora v praxi a jeho ekonomickú účelnosť.

Kľúčové slová

Termoelektrický jav, Seebeckov jav, Peltierov jav, Thomsonov jav, termočlánok

Abstract

The bachelor thesis deals with the thermoelectric effect as a mean of measuring the temperature or obtaining electrical energy. It describes its history, the principle of origin and especially it is dedicated to the three most important thermoelectric effects. Based on their use, thermoelectric articles are divided into two main groups. The types of thermocouples are individually described in terms of their application, materials and advantages and disadvantages of the use. At the end of the thesis, the research of the application of a thermoelectric generator in practice and its economic impact is presented.

Keywords

Thermoelectric effect, Seebeck effect, Peltier effect, Thomson effect, thermocouple

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracovala samostatne, s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname citovanej literatúry.

V Prahe dňa:

Podpis:

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rada pod'akovala vedúcemu bakalárskej práce Vladimírovi Ryženko, Ph.D. za ochotu, odbornú pomoc, usmernenie a cenné rady pri vypracovaní tejto práce.

Obsah

1	Úvod	1
2	História termoelektrických javov	2
3	Princíp termoelektrických javov	4
3.1	Vodivosť typu N.....	4
3.2	Vodivosť typu P	5
3.3	Vznik termoelektrického napätia.....	5
4	Seebeckov jav	6
5	Peltierov jav	7
6	Thomsonov jav	9
7	Rozdelenie termoelektrických článkov.....	10
7.1	Termoelektrické snímače teploty	11
7.1.1	Výhody a nevýhody termoelektrických snímačov	11
7.1.2	Zapojenie termočlánku do obvodu	12
7.1.3	Využitie termoelektrických snímačov	12
7.1.4	Materiály termoelektrických snímačov	13
7.1.5	Typy termoelektrických snímačov	13
8	Termočlánky pre premenu energie	15
8.1	Účinnosť premeny energie TE	15
8.2	Termoelektrický modul	16
8.3	Termoelektrické články TEC (TEH).....	16
8.3.1	Výhody a nevýhody modulov TEC.....	17
8.3.2	Materiály pre výrobu modulov TEC	18
8.3.3	Využitie modulov TEC.....	19
8.4	Termoelektrické generátory TEG.....	22
8.4.1	Výhody a nevýhody generátorov TEG.....	23
8.4.2	Materiály pre výrobu termoelektrických generátorov	23
8.4.3	Využitie termoelektrických generátorov	25
9	Ekonomický vplyv a účinnosť kombinovanej plynovej turbíny s termoelektrickým generátorom 32	
9.1	Inžiniersko-ekonomická analýza	32
9.2	Návrh termoelektrického generátora	33
9.3	Ekonomické vyhodnotenie	33
10	Záver.....	35
11	Zoznam použitých zdrojov	36
12	Zoznam obrázkov	39

1 Úvod

Termoelektrické javy umožňujú priamu premenu tepla na elektrickú energiu alebo naopak, elektrickej energie na tepelnú. Pretože javy prebiehajú v pevných látkach a „pracovnou tekutinou“ sú nosiče elektrického náboja, termoelektrické zariadenia sú typické jednoduchosťou a prevádzkou bez chemických látok alebo pohyblivých častí. Pokiaľ sú prevádzkované správne, potom aj spoľahlivosťou a dlhou životnosťou. Vzhľadom k nízkej účinnosti termoelektrickej premeny pri výrobe elektrickej energie sú možnosti využitia obmedzené. V súvislosti so vzrastajúcimi cenami palív a záujmom o technológie šetrné k životnému prostrediu sa objavuje snaha využívať termoelektrinu pre produkciu elektrickej energie z odpadového tepla. Vo svete si tento trend môžeme všimnúť od konca osemdesiatych rokov.

Perspektívy praktického využitia termoelektrických javov ponúkajú ľuďstvu možnosti riešenia hneď niekoľkých súčasných problémov. Pre ich masovejšie využitie je však treba nájsť a pripraviť nové typy materiálov majúce výrazne lepšie termoelektrické vlastnosti než majú tie doposiaľ študované. Ak by boli nájdené, bolo by možné napr. konštruovať prakticky bezhlučné chladiace zariadenia, pracujúce bez akýchkoľvek chladiacich médií, s veľmi presnou možnosťou regulácie vďaka termoelektrickým chladičom. Účinnnejšie termoelektrické generátory by zasa umožnili efektívnejšie využitie obrovského množstva dnes produkovaného odpadového tepla a jeho spätnú konverziu na elektrinu.

2 Cieľ práce

Hlavným cieľom bakalárskej práce je popísať základné termoelektrické javy, rozdelenie termočlánkov podľa ich využitia, samotné využitie a materiály pre ich zhotovenie. Ďalším cieľom je zhodnotiť výhody a nevýhody ich používania. Na záver práca uvádza konkrétny výskum zavedenia termoelektrického generátora do plynovej turbíny a hodnotí jeho vplyv na účelnosť.

3 Metodika práce

Práca je vypracovaná na základe štúdia dostupných materiálov podľa predloženej osnovy. Jedná sa o rešeršnú prácu bez vlastných experimentov.

4 História termoelektrických javov

Termoelektrický jav objavil ako prvý v roku 1758 ruský vedec Epinus. Zistil, že ak v obvode zloženom z dvoch rôznych vodičov majú spoje vodičov rôznu teplotu, vzniká napätie. Veľkosť tohto tzv. termoelektrického napätia je okrem druhu použitých vodičov predovšetkým funkciou rozdielu teplôt oboch spojov. [1]

Až o mnoho rokov neskôr, v roku 1821 popísal nemecký fyzik Thomas Johann Seebeck v časopise *Abhandlungen der koniglichen Akademie der Wissenschaften* jav, ktorý nazval magnetickou polarizáciou kovov a rúd, vyvolanou teplotným rozdielom. Z popisu pokusov, ktoré vykonal je jasné, že ide o termoelektrické napätie vznikajúce v elektrickom obvode zloženom z rôznych vodičov, ktorých spoje majú určitý teplotný rozdiel. Seebeck konal pokusy v dobe búrlivého rozvoja prírodných vied, kedy boli napríklad objasňované a vysvetľované vzájomné závislosti elektrického prúdu a magnetického poľa. Tým sa dá vysvetliť Seebeckovu snahu vyjadriť vznik tohoto termoelektrického napätia účinkami magnetického poľa. [1]

Asi 12 rokov po Seebeckovom objave uverejnil francúzsky hodinár J. Ch. Peltier v časopise *Annales de physique et chimie* článok o teplotných anomáliách, ktoré pozoroval v mieste styku dvoch rôznych kovov pri priechode elektrického prúdu. Táto „anomália“, neskôr označovaná ako Peltierov jav, spočíva v uvoľňovaní alebo pohlcovaní tepla v mieste styku dvoch rôznych vodičov, ak nimi preteká prúd. Vďaka rozdielu teplôt v uzavretom obvode zloženom z rôznych vodičov vzniká totiž termoelektrické napätie a elektrický prúd pretekajúci takým obvodom vyvoláva v miestach styku teplotné rozdiely podľa smeru toku prúdu. [1]

William Thomson, známy neskôr ako lord Kelvin, študoval oba uvedené javy na základe zákonov termodynamiky. Potvrdil ich vzájomnú súvislosť a naviac objavil ďalší jav, ktorý bol po ňom nazvaný Thomsonov jav. Zistil totiž, že keď prechádza jednosmerný prúd I homogénnym vodičom, v ktorom je teplotný spád (teplotný gradient), uvoľňuje alebo pohlcuje sa ešte ďalšie množstvo tepla Q_T , nazývané Thomsonove teplo. Už z toho je zrejmé, že Thomsonov a Peltierov jav sú javy navzájom neoddeliteľné. [2]

V rokoch 1920-1921 oznámil C. Benedicks objav ďalšieho termoelektrického javu, ktorý je kvantitatívne určovaný len veľkosťou teplotného gradientu vo vodiči. Ak existuje vo vodiči teplotný gradient, napriek tomu že teploty oboch koncov vodiča sú rovnaké, vznikne medzi koncami vodiča rozdiel potenciálov. Ten je veľmi malý a u kovov prakticky nemerateľný, preto existencia Benedicksovho javu nebola dlho experimentálne preukázaná. [2]

Všetky uvedené javy – Seebeckov, Peltierov, Thomsonov a Benedicksov označujeme súhrnným názvom javy termoelektrické. Ich podstata spočíva buď vo vzniku

elektromotorického napätia, vyvolaného rozdielom teplôt v obvode (Seebeckov a Benedicksov), alebo v uvoľňovaní či pohlcovaní tepla pri priechode jednosmerného prúdu obvodom (Peltierov a Thomsonov). [2]

V svojej dobe nevzbudili termoelektrické javy zvláštnu pozornosť fyzikov. Bola to totiž doba pokusov Michaela Faradaya a jeho objavu elektromagnetickej indukcie v roku 1831. Trvalo dlhú dobu, než sa s rozvojom termodynamiky obrátila pozornosť fyzikov a technikov na všetky druhy energetických premien, teda i na premenu energie elektrickej v tepelnú a naopak. Dnes zaujímajú termoelektrické javy vo vede i v technike pevné miesto. [2]

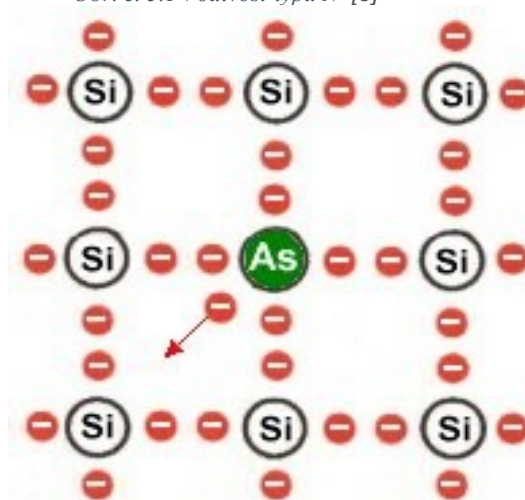
5 Princíp termoelektrických javov

Vznik termoelektrického napätia si môžeme vysvetliť teóriou, podľa ktorej sa polovodiče rozdeľujú na polovodiče typu n a p.

5.1 Vodivosť typu N

V kryštáli kremíka sú niektoré atómy nahradené päťmocnými atómami napríklad arzénu. Ich štyri valenčné elektróny sa zúčastňujú väzieb, ale piate sa už v chemických väzbách môžu uplatniť. Sú veľmi slabo viazané a už pri nízkych teplotách sa stanú voľnými elektrón kremíku s prímiesou päťmocného prvku sa hovorí donor. Je v ňom nadbytok voľných elektrónov, ktoré po pripojení ku zdroju spôsobia jeho elektrónovú vodivosť typu N (obr. č. 5.1). [3]

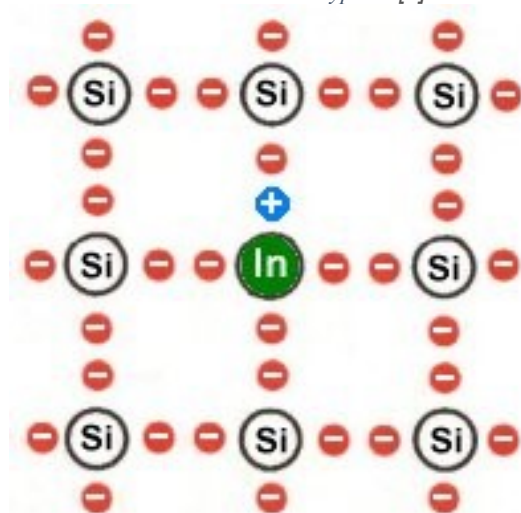
Obr. č. 5.1 Vodivosť typu N [3]



5.2 Vodivosť typu P

Keď sa zabudujú do kryštálovej mriežky atómy trojmocného prvku s tromi valenčnými elektrónmi, napr. india, chýbajú pre obsadenie všetkých chemických väzieb elektróny. V mieste nenasýtenej väzby vznikne "diera" s kladným nábojom. Túto "dieru" môže zaplniť elektrón z niektorej inej väzby a "diera" sa v kryštáli presunie na jeho miesto. Prímеси trojmocného prvku sa hovorí akceptor. Vytvára v kryštáli kremíku nadbytok kladných "dier", ktoré po pripojení ku zdroju spôsobujú jeho dierovú vodivosť typu P (obr. č. 5.2). [3]

Obr. č. 5.2 Vodivosť typu P [3]



5.3 Vznik termoelektrického napätia

Podľa tejto teórie obsahujú vodiče typu n väčšinou nosiče záporných elektrických nábojov- elektróny, kdežto vodiče typu p iba nosiče tzv. zdanlivo kladných nábojov. Vodiče typu n a p sa vzájomne líšia spôsobom premiestňovania elektrických nábojov vo vodiči, na ktorom je teplotný rozdiel. Predstavíme si napríklad polovodič typu n. Pri zahriatí uvoľňujú atómy kryštálovej mriežky časť elektrónov, ktoré nie sú pevne viazané. Uvoľnené elektróny putujú vodičom typu n smerom teplotného rozdielu k jeho chladnejšiemu koncu, ktorý nabíjajú záporne. Keďže veľkosť celkového náboja vo vodiči je stála, prejaví sa úbytok na teplejšom konci ako kladná polarita. Polovodič typu n je teda charakterizovaný tým, že pri výskyte teplotného rozdielu sa javí chladnejší koniec ako záporný. Polovodič typu p má pri rovnakom zmysle teplotného rozdielu polaritu obrátenú, t.j. chladnejší koniec sa javí kladný.

Pohyb elektrónov trvá kým ho nezabrdí elektrostatičné pole, ktoré sa vytvára medzi elektrónmi a ostávajúcimi pozitívnymi iónmi. V tomto okamžiku vyrovnaného stavu vzniká vplyvom potenciálneho rozdielu difúzia elektrónov opačným smerom., t.j. od studeného

konca k teplému – počet elektrónov sa rovná práve počtu elektrónov v obrátenom smere následkom teplotného rozdielu. Odtrhnuté elektróny, ktoré nesú záporný náboj sú voľne pohyblivé medzi iónmi kryštálovej mriežky a chovajú sa podobne ako molekuly plynu – zrážajú sa navzájom s iónmi mriežky. Na základe tejto podobnosti používame predstavy tzv. elektrónového plynu, ktorý vyplňa vnútro vodiča. Podobne ako kinetická energia molekúl skutočného plynu závisí na teplote, závisí aj energia tohto elektrónového plynu na teplote. Preto prinášajú elektróny, prichádzajúce z teplého konca k chladnému viac energie než v opačnom smere. Tým vzniká trvalý tok tepla z teplého konca vodiča k chladnému aj vtedy, keď sa dosiahne trvalý stav a stála veľkosť termoelektrického napätia.

Veľkosť termoelektrického napätia je daná druhom použitých materiálov a rozdielom teplôt spojov. Matematicky môžeme túto závislosť vyjadriť výrazom:

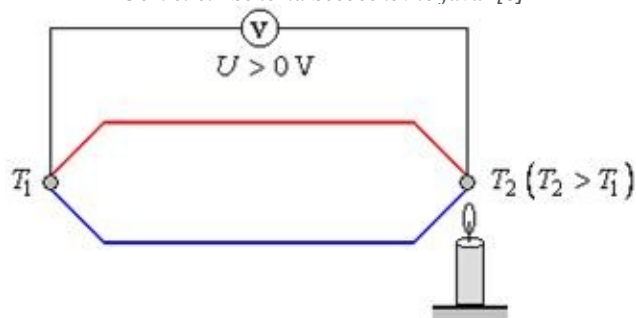
$$U = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (\vartheta_T - \vartheta_S) \text{ [mV]}$$

kde ϑ_S je teplota studeného spoja [°C], ϑ_T teplota teplého spoja [°C], α_A , α_B súčinitele určujúce veľkosť termoelektrického napätia, :ku tvorené vodičmi rovnakého typu (n alebo p), súčinitele α sa odčítajú, ak sú rozdielneho typu, sčítajú sa a termoelektrické napätie dosahuje za daných podmienok maximálnu veľkosť. [1]

6 Seebeckov jav

Keď majú dva spoje dvoch kovov, ktoré tvoria termočlánok rozdielnu teplotu, sú i kontaktné napätia oboch rozhraní rôzne. Preto výsledné napätie merané medzi týmito rozhraniami je nenulové a termočlánok sa dá využiť ako zdroj elektrického napätia. Obvodom prechádza elektrický prúd a nastáva tzv. Seebeckov jav (obr. č. 6.1).

Obr. č. 6.1 Schéma Seebeckovho javu [3]



V neuzavretom obvode sa dá medzi oboma spojmi dvoch kovov namerať termoelektrické napätie ΔU , ktoré je dané rozdielom kontaktných napätí vznikajúcich na oboch spojoch daných kovov. Preto platí:

$$\Delta U = U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1)$$

Indexy pri oboch kontaktných napätíach sú rovnaké - jedná sa o dve napätia, ktoré vznikajú na rozhraní rovnakých kovov. Fakt, že jedno kontaktné napätie je vyššie než druhé, je daný iba rozdielom teplôt oboch spojov.

Pre malé teplotné rozdiely teplôt T_1 a T_2 oboch spojov daných kovov platí približne lineárna závislosť termoelektrického napätia na teplote, tj. môžeme napísať:

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) = \alpha_{12}\Delta T$$

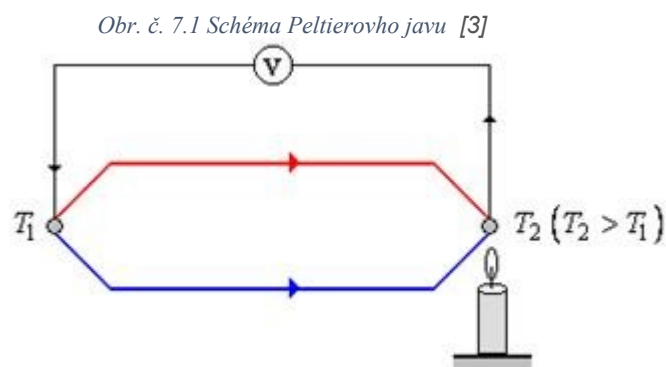
kde α_{12} je Seebeckov koeficient (tiež termoelektrický koeficient); $[\alpha_{12}] = \text{V.K}^{-1}$.

Seebeckov koeficient závisí vždy na danej dvojici kovov. Termoelektrické napätie závisí len na rozdieloch teplôt a na daných materiáloch - nezávisí na spôsobe vedenia tepla daným materiálom, ani na rýchlosti ohrevu materiálu.

Hodnota Seebeckovho koeficientu pre kovy je rádovo $(10^{-6}; 10^{-5}) \text{ V.K}^{-1}$, hodnota Seebeckovho koeficientu pre polovodiče je rádovo $(10^{-5}; 10^{-3}) \text{ V.K}^{-1}$. [4]

7 Peltierov jav

Peltierov jav je opačným k javu Seebeckovmu. Tento jav sa dá vysvetliť na obvode, na základe ktorého bol objavený Seebeckov jav, na ktorom sú vyznačené aj smery prúdov v jednotlivých častiach obvodu (obr. č. 7.1).



Kontaktné napätia spojov dvoch kovov sú kladné a s rastúcou teplotou rastú. Preto má „kladnejšie“ napätie spoj s vyššou teplotou. Smery elektrického prúdu sú teda na obr. 4 naznačené správne: zakresľuje sa dohodnutý smer, teda smer pohybu kladne nabitých častíc

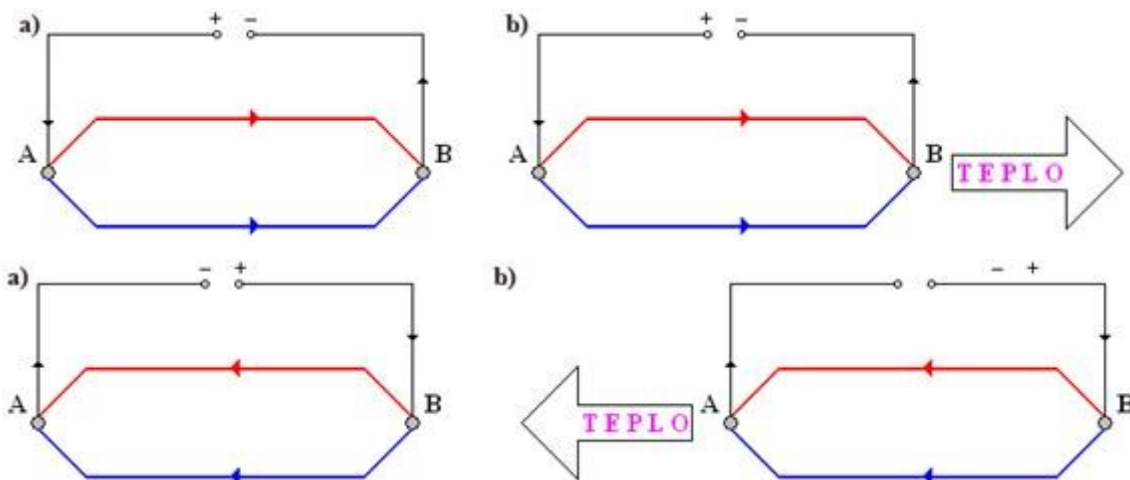
(od kladného pólu zdroja napätia k zápornému pólu). Vo vnútri zdroja (samotnými dvoma kovmi, ktoré tvoria termočlánok) tečie elektrický prúd opačne.

Keď teraz pripojíme takto vytvorený termočlánok k vonkajšiemu zdroju jednosmerného napätia, bez toho aby sme vytvorili rozdiel teplôt oboch rozhraní kovov, nastane tzv. Peltierov jav. Priechodom elektrického prúdu oboma kovmi (a teda aj ich spojmi) sa vytvorí teplotný rozdiel medzi oboma spojmi. V závislosti na polarite priloženého napätia sa bude jeden spoj ohrievať a druhý ochladzovať.

Keď bude elektrický prúd (z vonkajšieho zdroja napätia) prechádzať oboma kovmi rovnakým smerom, ako je smer elektrického prúdu pri Seebeckovom jave (obr. č. 7.1), bude sa spoj *A* ochladzovať a spoj *B* ohrievať (obr. č. 7.2). Keď bude elektrický prúd z vonkajšieho zdroja napätia prechádzať kovmi opačným smerom, než je smer elektrického prúdu pri Seebeckovom jave, bude sa spoj *A* ohrievať a spoj *B* ochladzovať (obr. č. 7.2).

Na obrázku č. 7.2 je v časti a) zobrazený stav po pripojení termočlánku do obvodu a v časti b) je naznačené, z ktorého spoja sa bude šíriť teplo.

Obr. č. 7.2 Pripojenie termočlánku do obvodu [4]

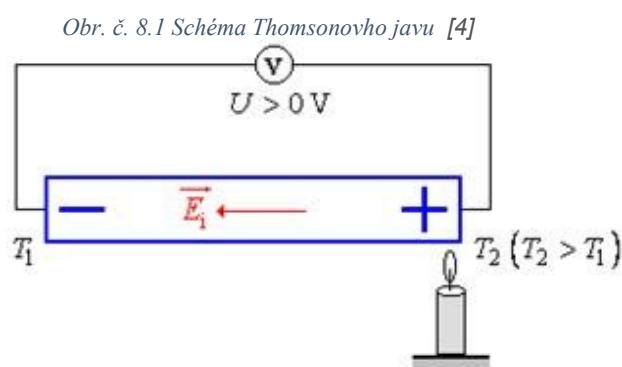


Priechodom elektrického prúdu sa v kovoch (resp. v polovodičoch) premiestňujú voľné nabité častice (v kovoch elektróny, v polovodičoch elektróny a diery). V dôsledku tohoto prenosu častíc sa zvyšuje nerovnováha elektrónov medzi oboma uvažovanými spojmi dvoch kovov (resp. polovodičov), čím rastie termoelektrické napätie termočlánku. Termoelektrické napätie je priamo úmerné rozdielu teplôt uvažovaných spojov - preto s rastúcim termoelektrickým napätím porastie aj rozdiel teplôt oboch spojov. Vyššiu teplotu bude mať ten spoj, ktorého kontaktné napätie (v dôsledku priechodu elektrického prúdu z vonkajšieho zdroja) bude vyššie. Z tohoto spoja sa bude teda šíriť teplo. [4]

8 Thomsonov jav

Keď zahrievame kovovú tyč dĺžky l na jednom konci, vytvorí sa v nej teplotný spád (teplotný gradient) $\frac{\Delta T}{\Delta l}$ a medzi koncami vodiča vznikne nepatrné termoelektrické napätie U (obr. č. 8.1). Tomuto napätiu odpovedá elektrostatické pole popísané vnútornou elektrickou intenzitou E_i .

Tento jav je teda podobný Seebeckovmu javu, rozdiel je v tom, že Thomsonov jav vzniká pri ohriatí iba jedného vodiča (pri Seebeckovom jave sú nutné vodiče dva). Aj preto je merané termoelektrické napätie u Thomsonovho javu veľmi malé. Vzhľadom k tomu nenašiel tento jav zatiaľ praktické uplatnenie.



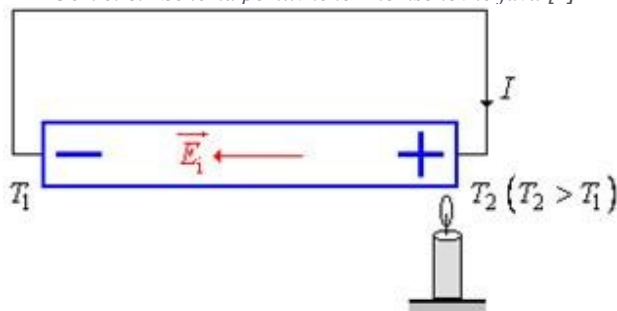
Ak prechádza vodičom s elektrickým odporom R elektrický prúd I , uvoľňuje sa do okolia teplo Q , ktoré je popísané vzťahom:

$$Q = RI^2 - \mu I \frac{\Delta T}{\Delta l},$$

kde μ je Thomsonov koeficient. Prvý člen vzťahu odpovedá Jaulovmu teplu, ktoré sa uvoľňuje do okolia vodiča, ak ním prechádza elektrický prúd. Druhý člen je Thomsonovo teplo, ktoré vzniká vďaka teplotnému gradientu vo vodiči. Znamienko Thomsonovho tepla sa mení v závislosti na smere elektrického prúdu, ktorý vodičom preteká.

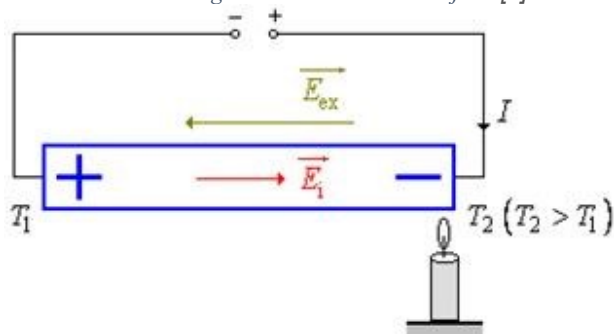
V kovocho ako je zinok alebo meď, ktoré majú na konci s vyššou teplotou vyšší potenciál a na konci s nižšou teplotou nižší potenciál, sa pri priechode elektrického prúdu z konca s vyššou teplotou ku koncu s nižšou teplotou uvoľňuje Thomsonovo teplo do okolia. Tento jav sa nazýva pozitívny Thomsonov jav (obr. č. 8.2). Elektrický prúd teda prechádza v smere od vyššieho potenciálu k nižšiemu potenciálu samo-voľne, nie je nutný žiadny vonkajší zdroj.

Obr. č. 8.2 Schéma pozitívneho Thomsonovho javu [4]



Na rozdiel od toho v kovoch ako je kobalt, nikel alebo železo, ktoré majú na konci s nižšou teplotou vyšší potenciál a na konci s vyššou teplotou nižší potenciál, sa pri prechode elektrického prúdu z konca s vyššou teplotou ku koncu s nižšou teplotou absorbuje Thomsonovo teplo. Tento jav sa nazýva negatívny Thomsonov jav (obr. č. 8.3). V tomto prípade prechádza elektrický prúd v smere od nižšieho potenciálu k vyššiemu potenciálu. Preto potrebuje (v porovnaní s predchádzajúcim prípadom) dodať energiu zo zdroja napätia, aby sa k vyššiemu potenciálu „predral“. Elektrický prúd v tomto prípade totiž tečie akoby „do kopca.“ [4]

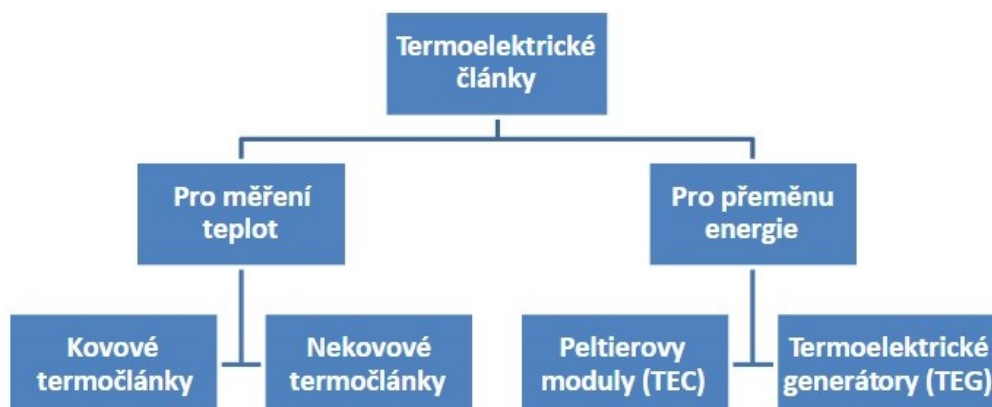
Obr. č. 8.3 Schéma negatívneho Thomsonovho javu [4]



9 Rozdelenie termoelektrických článkov

Termoelektrické články môžeme z hľadiska využitia a použitých materiálov rozdeliť do dvoch hlavných častí, tak ako vyplýva z obrázka číslo 9.1. Termoelektrické články pre meranie teplôt sú vyrobené najmä z kovov, zatiaľ čo termoelektrické články pre premenu energie sú vyrábané výhradne z polovodičov. [1]

Obr. č. 9.1 Rozdelenie termoelektrických článkov [1]



9.1 Termoelektrické snímače teploty

Termoelektrický snímač teploty je usporiadanie dvoch spojených drôtov, ktoré sa dajú spojiť rôznym spôsobom, napr. zvarením. Spojené konce vytvárajú merací spoj termočlánku, zatiaľ kým voľné konce sú porovnávací spoj. Ak je merací spoj na inej teplote než porovnávací spoj, objaví sa medzi oboma vodičmi jednosmerné napätie úmerné rozdielu teplôt medzi meracím a porovnávacím spojom. K meraniu a regulácii teplôt sa používajú články a batérie založené na Seebeckovom termoelektrickom jave a to predovšetkým články a batérie kovové.

9.1.1 Výhody a nevýhody termoelektrických snímačov

Termoelektrické snímače majú mnohé výhody, pre ktoré sa stali veľmi rozšírené, medzi najvýznamnejšie patria:

- malá teplotná zotrvačnosť – termoelektrické články reagujú prakticky okamžite na zmeny teploty
- malá tepelná kapacita – nízke merné teplo kovu, a tým aj malé množstvo tepla potrebného k ohriatiu termoelektrického článku
- značná citlivosť – tým aj pomerne veľká presnosť
- možná veľká vzdialenosť miesta merania a vyhodnotenia
- možnosť ich použitia v širokom teplotnom intervale – približne -250°C až 1600°C
- mechanická odolnosť (drsne pracovné podmienky, rázy, otrasy, vibrácie)

Medzi nedostatky termoelektrických čidiel patria:

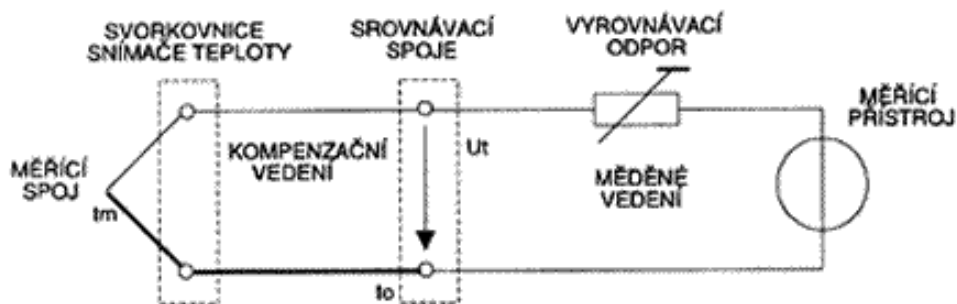
- nízka úroveň termoelektrického napätia (signálu)
- nelineárna prevodná charakteristika
- zmena termoelektrických konštánt s teplotou
- veľké výrobné tolerancie (odchýlky, neistoty)

- chemická a fyzikálna „nehomogenita“ termočlánku [6]

9.1.2 Zapojenie termočlánku do obvodu

Na obr. č. 9.2 sú vyznačené jednotlivé funkčné miesta obvodu. Spojené konce, ktoré sa vkladajú do meranej teploty, nazývame merací spoj. Voľné konce, na ktorých meriame termoelektrické napätie, sa nazývajú porovnávacie spoje. Termoelektrické napätie U_t , ktorého hodnota je úmerná rozdielu teploty T_m v mieste meracieho spoja (teplý koniec) a teploty T_o v mieste porovnávacích spojov (studené konce) sa privádza kompenzačným vedením a medeným vedením na merací prístroj. Aby bolo možné každej hodnote termoelektrického napätia priradiť určitú teplotu, je treba udržiavať porovnávacie spoje na známej a konštantnej teplote, tzv. teplote vzťažnej. [7]

Obr. č. 9.2 Základné zapojenie termočlánkov [7]



9.1.3 Využitie termoelektrických snímačov

Snímače dosiahli značného rozšírenia pre svoju jednoduchosť a odolnosť proti mechanickému a tepelnému namáhaniu. Obsahujú široký rozsah teplôt a pre svoju malú hmotnosť a zotrvačnosť sú vhodné pre meranie rýchlych zmien teploty. [7]

Využívajú sa hlavne k meraniu teplôt, ale je možné ich využiť aj pre iné veličiny:

- množstvo tepla – meria sa teplota pred a za výmenníkom a objemový prietok príslušného média
- hustota tepelného toku – meria sa rozdiel teplôt v dvoch miestach meraného objektu alebo teplotný tok pri lineárnom prietoku tepla závisí na gradientu teploty a tepelnej vodivosti meranej dosky,
- tepelné žiarenie (infražiarenie) – je opticky sústredené do komory v ktorej je termobatéria,
- zmena teploty odporového článku, ktorá je závislá na tlaku, je meraná termočlánkom. [5]

9.1.4 Materiály termoelektrických snímačov

Pri výbere materiálu pre termoelektrický snímač sa snažíme splniť základné požiadavky. Predovšetkým, aby sa závislosť termoelektrického napätia na teplote blížila lineárnemu priebehu. Materiál má byť odolný proti chemickým, mechanickým a koróznym vplyvom. Výstupné termoelektrické napätie má byť čo najväčšie. Čím je hodnota napätia menšia, tým je menšia presnosť.

Materiál volíme z hľadiska požadovaného rozsahu teplôt a požadovanej presnosti merania. Dôležitá je tiež časová stálosť, poprípade stredná doba života snímača. Stálosť charakteristiky má byť s časom nepremenná. Táto podmienka sa obzvlášť za vyšších teplôt dá ťažko dodržať. Dochádza k rekryštalizácii v mieste spoja, poprípade ku starnutiu. Snímače sa potom musia obnovovať.

Pre jednoduchšiu výrobu termoelektrických senzorov bola zostavená termoelektrická rada materiálov, podľa termoelektrického napätia vzťahujúceho sa k čistej platine. Tabuľku zostavil Seebeck v roku 1822 (obr. č. 9.3). [5]

Obr. č. 9.3 Ukážka Seebeckovej termoelektrickej rady materiálov [22]

kov (materiál)	Značka	U_t [mV/100°C]
vizmut	Bi	-5,2
konstantan		-3,47
nikl	Ni	-1,92
paladium	Pd	-0,28
platina	Pt	0
uhlík	C	+0,25
wolfram	W	+0,65
rhodium	Rh	+0,65
měď	Cu	+0,72
iridium	Ir	+0,68
zlato	Au	+0,80
molybden	Mo	+1,16
železo	Fe	+1,87
niklchrom		+2,20
křemik	Si	+44,08
telur	Te	+50

9.1.5 Typy termoelektrických snímačov

V rôznych intervaloch teplôt sa používajú termoelektrické články zhotovené z rôznych dvojíc kovov, ktoré sa vyznačujú rôznym Seebeckovým súčiniteľom termoelektrického napätia a tým aj rôznou citlivosťou a presnosťou merania. Typy termočlánkov sa pôvodne označovali

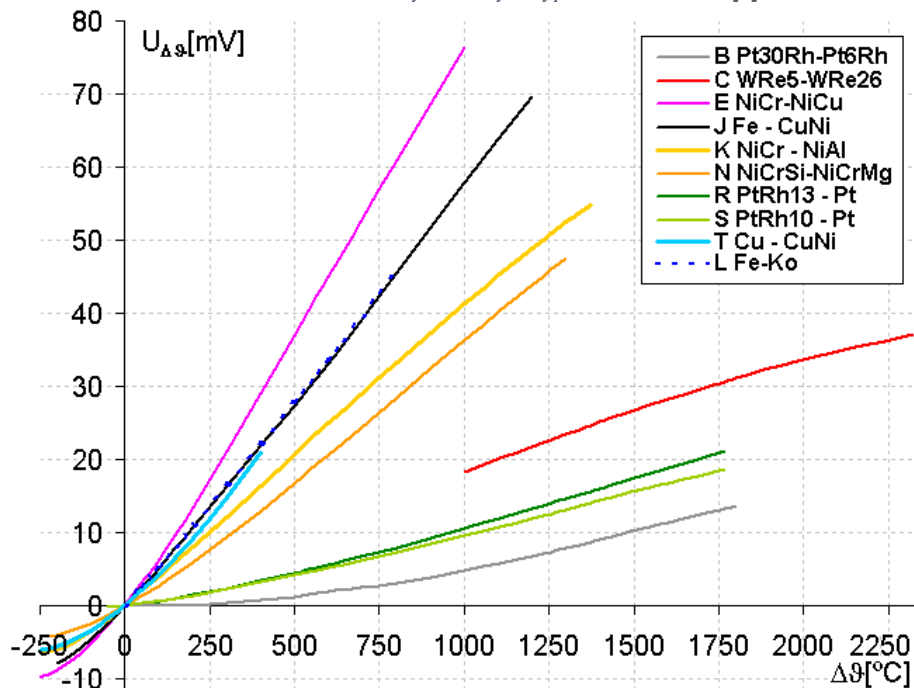
použitou dvojicou kovov (chemickým zložením), dnes sa podľa normy označujú veľkými písmenami. Normou je zaručené, že vlastnosti rovnako označených termočlánkov vyrobených rôznymi výrobcami sú zhodné. Najpoužívanejšie termoelektrické články, ich označenie a najvhodnejší tepelný interval použitia sú uvedené v tabuľke (obr. č. 9.4). [5]

Obr. č.9.4 Najpoužívanejšie termoelektrické články [7]

Označení termočlánku dle IEC 584	Původní označení	Měřící rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700

Vhodná dvojica kovov sa stanovuje podľa závislosti termoelektrického napätia na teplote. Je treba vybrať také dva kovy, aby zmena napätia bola čo najvyššia. Na obrázku č. 9.5 je graf závislosti termoelektrického napätia na teplote pre niektoré termočlánky. V Českej republike sa najčastejšie používajú lacnejšie typy J a K. Typ J (železo-konstantan) a K (chromel-alumel) sa dajú použiť v oxidačnej a inertnej atmosfére. Typ J sadá navyše používať v redukčnej atmosfére a vákuu. [8]

Obr. č. 9.5 Charakteristiky niektorých typov termočlánkov [8]



10 Termočlánky pre premenu energie

Termočlánky určené pre premenu energie využívajú schopnosť daného materiálu generovať elektrické napätie za prítomnosti teplotného gradientu, a tým zaisťovať premenu tepelnej energie na energiu elektrickú. Technológie termoelektrickej generácie energie z odpadného tepla prisľubujú zlepšenie celkovej účinnosti využitia energie a zníženie spotreby fosílnych palív.

Teplo z rôznych zdrojov, napríklad solárne, geotermálne, ale predovšetkým energie z odpadného tepla z priemyslových procesov, automobilov, atď. ..., môže byť priamo prevedené na čistú elektrickú energiu pomocou termoelektrického (TE) zariadenia. V súčasnej dobe predstavuje odpadné teplo približne 60% celkovej spotrebovanej energie. TE zariadenia majú dôležitú výhodu v tom, že sú jednoduchými súčiastkami zostavenými z niekoľkých komponent bez pohyblivých častí. Ďalšou výhodou tejto technológie je fakt, že jednotlivé moduly sú kompaktné a škálovateľné pre rôzne merítka (od miniatúrnych až po industriálne zariadenia). Jedna z najslubnejších aplikácií je napr. v automobilovom priemysle, kde teplo uvoľnené do chladiacej kvapaliny motoru alebo výfukových plynov môže byť premenené na elektrickú energiu. Medzi aktuálne využívané aplikácie patrí napr. výroba energie z ropovodov a plynovodov alebo kozmických sond cez rádioizotopické termoelektrické generátory. TE zariadenie môže pracovať tiež vratne ako tepelné čerpadlo pre chladenie. [9]

10.1 Účinnosť premeny energie TE

Oblasti efektívneho využitia TE sú v súčasnej dobe obmedzené nízkou účinnosťou TE zariadenia. Hranice účinnosti premeny energie TE moduly je daná Carnotovou účinnosťou, pre jej určenie sa používa bezrozmerná materiálová veličina (ZT):

$$ZT = T (S^2 \cdot \sigma) / \lambda ,$$

kde S je termoelektrická sila (alebo tiež Seebeckov koeficient), σ je elektrická vodivosť, λ je tepelná vodivosť a T je absolútna teplota.

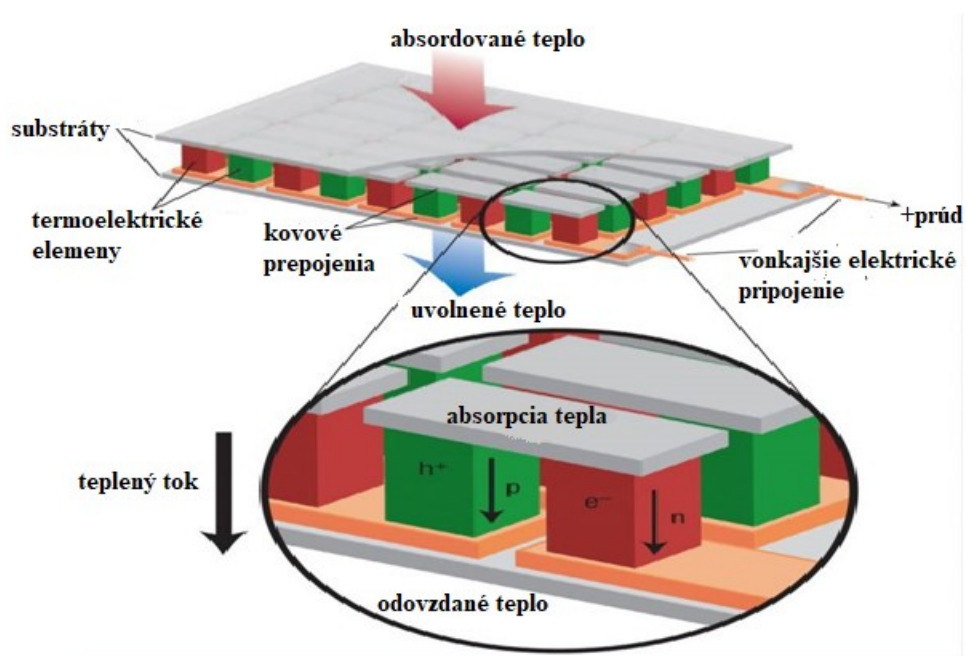
Pre zvýšenie parametru ZT a teda zvýšenie efektivity termoelektrickej premeny energie je nutné, aby TE materiály mali nasledujúce tri fyzikálne vlastnosti:

- nízku tepelnú vodivosť λ , ktorá je nevyhnutná pre veľký teplotný rozdiel oboch koncov materiálu,
- vysokú elektrickú vodivosť σ , ktorá je potrebná pre zníženie vnútorného odporu materiálu,
- veľkú termoelektrickú silu (S), ktorá je potrebná k získaniu vysokého napätia. [9]

10.2 Termoelektrický modul

Termoelektrický modul je vytvorený ako generátor zložený z kompatibilných párov polovodičov n-typu a p-typu materiálov tvoriacich tzv. „unicouple“ (obr. č. 10.1). Teplo z teplého konca prúdi od tepelného kontaktu ku chladiču, čo indukuje teplotný gradient v n-typu a p-typu polovodičoch umiestnených tepelne paralelne a elektricky do série. Generované termoelektrické napätie je u jednotlivých typov polovodičov s opačným znamienkom a preto sa v sériovom elektrickom zapojení sčíta. Kvalitná konštrukcia TE modulu je, okrem dostupných vysoko kvalitných materiálov, termoelektricky zladených n-typov a p-typov materiálov, podmienená taktiež riadne prevedenými a termicky stabilnými elektrickými a tepelnými kontaktami. [9]

Obr. č. 10.1 Termoelektrický modul [9]



Termoelektrický modul môže byť využívaný ako:

- Chladič („thermoelectric cooler, TEC“)
- Ohrievač („thermoelectric heater, TEH“)
- Generátor elektrickej energie („thermoelectric generator, TEG“)

10.3 Termoelektrické články TEC (TEH)

Termoelektrické články TEC (TEH) sú polovodičové ohrievacie alebo chladiace jednotky, ktoré využívajú Peltierov efekt na vytvorenie tepelného toku medzi dvoma povrchmi modulu. Peltierov jav ukazuje, že teplotný diferenciál sa vytvára, keď sa jednosmerný prúd

aplikuje na dva rozdielne materiály s charakteristikami spoja P-N. Typický termoelektrický modul sa vyrába s použitím dvoch tenkých keramických doštičiek s radom P a N bizmut-teluridových polovodičových materiálov, vložených medzi nimi. Keramický materiál na oboch stranách modulu dodáva pevnosť a potrebnú elektrickú izoláciu. Materiál typu N má nadbytok elektrónov, zatiaľ čo materiál typu P má deficit elektrónov. Jeden prvok P a jeden prvok N tvoria dvojicu spojení, ktorá vytvára termoelektrický efekt (obr. č. 10.2). [10]

Obr. č. 10.2 Princíp termoelektrického modulu TEC [12]



10.3.1 Výhody a nevýhody modulov TEC

Použitie termoelektrických modulov často poskytuje riešenia a v niektorých prípadoch jediné riešenie, pre mnoho zložitých problémov s tepelným manažmentom, kde sa musí zaobchádzať s nízkym až stredným množstvom tepla. Zatiaľ čo žiadny chladiaci spôsob nie je ideálny vo všetkých ohľadoch a použitie termoelektrických modulov nebude vhodné pre každú aplikáciu, chladiče TE často poskytujú podstatné výhody oproti alternatívnym technológiám. Medzi najvýznamnejšie výhody termoelektrických modulov patria:

- Žiadne pohyblivé časti: Modul TE pracuje elektricky bez pohyblivých častí, takže sú prakticky bezúdržbové.
- Malé rozmery a hmotnosť: Celkový termoelektrický chladiaci systém je omnoho menší a ľahší ako porovnateľný mechanický systém. Okrem toho sú k dispozícii rôzne štandardné a špeciálne veľkosti a konfigurácie, ktoré spĺňajú prísne požiadavky na aplikáciu.
- Schopnosť ochladzovať pod okolitú teplotu: Na rozdiel od konvenčného chladiča, ktorého teplota musí nevyhnutne stúpnuť nad okolitú teplotu, chladič TE pripojený k tomuto istému chladiču má schopnosť znížiť teplotu pod okolitú hodnotu.

- Schopnosť ohrievať a ochladzovať pomocou rovnakého modulu: Termoelektrické chladiče budú ohrievať alebo ochladzovať v závislosti od polarít použitého jednosmerného prúdu. Táto vlastnosť eliminuje potrebu poskytovať samostatné funkcie vykurovania a chladenia v rámci daného systému.
- Presná regulácia teploty: Chladiče TE môžu regulovať teploty na lepšie ako $\pm 0,1^\circ \text{C}$.
- Vysoká spoľahlivosť: Termoelektrické moduly vykazujú veľmi vysokú spoľahlivosť vďaka svojej pevnej konštrukcii. Hoci spoľahlivosť je trochu závislá od aplikácie, životnosť typických chladičov TE je viac ako 200 000 hodín.
- Elektricky „tichý“ chod: Na rozdiel od mechanického chladiaceho systému TE moduly nevytvárajú prakticky žiadny elektrický šum a môžu byť použité v spojení s citlivými elektronickými senzormi. Sú tiež akusticky tiché.
- Prevádzka v akejkoľvek orientácii: Môžu byť použité v akejkoľvek orientácii a v prostredí s nulovou hmotnosťou. Sú teda populárne v mnohých kozmických aplikáciách.
- Pohodlné napájanie: TE moduly pracujú priamo zo zdroja jednosmerného prúdu. K dispozícii sú moduly so širokým rozsahom vstupných napätí a prúdov.
- Schopnosť generovať elektrickú energiu: Ak sa používa „v obrátenom režime“ použitím teplotného rozdielu na plochách chladiča TE, je možné generovať malé množstvo jednosmerného prúdu.
- Šetrné k životnému prostrediu: Konvenčné chladiace systémy nie je možné vyrábať bez použitia chlór-fluórovaných uhlíkovodíkov alebo iných chemikálií, ktoré môžu byť škodlivé pre životné prostredie. Termoelektrické zariadenia nepoužívajú ani nevytvárajú plyny žiadneho druhu. [11]

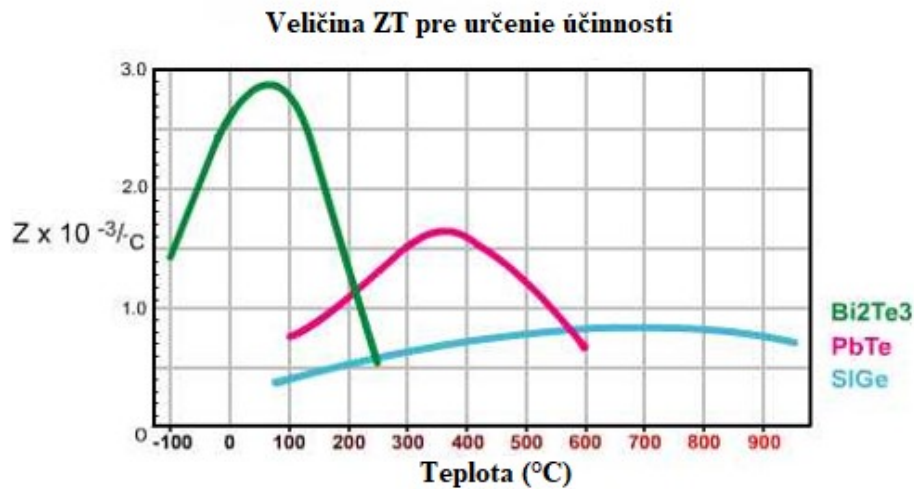
Významnou nevýhodou použitia termoelektrických systémov bola neuspokojivá úroveň účinnosti. Najlepšie termoelektrické systémy môžu poskytovať účinnosť približne 35%. [11]

10.3.2 Materiály pre výrobu modulov TEC

Polovodičový materiál najčastejšie používaný v dnešných termoelektrických chladičoch je zliatina telurid bizmutu, ktorá poskytuje jednotlivé prvky s odlišnými charakteristikami „N“ a „P“. Okrem teluridu bizmutového (Bi_2Te_3) existujú aj iné termoelektrické materiály vrátane teluridu olovnateho (PbTe), germanidu kremičitého (SiGe) a zliatin bizmutu a antimónu (Bi-Sb), ktoré sa môžu používať v špecifických situáciách. Obrázok č. 10.3 ilustruje relatívnu účinnosť rôznych materiálov v závislosti na rozsahu teplôt. Z tohto grafu je vidieť, že výkon

teluridu bizmunitého v teplotnom rozsahu je najvyšší a je teda najvhodnejší pre väčšinu chladiacich aplikácií. [12]

Obr. č. 10.3 Účinnosť materiálov pri rôznych teplotách [11]

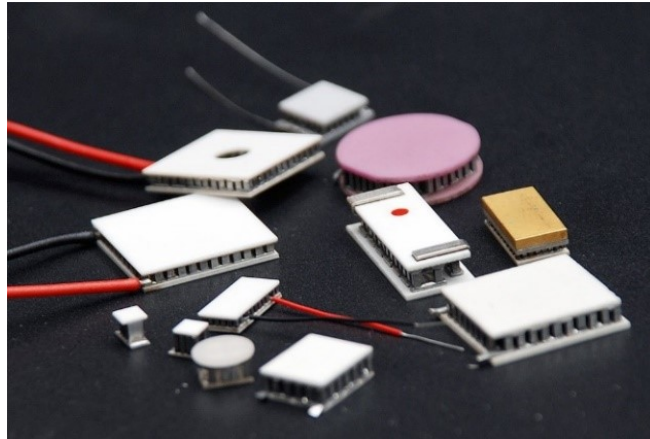


10.3.3 Využitie modulov TEC

Aplikácie pre termoelektrické moduly pokrývajú široké spektrum oblastí výrobkov. Patria sem zariadenia používané vojenskými, lekáorskými, priemyselnými, spotrebiteľskými, vedeckými, laboratórnymi a telekomunikačnými organizáciami. Použitia sa pohybujú od jednoduchých chladičov potravín a nápojov na popoludňajší piknik až po veľmi sofistikované systémy riadenia teploty v raketách a kozmických vozidlách. Na rozdiel od jednoduchého chladiča, termoelektrický chladič umožňuje znížiť teplotu objektu pod okolitú teplotu a stabilizovať teplotu objektov, ktoré podliehajú rôznym okolitým podmienkam.

Termoelektrické chladiče sa môžu uplatniť v aplikáciách, ktoré vyžadujú odoberanie tepla v rozsahu od miliwattov až po niekoľko tisíc wattov. Väčšina jednostupňových chladičov, vrátane modulov s vysokým aj nízkym prúdom, je schopná čerpať maximálne 3 až 6 wattov na štvorcový centimeter (20 až 40 wattov na štvorcový palec) plochy modulu. Na zvýšenie celkového výkonu tepelného čerpadla možno použiť viac modulov namontovaných tepelne paralelne. Veľké termoelektrické systémy v rozsahu kilowatt boli v minulosti vybudované pre špecializované aplikácie, ako je chladenie v ponorkách a železničných vozňoch. Systémy tohto rozsahu sa teraz ukázali ako veľmi cenné v aplikáciách, ako sú linky na výrobu polovodičov. Rôzne modifikácie TEC modulov môžeme vidieť na obrázku č. 10.4. [11]

Obr. č. 10.4 rôzne modifikácie TEC modulov [11]



10.3.3.1 Spotrebné výrobky

Peltierove články sa bežne používajú v spotrebných výrobkoch. Napríklad v kempingu, prenosných chladičoch, chladiacich elektronických súčiastkach a malých nástrojoch. Ich chladiaci účinok možno tiež použiť na odvod vody zo vzduchu v odvlhčovačoch. Elektrický chladič typu kemping/auto môže znížiť teplotu až o 20°C pod okolitú teplotu. Termoelektrické články začali vyžívať aj chytré klimaticky kontrolované bundy, ktoré sa dokážu prispôbiť teplote. Ďalšie veľmi časté spotrebné termoelektrické výrobky sú: prenosné nádoby na potraviny, zásobníky chladenej vody, chladiče vína (obr. č. 10.5), malé chladničky, osobné komfortné chladenie alebo kúrenie. [13]

Obr. č. 10.5 Termoelektrická vinotéka [13]

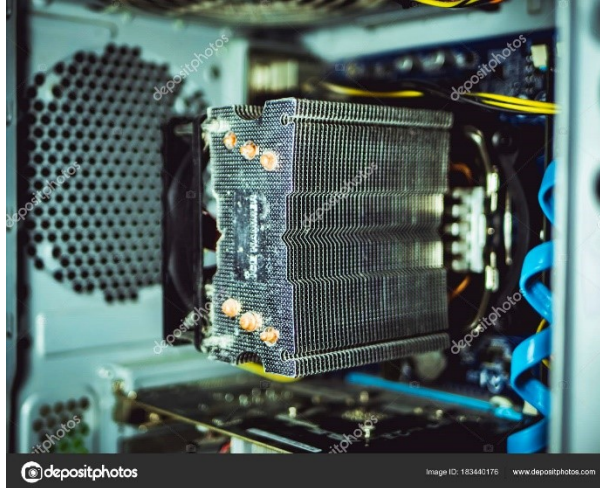


10.3.3.2 Priemyselné využitie

Termoelektrické chladiče sa používajú v mnohých oblastiach priemyselnej výroby. Vyžadujú dôkladnú analýzu výkonu, pretože čelia skúške prevádzkovania tisícov cyklov

predtým, ako sa tieto priemyselné výrobky uvedú na trh. Niektoré významné využitia sú: laserové zariadenia, termoelektrické klimatizačné zariadenia alebo chladiče, priemyselná elektronika a telekomunikácie, automobilový priemysel, počítačové mikroprocesory (obr. č. 10.6) a robotika. [13]

Obr. č. 10.6 Procesor počítača chladený termoelektrickým chladičom [13]



10.3.3.3 Veda a výskum

Peltierove články našli svoje využitie aj vo vedeckých zariadeniach. Sú zložkou v termálnych cykléroch (obr. č. 10.7) používajúcich sa na techniku nazývanú polymerázová reťazová reakcia (PCR), ktorá umožňuje namnožiť určitý úsek molekuly DNA. Vyžaduje rýchle zahrievanie a ochladzovanie reakčnej zmesi. Táto technika sa využíva v medicíne a forenznej genetike na diagnostiku dedičných ochorení či určovanie otcovstva.

TEC moduly môžu byť použité na implementáciu vysoko stabilných regulátorov teploty, ktoré udržiavajú požadovanú teplotu v rozmedzí $\pm 0,01$ °C. Takáto stabilita môže byť použitá v presných laserových aplikáciách. Fotónové detektory v astronomických ďalekohľadoch, spektrometroch alebo digitálnych fotoaparátoch, sú tiež často chladené Peltierovými prvkami. Tým sa zníži počet tmavých miest v dôsledku tepelného šumu. Termoelektricky chladené sú tiež niektoré elektronické zariadenia určené na vojenské účely v teréne. [13]

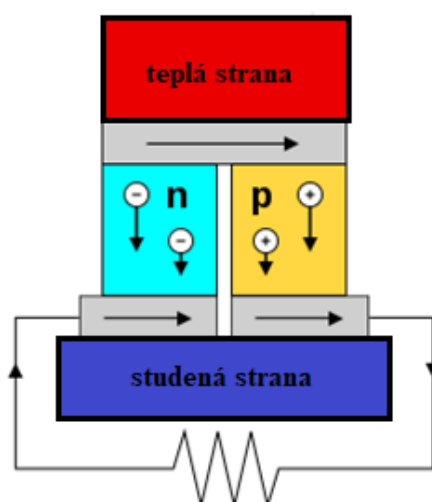
Obr. č. 10.7 Termálny cyklér [11]



10.4 Termoelektrické generátory TEG

Termoelektrický generátor je zariadenie, ktoré využíva Seebeckov jav a tak premieňa tepelný rozdiel na elektrinu. Základným konštrukčným prvkom sú termoelektrické dvojice tvorené polovodičovými p–n priechodom. Pokiaľ je na p – n prechod privedené teplo, dochádza v polovodiči typu N k pohybu elektrónu, v polovodiči typu P k pohybu kladných dier (obr. č. 10.8). Tieto náboje sa následne koncentrujú pri chladnejších koncoch polovodičov, medzi ktorými vzniká rozdiel potenciálov. Ak sa uzatvorí daný obvod, dochádza k pohybu elektrónov cez umožnený prechod, cez ktorý sa následne umožní prietok elektrického prúdu. Takto vyrobené napätia sú malé a závisia od použitého materiálu a teplotného rozdielu. Vo vnútri TEG modulu sú však viaceré páry typu P a N, ktoré môžu byť zapojené do série, aby sa zvýšilo výstupné napätie. [14]

Obr. č. 10.8 Princíp termoelektrického generátora TEG [23]



10.4.1 Výhody a nevýhody generátorov TEG

Medzi hlavné výhody termoelektrických generátorov patria:

- vysoká spoľahlivosť
- šetrné k životnému prostrediu
- vysoká škálovateľnosť, čo znamená že sa dajú využiť na zdroj tepla akejkoľvek veľkosti
- nízke výrobné náklady
- recyklovanie premrhannej tepelnej energie

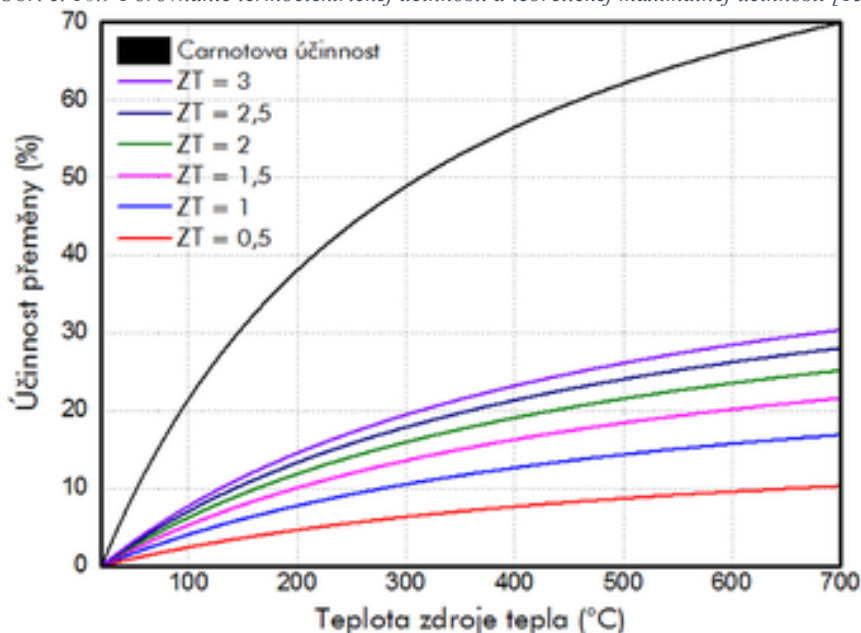
Niektoré z ich hlavných nevýhod sú nasledujúce:

- nízka účinnosť premeny energie
- vyžadujú relatívne konštantný zdroj tepla
- nedostatok vzdelávania o termoelektrických generátoroch
- pomalý technologický pokrok
- vysoký výkonový odpor [13]

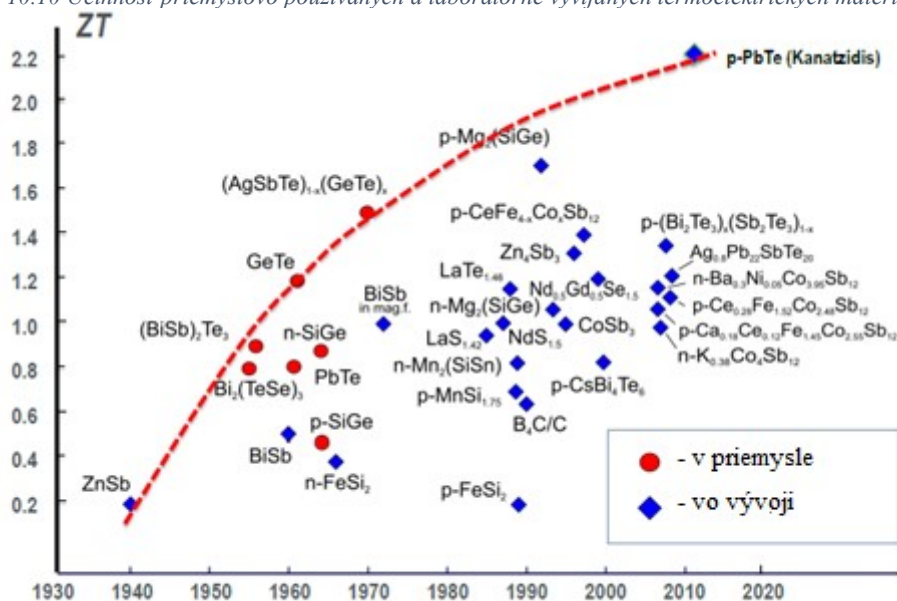
10.4.2 Materiály pre výrobu termoelektrických generátorov

Účinnosť termoelektrickej premeny je daná použitými materiálmi. Pre vyjadrenie jej veľkosti sa používa bezrozmerný koeficient ZT . Na obrázku č. 10.9 je znázornený priebeh účinnosti materiálov s daným ZT a účinnosti ideálneho tepelného stroja. Bežne dostupné termoelektrické materiály majú približne parameter $ZT \leq 1$ a teda i malú účinnosť. V nízkotepelných aplikáciách typicky okolo 5 %. Zložitejšie segmentované moduly môžu dosahovať 10 %. Laboratórne pripravované materiály majú vyššie koeficienty ZT a môžu dosahovať vyššie účinnosti (obr. č. 10.10). [15]

Obr. č. 10.9 Porovnanie termoelektrickej účinnosti a teoretickej maximálnej účinnosti [15]



Obr. č. 10.10 Účinnosť priemyslovo používaných a laboratórne vyvíjaných termoelektrických materiálov [15]



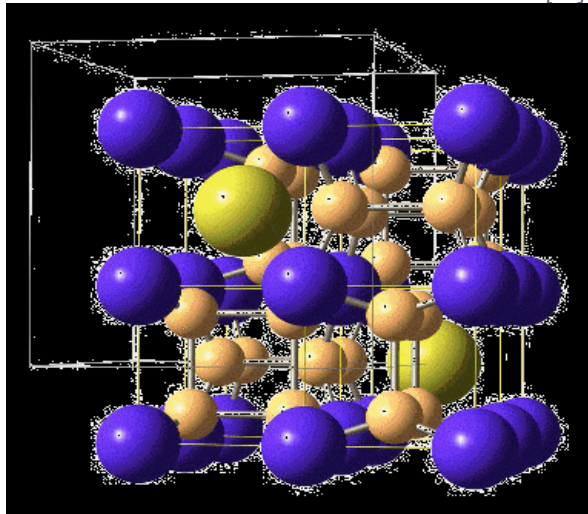
Odborníci na celom svete stále pracujú na vývoji termoelektrických materiálov s vyššou hodnotou ZT. Taký materiál musí mať vedľa veľkého Seebeckovho koeficientu malú tepelnú vodivosť a súčasne veľkú elektrickú vodivosť.

Z fyzikálneho hľadiska je táto požiadavka ťažko splniteľná, pretože materiály, ktoré dobre vedú prúd, sú väčšinou tiež dobrými vodičmi tepla. Elektrická a tepelná vodivosť sú spolu do istej miery zviazané a nedá sa ich nezávisle na sebe optimalizovať. Preto museli odborníci vhodné materiály modifikovať tak, aby mohla byť pri zachovaní veľkej elektrickej vodivosti

umelo znížená ich schopnosť viesť teplo a pritom bola ponechaná možnosť používať ich aj pri vysokých teplotách. Veľké možnosti v tomto smere priniesla na prelome 20. a 21. storočia nanotechnológia a používanie nanokompozitných polovodičových materiálov. V súčasnosti najrozšírenejší výrobný postup spočíva v tom, že sa nanometricky tenké vrstvy z termoelektricky rôzne aktívneho materiálu kladú na seba. Styčné plochy, ktoré tým v materiáli vznikajú, bránia prenosu tepla, ale na prenos prúdu vplyv nemajú, čo je pre dosiahnutie veľkej hodnoty ZT veľmi priaznivé. [16]

Výskumná skupina chemicko-technickej fakulty na Univerzite Pardubice sa v posledných rokoch tiež zapojila do hľadania nových, perspektívnych termoelektrických materiálov. Sústreďuje sa na materiály so skutteruditovou štruktúrou a to hlavne na tzv. ternárne skutterudity. Práve skutterudity patria v súčasnej dobe do jednej z celosvetovo najštudovanejších tried nových materiálov. Tieto zlúčeniny vďaka svojej komplexnej štruktúre a vďaka možnosti zabudovania i väčších a ťažších atómov do voľných dutín tejto štruktúry sa stali prototypom moderného termoelektrického materiálu (obr. č. 10.11). Príkladom skutteruditu je $\text{Yb}_{0,35}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$, ktorý pri teplote 820 K dosahuje hodnoty $\text{ZT}=1,2$. [17]

Obr. č. 10.11 Štruktúra tzv. Plneného skutteruditu $\text{YbCo}_4\text{Sb}_{12}$ [17]



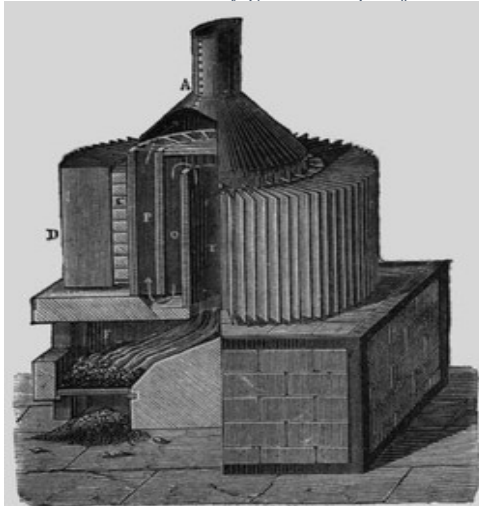
10.4.3 Využitie termoelektrických generátorov

10.4.3.1 História

Prvý zdokumentovaný termoelektrický generátor vznikol v roku 1840. V roku 1860 bol skonštruovaný plynový termoelektrický generátor a v roku 1879 generátor spaľujúci koks (obr. č. 10.12), ktorý dosahoval elektrický výkon 192 Wattov. Prvý komerčný termoelektrický generátor bol uvedený vo Veľkej Británii v roku 1925 pod názvom Thermattaix a napájal rozhlasové prijímače. K jeho ohrevu sa používal plynový horák, chladenie generátoru zaisťoval

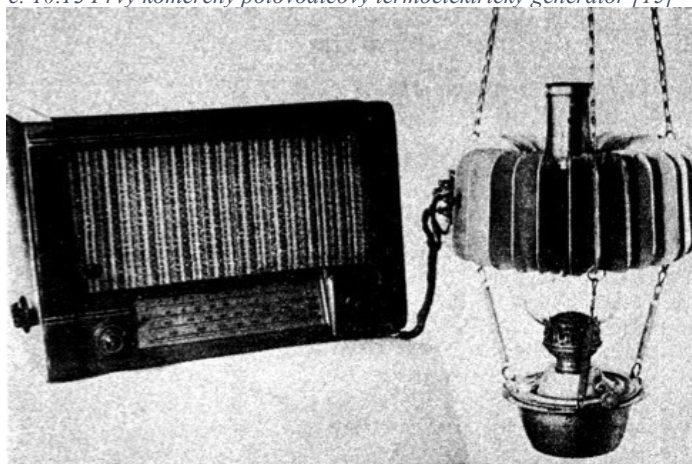
okolitý vzduch. Všetky tieto generátory boli zostavené z kovových materiálov a mali veľmi malú účinnosť (menšiu než 1 %). Ako sa neskôr ukázalo v súvislosti s vývojom syntetických polovodičových materiálov, kovy a kovové zliatiny nie sú vhodné pre hromadnú výrobu elektrickej energie., pretože veľkosť generovaného Seebeckovho napätia je veľmi malá. [15]

Obr. č. 10.12 Termoelektrický generátor spaľujúci koks [15]



Následný vývoj sa sústredil v Sovietskom zväze, kde od 20. rokov prebiehal výskum polovodičových materiálov. Na konci druhej svetovej vojny mala armáda SSSR prvé experimentálne termoelektrické polovodičové generátory. Slúžili pre napájanie rádiostaníc. V civilnom sektore bol prvý komerčný polovodičový generátor uvedený v roku 1954 (obr. č. 10.13). Využíval tepla petrolejových lúčok a tak ako generátor Thermattaix, tiež sa používal k napájaniu rozhlasových prijímačov. [15]

Obr. č. 10.13 Prvý komerčný polovodičový termoelektrický generátor [15]



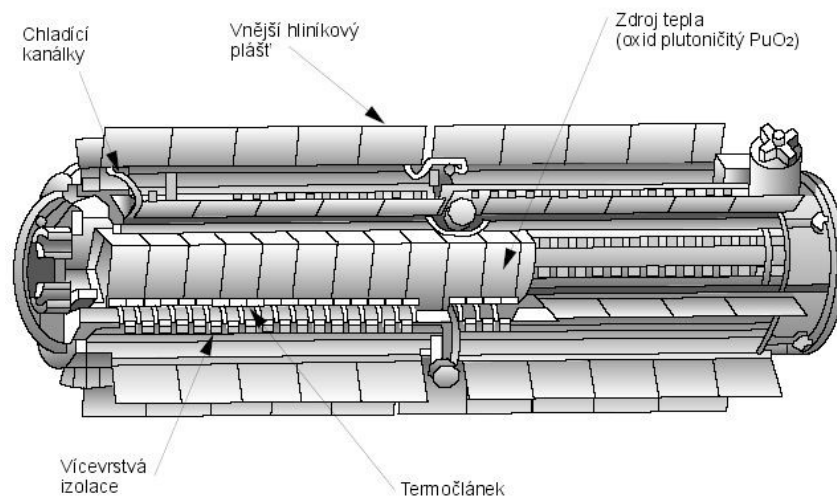
10.4.3.2 Radioizotopové termoelektrické generátory

Družiciam vyslaným do ďalekého vesmíru často trvá až desiatky rokov, než dorazia na miesto, ktoré je cieľom ich misie. Je potrebné zaistiť energiu, aby vôbec boli schopné získať cenné informácie a odoslať ich späť na zem z miest, kde je slnečné žiarenie príliš slabé a kam je dopravenie ťažkých technológií energeticky náročné. Technológie musia navyiac spĺňať ďalšie požiadavky, napr. bezúdržbovosť. Inak povedané, musia obsahovať čo najmenší počet pohyblivých častíc, ktoré by sa mohli stať predmetom poruchy vplyvom opotrebovania alebo otrasov behom vzletu a pristávania.

Tieto požiadavky spĺňa RTG – rádioizotopový termoelektrický generátor (obr. č. 10.14). Jedná sa o kovovú trubicu o dĺžke zhruba pol metra s priemerom okolo 40 cm. Vo vnútri sa nachádza zdroj tepla obklopený termočlánkami. Všetko je opatrené niekoľkými vrstvami ochranného puzdra. Toto zariadenie je schopné zaistiť elektrinu i teplo pre sondy až na desiatky rokov. NASA ich vyslala dodnes do vesmíru viac než štyri desiatky. Zohrali významnú rolu pri dobývaní vesmíru.

Palivom pre RTG je nestabilný izotop určitého prvku, ktorý sa vďaka svojej nestabilite samovoľne mení prostredníctvom jednej z premien α , β alebo γ , inými slovami je rádioaktívny. Najčastejšie sa využíva izotop plutonia-238, ktorý má polčas rozpadu 87,7 rokov a je zdrojom silného α žiarenia. [15, 18]

Obr. č. 10.14 Rádioizotopický termoelektrický generátor [24]



Medzi známe RTG v kozme patrí výskumné vozidlo Curiosity Rover (obr. č. 10.15) vyslané na Mars, kde vysoká prašnosť znemožňuje funkciu fotovoltických článkov. Curiosity je vybavené MMRTG (Multi Mission RTG) s hmotnosťou 44 kg, s 4,8 kg oxidu plutoničitého. Jeho výkon pri dokončení dosahoval zhruba 110 W. MMRTG pre Curiosity zaisťuje elektrinu i teplo. [18]

Obr. č. 10.15 Výskumné vozidlo Curiosity rover [25]



Podobný typ rádioizotopových termoelektrických generátorov sa používa aj na pevnine v neprístupných oblastiach. Na vývoj generátorov pre kozmické sondy neskôr naviazala rada generátorov využívajúcich klasické fosílné palivá. Malé generátory o výkonoch desiatok až stoviek wattov sa ako zdroje elektrickej energie už niekoľko desaťročí používajú v odľahlých oblastiach k monitorovaniu prostredia, pre katodickú ochranu potrubných ciest, v navigácii, pre napájanie telekomunikačných sietí a v mnohých ďalších aplikáciách. [15]

10.4.3.3 Automobilové termoelektrické generátory

Automobilový priemysel predstavuje pre využitie termoelektriny perspektívnu oblasť. Cieľom automobilových termoelektrických generátorov (ATEG, AETEG) je využiť energiu paliva, ktorá bez úžitku odchádza výfukovým potrubím a chladiacou sústavou automobilu do atmosféry. V automobile sa takmer dve tretiny energie pohonnej hmoty strácajú ako nevyužitú teplo. Z toho sa asi 30 % stráca priamo v motorovom bloku a ďalších 30 až 35 % odchádza vo výfukových plynch. V dôsledku toho panujú vo výfukovom potrubí vysoké teploty presahujúce až 700 °C a teplotný rozdiel medzi výfukovou trúbkou a vedením chladiacej kvapaliny tak môže činiť až niekoľko stoviek stupňov Celsia. Taký teplotný rozdiel je veľmi výhodný pre použitie termoelektrického generátoru.

V roku 1963 bol zostrojený prvý automobilový termoelektrický generátor. Ďalší vývoj pokračoval až s objavením účinnejších a lacnejších materiálov. Medzi v súčasnosti posledné skonštruované generátory sa radia generátory automobilky BMW. V roku 2008 prezentovala generátor o výkone 200 W. V roku 2011 dosahoval generátor vo voze BMW X6 výkon už viac než 600 W (obr. č. 10.16). [15,16]

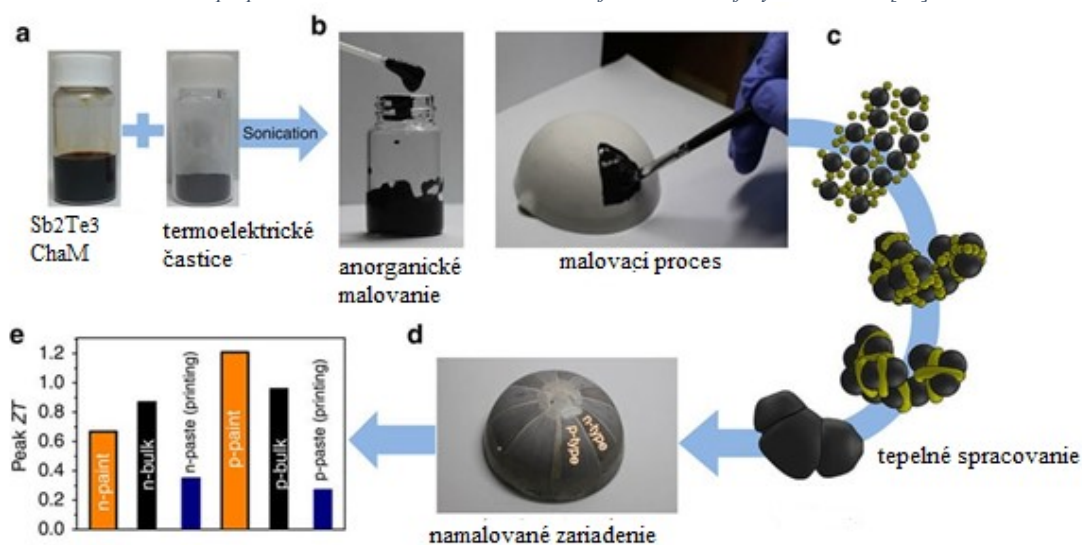
Obr. č. 10.16 Termoelektrický generátor vo výfukovom potrubí vozidla BMW X6 [15]



Kórejskí vedci z národného výskumného inštitútu v Ulsane (UNIST) vyvinuli unikátny termoelektrický generátor. Má podobu jemného filmu, ktorý sa dá aplikovať na takmer akýkoľvek členitý povrch. Možnosti využitia sú značné, vrátane automobilového priemyslu.

Práve špeciálny termoelektrický film kórejských vedcov sa dá naniesť napríklad na karosériu auta, na výfukové potrubie alebo na ocelovú konštrukciu spaľovacieho motora. Film obsahuje polovodič telurid bizmunitý, ktorý je často používaný v termoelektrických materiáloch. Špeciálny postup výroby fixuje jeho častice v termoelektrickom filme dohromady. Film sa jednoducho naniesie na povrch a potom sa zahrieva na vysoké teploty po dobu 10 minút, čo zvyšuje jeho hustotu a umožňuje účinnejšiu premenu tepelnej energie na elektrickú energiu. Testy ukázali, že zariadenie natrené TE farbou vykazuje výstupný výkon $26,3 \text{ mW/cm}^2$. Táto hodnota je porovnateľná s bežným TE materiálom. Postup aplikácie je zobrazený na obrázku č. 10.17. Technológia bude zvlášť užitočná pri zachytávaní tepla zo stien a striech budov v letných mesiacoch. [19]

Obr. č. 10.17 Postup aplikácie termoelektrického náteru objaveného kórejskými vedcami [19]



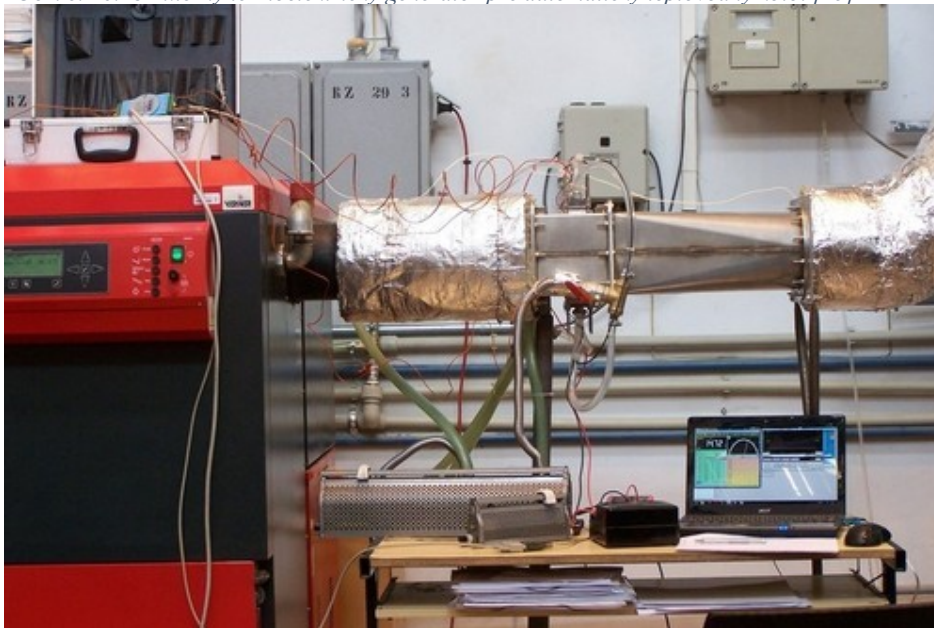
10.4.3.4 Termoelektrické generátory v spaľovacích zariadeniach

Využitie termoelektrických generátorov bolo tiež skúmané pre krytie vlastnej spotreby malých spaľovacích zariadení z odpadového tepla, či priamo ako zdroj elektrickej energie.

V roku 2009 bol prezentovaný termoelektrický systém v spojení s plynovým horákom na zemný plyn, ktorý dosahoval výkon 1 kW. O rok neskôr bol predstavený termoelektrický generátor integrovaný v domovom plynovom kotli. Dosahoval výkon 160 W. Vývoj sa zameriava aj na oblasť malých spaľovacích zariadení na biomasu o výkonoch v ráde jednotiek až desiatok kW. V roku 2007 bol prezentovaný systém vzniknutý spojením termoelektrického generátoru s komerčným 10 kW kotlom na drevené pelety (obr. č. 10.18), ktorá dosahovala výkon necelých 150 W. Po úpravách elektrický výkon vzrástol na takmer 350 W a jednotka po odčítaní vlastnej spotreby bola schopná generovať priemerne 276 W.

Termoelektrickými generátormi sa zaoberá napríklad aj Energetický ústav Fakulty strojného inžinierstva VUT v Brne, kde testujú experimentálne generátory pre malé spaľovacie zariadenia. [15]

Obr. č. 10.18 Externý termoelektrický generátor pre automatický teplovodný kotol [15]



10.4.3.5 Energy harvesting zariadenia

Pojem Energy Harvesting môžeme voľne preložiť ako získavanie energie, v praxi sa však používa anglický výraz. Označujeme tak techniky získavania malého množstva energie zo zdrojov ako je okolitá teplota, vibrácie, alebo prúdenie vzduchu.

V prípade termoelektrických energy harvesting zariadení sú využívané dostupné teplotné gradienty s pomocou veľmi malých tenkovrstvých termoelektrických generátorov s výkonomi v radoch mW vyrábaných planárnou technológiou. Využívajú rozdielne teploty povrchu zariadení a teploty okolitého prostredia. Zdrojom tepla môže byť napr. parné potrubie, teplo vznikajúce trením, ústredné kúrenie, klimatizácia a podobne. Komerčne dostupné mikrogenerátory sú schopné fungovať od teplotného rozdielu približne $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a väčších. Zariadenia alebo senzory využívajúce termoelektrický zdroj môžu byť umiestnené aj v nebezpečnom alebo citlivom prostredí. Navyiac získajú časovo neobmedzený zdroj energie, pretože životnosť napájacieho zariadenia je obmedzená len životnosťou jednotlivých komponentov. Príkladom aplikácií napájaných termoelektrickým mikrogenerátorom je napr. bezdrátový a bezbatériový systém vyobrazený na obrázku č. 10.19. Využíva teplo vznikajúce v ložiskách a monitoruje ich stav. Základňa senzoru je v priamom kontakte s ložiskom. Súčasťou zariadenia je bezdrátový modul vysielajúci v pásme 2,4 GHz. [15, 20]

Obr. č. 10.19 Bezdrátový monitorovací systém [15]



11 Ekonomický vplyv a účinnosť kombinovanej plynovej turbíny s termoelektrickým generátorom

Výskum Medzinárodnej činnosti multidisciplinárnych vied a inžinierstva prezentuje návrh termoelektrického generátora pre plynovú turbínu a hodnotí ekonomické dôsledky. Plynová turbína, ktorej prevádzkový stav bol použitý pre návrh termoelektrického generátora, je z tepelnej elektrárne Ughelli v Nigérii.

11.1 Inžiniersko-ekonomická analýza

Analýza sa zaoberá koncepciami a technikami, ktoré sú užitočné pri hodnotení systémov, produktov a služieb v súvislosti s nákladmi. Slúžia na zodpovedanie mnohých rôznych druhov otázok, ako sú:

- Ktoré inžinierske projekty stoja za to?
- Ktoré inžinierske projekty by mali mať vyššiu prioritu?
- Ako by mali byť projektované inžinierske projekty?

Základné koncepty zahŕňajú cash flow, úrokovú sadzbu a časovú hodnotu peňazí.

Tri bežne používané metódy ekonomickej analýzy sú:

- Analýza súčasnej hodnoty
- Analýza ročnej hodnoty
- Analýza návratnosti

Ekvivalentná jednotná ročná hodnota je metóda, ktorá sa bežne používa na porovnávanie alternatív, to znamená, že všetky príjmy a výdaje (nepravidelné aj pravidelné) sa musia previesť na ekvivalentnú jednotnú ročnú sumu (suma obdobia, ktorá je rovnaká v každom období). Tento výskum porovnáva náklady na celkový výkon plynovej turbíny s termoelektrickým generátorom (GT/TEG) a plynovej turbíny bez termoelektrického generátora (GT) na základe ekvivalentnej jednotnej ročnej hodnoty (EUAW).

Prevádzkové parametre plynovej turbíny sú:

Výkon alternátora = 25 MW

Prúd alternátora = 1100 A

Výstupné napätie na alternátore = 11 kV

Frekvencia alternátora = 50 Hz

Účinnosť turbíny = 0.342

Rýchlosť alternátora = 7280 ot/min

Vstupná teplota turbíny = 1200°C
Teplota výfukových plynov = 520°C
Vstupný tlak turbíny = 1.4 MPa
Typ turbíny = Axiálny
Stupne turbíny = 3
Kompresorové stupne = 17
Vstupná teplota chladiaceho oleja = 59°C

Dôležitou hodnotou je najmä teplota výfukových plynov, ktoré slúžia ako zdrojová teplota termoelektrického generátora. Na základe veľkosti výfukovej teploty plynovej turbíny bol vybraný vhodný termoelektrický materiál – telurid olovnatý (PbTe). Termoelektrický generátor bol potom navrhnutý z prevádzkových podmienok plynovej turbíny, pričom hlavné komponenty sú dimenzované.

11.2 Návrh termoelektrického generátora

Základné parametre navrhnutého termoelektrického generátora:

Seebeckov koeficient (α) = 628 $\mu\text{V/K}$
Bezrozmerná materiálová veličina pre určenie účinnosti (ZT) = 1.5
Teplotný rozsah = 300-800 K
Odpor = 0.011 Ω
Napätie = 0,1777 V
Výkon = 32,2 W
Účinnosť = 0,169
Celková kombinovaná účinnosť s turbínou = 0,453

11.3 Ekonomické vyhodnotenie

Výsledky nákladov na prevádzku plynovej turbíny sú:

Počiatkové náklady na investíciu = 16 828 125 \$
Náklady na prevádzku a údržbu = 53 1562.5 \$
Zostatková hodnota = 1 270 181.25 \$
Životnosť zariadenia = 20 rokov
Minimálna miera návratnosti = 8.75 %

Výsledky nákladov na prevádzkovanie plynovej turbíny s generátorom sú:

Počiatkové náklady na investíciu = 16 936 101.2 \$

Náklady na prevádzku a údržbu = 492 187.5 \$

Zostatková hodnota = 1 307 467.01 \$

Životnosť zariadenia = 20 rokov

Minimálna miera návratnosti = 8.75 %

Ekvivalentná jednotná ročná hodnota turbíny bez generátora = - 2,316,738.107 \$

Ekvivalentná jednotná ročná hodnota turbíny s generátorom = - 2,288,231.908 \$

Aj keď je percentuálny prírastok ekvivalentnej jednotnej ročnej hodnoty turbíny s generátorom malý (1,24 %), generátor je preferovaný vzhľadom k jeho vyššej účinnosti a spoľahlivosti. Účinnosť plynovej turbíny sa značne zvýšila na 0,453 z 0,342, takže došlo k celkovému zvýšeniu účinnosti o 32,46 %. Ročné výdaje pre turbínu s generátorom sú 2 288 231,908 \$ a pre samotnú turbínu 2,316 738,10 \$, preto sa zistilo, že zariadenie kombinované s generátorom je ekonomickejšie. Ekonomická analýza ukazuje, že projekt je realizovateľný.

Dôležitou fázou projektu bude experimentovanie. Ukáže vplyv termoelektrického generátora na rôzne systémy zariadenia s plynovou turbínou a overí dosiahnutý výsledok. Vzhľadom na energetickú krízu v krajine a veľký počet existujúcich plynových turbín je ešte potrebné vykonať viac výskumov a najmä experimentov pred zrealizovaním. [21]

12 Záver

V bakalárskej práci boli popísané základné termoelektrické javy, rozdelenie termočlánkov podľa ich využitia, samotné využitie a materiály pre ich zhotovenie. Ďalej boli zhodnotené výhody a nevýhody ich používania, čím boli splnené hlavné ciele práce.

Z poznatkov, získaných pri študovaní danej problematiky je zjavné, že termoelektrické články majú veľmi široké využitie, či už ako termoelektrické snímače teploty alebo moduly TEC a TEG. Snímače, ktoré fungujú na princípe Seebeckovho javu dosiahli veľký úspech pre svoju jednoduchosť, odolnosť, široký rozsah teplôt, malú hmotnosť a zotrvačnosť a preto plnia dôležitú úlohu v meraní teplôt. Moduly TEC fungujúce na Peltierovom jave majú výborné chladiace schopnosti, ktorých využitie sa pohybuje od jednoduchých chladičov potravín a nápojov až po veľmi sofistikované systémy riadenia teploty vo vede a výskume. TEG moduly, ktoré dokážu na princípe Seebeckovho javu priamo premeniť tepelnú energiu na elektrickú majú pred sebou sľubnú budúcnosť. Viac ako polovica z celkového celosvetového energetického obratu predstavuje odpadové teplo. Termoelektrická premena odpadového tepla na elektrinu je považovaná za sľubnú technológiu pre zvýšenie elektrickej účinnosti, úsporu palív a redukciu emisií.

Termoelektrické snímače teplôt sú vyrábané najmä z kovov, zatiaľ čo termoelektrické moduly TEC a TEG z polovodičov. Polovodiče na výrobu termočlánkov TEG sú stále rozvíjajúcou sa oblasťou vo svete vedy, pretože práve od nich závisí účinnosť. Ideálny materiál by mal mať vedľa veľkého Seebeckovho koeficientu malú tepelnú vodivosť a súčasne veľkú elektrickú vodivosť, preto musia odborníci vhodné materiály modifikovať a laboratórne vyvíjať. V súčasnosti najrozšírenejšou technológiou je nanotechnológia a používanie nanokompozitných polovodičových materiálov.

Pre lepšiu predstavu prínosu termoelektrického generátora bolo súčasťou práce tiež spracovanie výskumu, ktorý sa zaoberal zavedením generátora do plynovej turbíny v elektrárni. Zistila som, že ročné výdaje na prevádzku turbíny sa znížili len málo, avšak účinnosť zariadenia značne narástla, preto sa projekt ukázal ako ekonomický a realizovateľný.

13 Zoznam použitých zdrojov

- [1] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 152 s. Malá elektrotechnická knihovna; sv. 24., ISBN 04-572-63.
- [2] KAMENČÁK, František. *Termoelektrické jevy a jejich užití*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, Vydání 1., 1975, 83 s.
- [3] TEPLIČKA, Ivan. *Fyzika*. Engima. 2015. 392 s. ISBN 978 808 133 0384
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Termoelektrické články. *Encyklopedie Fyziky* [online]. [cit. 04.02.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-homsonuv-jev>
- [5] ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd.upr. a dopln. Praha: SNTL, 1983, 371 s.
- [6] BEJČEK, Ludvík. Přehled trhu snímačů teploty do průmyslového prostředí. *Automa*. 2016. [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/prehled-trhu-snimacu-teploty-do-prumysloveho-prostredi-2009_06_39160_4939/
- [7] KLEPÁRNÍK, Ján. Termočlánky. [online]. [cit. 06.03.2019]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [8] HYRŠ, Jan. *Měření teploty termočlánky*. Brno, 2012. 32 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=50343
- [9] Termoelektrický jav. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky věd. [online]. [cit. 02.03.2019]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-magnetik-a-supravodicu/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev>
- [10] DEVILBISS, R. Thermoelectric thermal regulation systems. *Electronic cooling*. [online]. [cit. 01.02.2019]. Dostupné z: <http://www.electroniccooling.com/1996/05/thermoelectric-thermal-regulation-systems/>
- [11] Thermoelectric Technical Reference. *Ferrotec USA*. [online]. [cit. 08.01.2019]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref04/>

- [12] An Introduction To Thermoelectric cooling module. *Huimao*. [online]. [cit. 08.01.2019]. Dostupné z: <http://www.huimao.com/about/show.php?lang=en&id=4>
- [13] PRIMARY USES FOR THERMOELECTRIC MODULES PR. *MARLOW*. [online]. [cit. 08.01.2019]. Dostupné z: <https://www.marlow.com/resources/thermoelectric-technology-guide/ii-tem-primary-uses>
- [14] Termoelektrický generátor. *Strojár Inovátor*. [online]. [cit. 08.01.2019]. Dostupné z: <http://www.stojar-inovator.sk/projekty-2016/134-projekt-28-termoelektricky-generator>
- [15] BRÁZDIL, Marián. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *Tzb info* [online]. 2013 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektricky-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [16] KABEŠ, Karel. Význam termoelektrických generátorů rychle roste. *Elektro* [online]. 2011 [cit. 09.03.2019]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyznam-termoelektricky-generatoru-rychle-roste--9847
- [17] Termoelektrické materiály. *Univerzita Pardubice. Fakulta chemicko-technologická*. [online]. [cit. 03.02.2019]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>
- [18] VOBOŘIL, David. Radioizotopový termoelektrický generátor - tajemství energie v dalekém vesmíru. *Oenergetice* [online]. 2015 [cit. 03.02.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/radioizotopovy-termoelektricky-generator-tajemstvi-energie-v-dalekem-vesmiru/>
- [19] GROHMANN, Jan. Korejští vědci představili termoelektrický nátěr, který přemění teplo na elektřinu. *Hybrid* [online]. 2016 [cit. 02.03.2019]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/budoucnost-obnovitelnych-zdroju-vyuziti-odpadniho-tepla>
- [20] Efektivní zisk malého množství energie (Energy harvesting). *Vyvoj. hw* [online]. 2017 [cit. 15.3.2019]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/adp5091-efektivni-zisk-maleho-mnozstvi-energie-energy-harvesting.html>
- [21] FRANCIS, O., I. KINGSLEY O. a I. O. U OKAFOR. "Assessment of Economic Impact and Efficiency of a Combined Gas Turbine with a Thermoelectric Generator", *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*,. *International*

- Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering* [online]. 2012(4) [cit. 15.02.2019].
- [22] Termoelktrický článek. *umel.feec.vutbr.* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_8_2.htm?fbclid=IwAR2DR2pD3QcF4c-ajAYRRo_29--9SPxmoIaRQ6vu8P6W0w7v-OBmN3bQUyY
- [23] SCIENTIFIC GUIDE TO UNDERSTANDING THERMOELECTRIC GENERATORS AND TEG PRODUCTS FOR CONVERTING HEAT TO TEG POWER!. *Demgmar.* [online]. 2017 [cit. 15.3.2019]. Dostupné z: : <https://www.tegmart.com/info/guide-to-understanding-and-using-teg-power-and-products/>
- [24] Jaderný zdroj energie sondy New Horizons. *DATABÁZE KOSMICKÝCH SOND PRO PRŮZKUM TĚLES SLUNEČNÍ SOUSTAVY.* [online]. 2006 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://spaceprobes.kosmo.cz/index.php?cid=160>
- [25] NASA builds its next Mars rover mission. *Phys.org.* [online]. 2017 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2017-11-nasa-mars-rover-mission.html>

14 Zoznám obrázkov

Obr. č. 5.1 Vodivosť typu N	4
Obr. č. 5.2 Vodivosť typu P	5
Obr. č. 6.1 Schéma Seebeckovho javu	6
Obr. č. 7.1 Schéma Peltierovho javu	7
Obr. č. 7.2 Pripojenie termočlánku do obvodu.....	8
Obr. č. 8.1 Schéma Thomsonovho javu	9
Obr. č. 8.2 Schéma pozitívneho Thomsonovho javu	10
Obr. č. 8.3 Schéma negatívneho Thomsonovho javu.....	10
Obr. č. 9.1 Rozdelenie termoelektrických článkov	11
Obr. č. 9.2 Základné zapojenie termočlánkov.....	12
Obr. č. 9.3 Ukážka Seebeckovej termoelektrickej rady materiálov	13
Obr. č. 9.4 Najpoužívanejšie termoelektrické články	14
Obr. č. 9.5 Charakteristiky niektorých typov termočlánkov	14
Obr. č. 10.1 Termoelektrický modul	16
Obr. č. 10.2 Princíp termoelektrického modulu TEC	17
Obr. č. 10.3 Výkon materiálov pri rôznych teplotách.....	19
Obr. č. 10.4 rôzne modifikácie TEC modulov	20
Obr. č. 10.5 Termoelektrický vinotéka	20
Obr. č. 10.6 Procesor počítača chladený termoelektrickým chladičom	21
Obr. č. 10.7 Termálny cyklér	22
Obr. č. 10.8 Princíp termoelektrického generátora TEG.....	22
Obr. č. 10.9 Porovnanie termoelektrickej účinnosti a teoretickej maximálnej účinnosti.....	24
Obr. č. 10.10 Účinnosť priemyselovo používaných a laboratórne vyvíjaných termoelektrických materiálov.....	24
Obr. č. 10.11 Štruktúra tvz. Plneného skutteruditu $\text{YbCo}_4\text{Sb}_{12}$	25
Obr. č. 10.12 Termoelektrický generátor spaľujúci koks.....	26
Obr. č. 10.13 Prvý komerčný polovodičový termoelektrický generátor	26
Obr. č. 10.14 Rádioizotopický termoelektrický generátor	27
Obr. č. 10.15 Výskumné vozidlo Curiosity rover	28
Obr. č. 10.16 Termoelektrický generátor vo výfukovom potrubí vozidla BMW X6	29
Obr. č. 10.17 Postup aplikácie termoelektrického náteru objaveného kórejskými vedcami... 29	
Obr. č. 10.18 Externý termoelektrický generátor pre automatický teplovodný kotol.....	30
Obr. č. 10.19 Bezdátový monitorovací systém	31