

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití termoelektrických jevů v elektrotechnice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek MARCEL**
Osobní číslo: **E10B0073P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Využití termoelektrických jevů v elektrotechnice**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

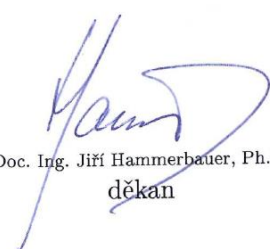
1. Popište termoelektrické jevy
2. Porovnejte výhody a nevýhody jednotlivých termočlánků
3. Uveďte využití termočlánků v praxi

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Krpal**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá tematikou termoelektrických jevů a jejich přímou aplikací v elektrotechnice. Popisuje jejich historii a obsahuje rozbor základních pojmů jednotlivých jevů. Obsáhle pojednává o využití termoelektrických článků. Závěrem je prakticky navržena, zkonstruována a nasimulována aplikace termoelektrického generátoru pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla spalovacích motorů.

Klíčová slova

Termoelektrický jev, Seebeckův jev, Peltierův jev, termoelektrický článek, termočlánek, termoelektrický generátor, teplota, alternativní zdroj, odpadní teplo, sklízení energie.

Abstract

The submitted thesis deals with the theme of thermoelectric phenomena and their direct applications in electrical engineering. The work describes its history and includes an analysis of the basic terms of the individual effects. The thesis extensively discusses the use of thermocouples. Also the application of a thermoelectric generator is practically designed, constructed and simulated to produce electricity from waste heat of combustion engines.

Key words

Thermoelectric effect, Seebeck effect, Peltier effect, thermocouple, thermoelectric generator, temperature, alternative source, waste heat, energy harvesting.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Radek Marcel

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Křpalovi, za cenné profesionální rady, připomínky, ochotu při přípravě laboratorní simulace, pozitivní podporu a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Ph.D. Pavlovi Šteklovi za zapůjčení termokamery a především za poskytnutou odbornou asistenci při jejím užití.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 HISTORIE TERMOELEKTRICKÝCH JEVŮ	11
2 ROZBOR TERMOELEKTRICKÝCH JEVŮ	13
2.1 KONTAKTNÍ NAPĚTÍ	13
2.2 DODATEČNÝ POTENCIÁLOVÝ ROZDÍL	14
2.3 TERMOELEKTRICKÉ NAPĚTÍ	15
2.4 SEEBECKŮV JEV	15
2.5 SEEBECKŮV KOEFICIENT	16
2.6 PELTIERŮV JEV	18
2.7 PELTIEROVO TEPLO	18
3 ROZDĚLENÍ TERMOELEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ	18
3.1 TERMOČLÁNKY PRO SNÍMÁNÍ TEPLoty	19
3.1.1 Typy termočlánků	20
3.1.2 Konstrukce termočlánkových snímačů	21
3.1.3 Odchyšky při měření s termočlánky	23
3.2 PELTIEROVY CHLADICÍ MODULY (TEC)	24
3.2.1 Výroba a konstrukce TEC modulů	25
3.2.2 Využití TEC modulů	28
3.3 TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY (TEG)	32
3.3.1 Výroba a konstrukce TEG modulů	33
3.3.2 Vlastnosti TEG modulů	34
3.3.3 Využití TEG modulů	35
4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ TEG MODULU	41
4.1 NÁVRH CHLADICÍHO OKRUHU PRO TEG MODUL	42
4.1.1 Návrh, výroba a sestavení chladicího bloku TEG modulu	43
4.1.2 Výběr TEG modulu	45
4.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK TEG MODULU	46
4.2.1 Měření výstupního elektrického napětí naprázdno	46
4.2.2 Měření maximálního výkonu pro různé rozdíly teplot	49
4.3 ZÁVĚR MĚŘENÍ TEG MODULU	54
ZÁVĚR	55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	56
SEZNAM PŘÍLOH	57

Seznam symbolů a zkratek

A	výstupní práce [eV]
e	náboj elektronu [C]
U_{AB}	kontaktní napětí [V]
U'_{AB}	dodatečný potenciálový rozdíl [V]
k	Boltzmannova konstanta
ϑ	absolutní teplota [°C]
n_o	koncentrace volných elektronů
U_S	Seebeckovo termoelektrické napětí [μ V]
α	Seebeckův koeficient [μ V.K ⁻¹]
a, b	Seebeckovy konstanty [μ V.K ⁻¹]
Q_P	Peltierovo teplo [J]
Q_J	Jouleovo teplo [J]
Q	celkové teplo termočlánkem [J]
TEC	Peltierův chladič článek (thermoelectric cooler)
TEG	Termoelektrický generátor (thermoelectric generator)
DFB	distributed feedback
RTG	radioizotopový termoelektrický generátor
T_H	teplota teplé strany [°C]
T_C	teplota studené strany [°C]
ΔT	rozdíl teplot [°C]
U	el. napětí [V]
I	el. proud [A]
P	el. výkon [W]
R_Z	proměnný zátěžový odpor [Ω]

Úvod

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s problematikou termoelektrických jevů a jejich přímým využitím v elektrotechnice. První část se zabývá historií jejich objevování a fyzikální podstatou základních termoelektrických jevů. Následně je popsáno rozdělení termoelektrických článků dle vlastního použití, včetně využití samého. Termoelektrické články byly v elektrotechnice používány již od jejich počátků jako teplotní čidla a mají do dnes nezastupitelné místo v oboru měření teplot. V poslední době jejich popularita narůstá s vývojem polovodičů, užitím polovodičů při výrobě termočlánků vzrostla především jejich účinnost. Jednak se využívá schopnosti termoelektrických článků ochlazovat, například v mikroprocesorové technice a naopak také schopnosti vyrábět elektrickou energii přímou přeměnou z tepelné energie.

Druhá část se věnuje přímému využití termoelektrického generátoru jako alternativního zdroje energie s využitím odpadního tepla. Konkrétně se jedná o laboratorní simulaci jeho aplikace v automobilovém průmyslu na výfukovém potrubí. Je popsána příprava podmínek pro odměření termoelektrického generátoru v této aplikaci, postup měření a toto měření je následně vyhodnoceno. V rámci tohoto měření budou zjištěny vlastnosti, parametry, výhody a nevýhody termoelektrických generátorů. Bude vyhodnocena ekonomická stránka jejich využití a jejich účinnost. Na závěr práce pojednává nad dalším použitím termočlánků i v jiných aplikacích a nad jejich budoucností v elektrotechnice.

1 Historie termoelektrických jevů

První zmínka o termoelektrickém jevu je údajně připisována ruskému vědci a akademikovi, působícímu v Petrohradě, F. N. T. Epinusovi již v roce 1758. Zjistil tehdy, že v uzavřeném obvodu tvořeném dvěma vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, vzniká elektrické napětí. Také zjistil, že se tak děje pouze mají-li jejich spojené konce rozdílnou teplotu. Tato skutečnost je většinou uváděna v prorusky orientované literatuře z doby existence Sovětského svazu. [1]

Oficiálně uznávaným objevitelem termoelektrického jevu je německý fyzik, původem z Estonska, **Thomas Johann Seebeck** (1770 - 1831), který působil na univerzitě v Jeně. Později se vrátil na univerzitu v Berlíně, kde dříve studoval a tam se zabýval elektrickou magnetizací železa a oceli. V roce 1821 tak náhodně objevil, že mezi dvěma konci vodivé tyčky s rozdílem teplot ΔT existuje elektrické napětí v řádech několika mikrovoltů na stupeň Celsia. Stalo se tak při jeho pokusu umístit kompas mezi spoje mědi a bismutu, kdy jeden spoj zahříval. Proud, který v tomto uzavřeném obvodu začal protékat, vytvořil magnetické pole a to pak vychýlilo stříčku kompasu. Původně se mylně domníval, že vzniklé napětí je důsledkem magnetické polarizace kovů teplotním spádem a tak tento jev nazval termomagnetickým. Dnes tento jev známe pod jeho jménem jako **Seebeckův jev**. V souvislosti s tímto objevem v roce 1823 představil termoelektrickou řadu elektrických napětí materiálů závisící na teplotním rozdílu a molekulární struktuře, která ve svých hlavních rysech platí do dnes. [2]



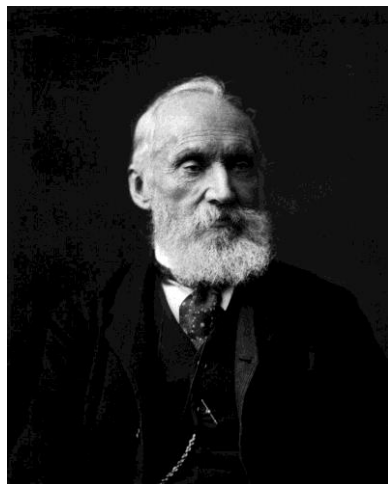
Obr. 1.1 J. T. Seebeck



Obr. 1.2. J. Ch. A. Peltier

O několik let později tuto problematiku zkoumal francouzský fyzik a hodinář **Jean Charles Athanase Peltier** (1785 - 1845) a v roce 1834 nechal protékat stejnosměrný elektrický proud dvěma do série spojenými vodiči z různých materiálů. Přičemž zjistil, že elektrický proud protékající obvodem jedním směrem spoj ochlazuje a elektrický proud protékající opačným směrem spoj naopak ohřívá. Jedná se tedy o jev opačný k Seebeckovu jevu a byl pojmenován po svém objeviteli - **Peltierův jev**. [3]

Wiliam Thomson (1824 - 1907), skotský fyzik a jeden z nejvýznamnějších fyziků vůbec (spíše znám jako lord Kelvin), Peltierův a Seebeckův jev podrobně zkoumal. Potvrdil jejich vzájemnou souvislost, přičemž objevil třetí termoelektrický jev. Experimentálně potvrdil, že při průtoku elektrického proudu homogenním vodičem je pohlcováno, respektive uvolňováno ještě další množství tepla (Thomsonovo teplo). Třetí termoelektrický jev dnes známe jako **Thomsonův jev**. Ohříváním dlouhého vodiče v jeho středu vznikne na obou stranách teplotní spád i přes stejnou teplotu jeho konců. Pokud ovšem vodičem nechal protékat stejnosměrný elektrický proud, jeden konec vodiče se oproti původní teplotě ochlazoval a druhý naopak ohříval. Takto prokázal vzájemnou neoddělitelnost Peltierova a Thomsonova jevu. [3]



Obr. 1.3 W. Thomson



Obr. 1.4 C. Benedicks

Kolem roku 1921 prezentoval **Carl Benedicks** (1875 - 1958) objev zatím posledního známého termoelektrického jevu – **Benedicksův jev**. Jeho hodnota je určena pouze velikostí teplotního gradientu. Tento jev pojednává o tom, že i při shodné teplotě konců vodiče je mezi nimi elektrické napětí, za předpokladu existujícího teplotního gradientu v některé jeho části. Toto napětí je u kovů téměř neměřitelné a proto byl Benedicksův jev poprvé prokázán až u polovodičů, konkrétně na germaniu. [3]

Po shrnutí těchto jevů můžeme říci, že jejich podstata se dělí na ty, při kterých vzniká z rozdílu teplot termoelektrické (přesněji termoelektromotorické) napětí – Seebeckův a Benedicksův jev. A na ty jevy, při kterých je průtokem stejnosměrného elektrického proudu uvolňováno a naopak pohlcováno teplo – Peltierův a Thomsonův jev. Tyto objevy ve své době rozhodně nehrály hlavní roli. Vzhledem k jejich velmi nízké účinnosti jako zdroje elektrické energie byly jednoduše zastíněny objevem elektromagnetické indukce Michaela Faradaye (1791 - 1867). Své místo v elektrotechnice si našly, teprve až s příchodem polovodičů.

2 Rozbor termoelektrických jevů

2.1 Kontaktní napětí

V atomu každého kovu najdeme minimálně jeden valenční elektron, který je k jádru vázán jen velmi malými silami a může být snadno uvolněn. Volně se pohybující pak tvoří tzv. elektronový plyn. Aby tyto elektrony mohly být uvolněny mimo kov, je zapotřebí jim dodat energii (v našem případě tepelnou) tak, aby jeho kinetická energie byla větší než síla, které ho drží uvnitř (Coulombova síla). Hovoříme tedy o vykonané práci A , pojmenovanou výstupní práce. Pro ni platí:

$$A = e \cdot U \text{ [eV]}, \quad (2.1)$$

kde e je konstantní ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ C) pro všechny kovy a značí velikost náboje elektronu. Veličina U určuje velikost výstupního napětí a to (stejně tak i výstupní práce A) se liší dle zvoleného kovu. [3]

Hodnoty výstupních napětí některých kovů jsou uvedené v tabulce 2.1. Pokud tedy spojíme dva kovy s různými výstupními napětími (vlastními potenciály), vznikne na spoji kontaktní napětí, které odpovídá rozdílu těchto potenciálů. Pro kontaktní napětí platí vztah:

$$U_{AB} = U_B - U_A, \quad (2.2)$$

za předpokladu, že U_A a U_B jsou výstupní napětí dvou různých kovů.

Kov	U [V]	Kov	U [V]
Na - sodík	2,33	Sn - cín	4,51
K - draslík	2,26	Pb - olovo	4,15
Cs - cesium	1,93	Sb - antimon	4,02
Cu - měď	4,29	Bi - vizmut	4,62
Ag - stříbro	4,73	Co - cobalt	3,72 – 4,25
Au - zlato	4,76	Fe - železo	4,75 – 4,77
Mg - hořčík	3,69	Ni - nikl	4,98 – 5,03
Zn - zinek	4,25	Rh - rhodium	4,75
Al - hliník	4,25	Pt - platina	5,44 – 6,37
Ge - germanium	4,55	Se - selén	4,89

Tab. 2.1 Příklady výstupních napětí některých kovů.

2.2 Dodatečný potenciálový rozdíl

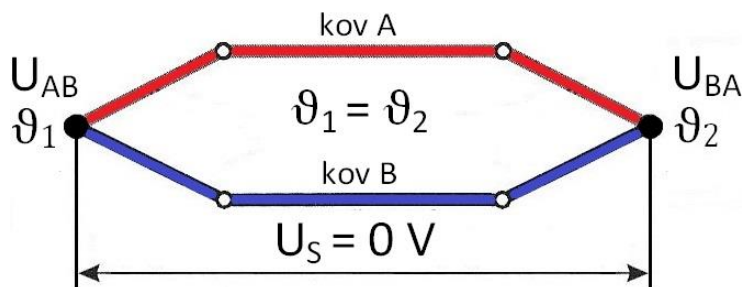
Víme-li, že koncentrace volných elektronů v jednotlivých kovech je různá, měli bychom ji při výpočtu výsledného termoelektrického napětí brát rovněž v úvahu. U kovů je tato rozdílnost zanedbatelná, ale ve srovnání s polovodiči ji zanedbat nelze. Velikost dodatečného potenciálového rozdílu lze vyjádřit vztahem 2.3:

$$U'_{AB} = \frac{k \cdot \vartheta}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (2.3)$$

kde k značí Boltzmannovu konstantu, e velikost náboje elektronu (konst.), ϑ absolutní teplotu a n_o koncentraci volných elektronů v jednotlivých prvcích. [3]

Z předchozích vztahů tedy vyplývá, že pro výpočet kontaktního napětí jednoho spoje platí vztah 2.4.

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot \vartheta}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \quad (2.4)$$



Obr. 2.1 Teplotně ustálený termoelektrický obvod. [5]

2.3 Termoelektrické napětí

Pokud platí, že teploty obou spojů jsou stejné, rovnají se i jejich kontaktní napětí (obr. 2.1). V obvodu tedy nevzniká žádné termoelektrické (Seebeckovo) napětí U_S . Kontaktní napětí je závislé na teplotě, proto v případě, že je mezi dvěma spoji rozdíl teplot, vznikne mezi nimi termoelektrické napětí. Zde již vlastně hovoříme o Seebeckovo napětí, které je dáno součtem obou kontaktních napětí a je dané následujícím vztahem. [3]

$$U_S = U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + \frac{k \cdot \vartheta_1}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + U_A - U_B + \frac{k \cdot \vartheta_2}{e} \cdot \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} \quad (2.5)$$

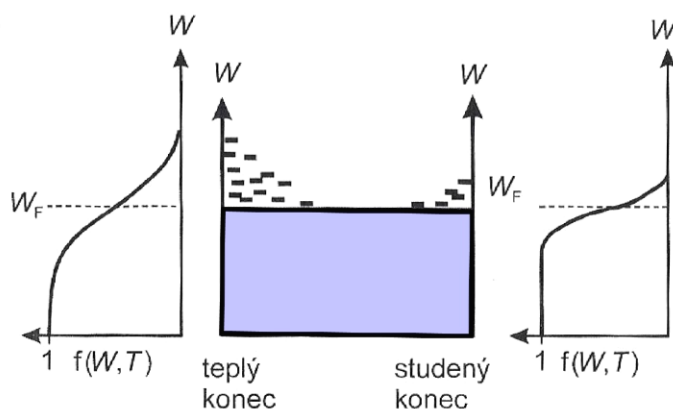
2.4 Seebeckův jev

Z fyzikálního pohledu tento jev vzniká tím, že v části termoelektrického obvodu, která má vyšší teplotu než studený konec, mají nositelné náboje větší energii než v části chladné a tak dochází k jejich difuzi (pronikání) z části s vyšší teplotou do části s nižší teplotou. Jde o snahu látek s pohyblivými částicemi udržovat jejich koncentraci v celém jejím objemu rovnoměrně. Díky tomu obvodem prochází elektrický proud způsobený teplotním spádem. Také vzniká na jedné straně zvýšená koncentrace kladných a na druhé straně záporných nábojů. Celý tento efekt je založen na rozdílu Fermiho energií (hladin) spojených materiálů. Rozdíl hladin se kompenzuje vznikem kontaktního napětí a to je ve stavu ustálené teploty na obou koncích stejné. Fermiho energie je ovšem závislá na teplotě a tím se pak poměr kontaktních napětí v obvodu mění (obr. 2.2). Seebeckův jev lze přirovnat k bimetalu, kde různé teplotní roztažnosti kovů přirovnáme k různým hodnotám Fermiho energie. Následná

změna teploty pak způsobuje vychýlení bimetalu, v našem případě narůstá Seebeckovo (termoelektrické) napětí mezi oběma konci. Seebeckovo napětí lze také vyjádřit vztahem:

$$U_S = \alpha \cdot \Delta\vartheta \text{ [\mu V]}, \quad (2.6)$$

kde α znázorňuje Seebeckův koeficient a $\Delta\vartheta$ rozdíl teplot mezi oběma spojenými konci. [4, 5]



Obr. 2.2 Závislost rozložení nositelů náboje na Fermiho hladinách. [5]

2.5 Seebeckův koeficient

Velikost termoelektrického napětí (v tomto případě Seebeckovo napětí) U_S mezi vodiči z různých materiálů, na jejichž spojích existuje rozdíl teplot $\Delta\vartheta$, můžeme vyjádřit rovnicí 2.6, kde α je tedy Seebeckův koeficient termoelektrického napětí. Ten je vyjádřen velikostí termoelektrického napětí pro teplotní rozdíl jeden stupeň Kelvina. Toto napětí je většinou udáváno v μV , proto platí rovnice 2.7:

$$\alpha = \frac{U_S}{\Delta\vartheta} = \frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \text{ [\mu V} \cdot \text{K}^{-1}]. \quad (2.7)$$

Hodnoty Seebeckových koeficientů jsou stanoveny na základě praktického měření jednotlivých kovů vůči platině, či olovu. Ve vodičích dosahuje hodnot v řádech desítek mikrovoltů na stupeň Kelvina, v polovodičích pak více než sto mikrovoltů na stupeň Celsia. Pro vyšší teplotní rozdíly je nutné počítat se značnou nelinearitou závislosti napětí na teplotě. Rozdíl velikostí Seebeckových koeficientů mezi běžnými kovy a polovodiči je patrně vidět v tabulce 2.2. [3]

Kov	α [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]	Polovodič	α [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]
Sb - antimon	35	MoS	-770
Fe - železo	15	ZnO	-714
Mo - molybden	7,6	CuO	-696
W - wolfram	3,6	FeO	-500
Cu - měď	3,2	Fe ₃ O ₄	-430
Zn - zinek	3,1	SnO	-139
Au - zlato	2,9	CdO(n)	-41
Pb - olovo	0,0	CuS	-7
Al - hliník	-0,4	FeS	26
Konstantan	-3,9	CdO(p)	30
Hg - rtuť	-4,4	NiO	240
Na - sodík	-6,5	Mn ₂ O ₃	385
Ni - nikl	-20,8	Cu ₂ O	1000
Bi - bismut	-68		

Tab.2.2 Porovnání hodnot Seebeckova koeficientu kovů a polovodičů.

V praxi je ovšem velmi obtížné přesně určit koncentraci volných elektronů v kovech, protože ji ovlivňuje mnoho faktorů při výrobě. Proto byly experimentálně změřeny Seebeckovy konstanty vybraných kovů - lineární a [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$] a kvadratická b [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-2}$]. Jejich hodnoty jsou vztaženy vůči olovu nebo platině. Pro tyto konstanty byl stanoven empirický vzorec 2.8 vyjadřující termoelektrické napětí, bez potřeby znát přesné koncentrace volných nábojů. [3]

$$U_S = (a_A - a_B) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \frac{1}{2} \cdot (b_A - b_B) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)^2 \quad [\mu\text{V}] \quad (2.8)$$

Přibližné hodnoty těchto lineárních a kvadratických Seebeckových konstant pro některé vybrané kovy můžeme vidět v tabulce 2.3.

Kov	a [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]	b [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-2}$]
Antimon	35,6	0,145
Železo	16,7	-0,0297
Měď	2,71	0,0079
Olovo	0	0
Platina	-3,03	-3,25
Nikl	-19,1	-3,02
Konstantan	-38,1	-0,0888
Bizmut	-74,4	0,032

Tab. 2.3 Seebeckovy konstanty některých kovů vztažené k olovu.

2.6 Peltierův jev

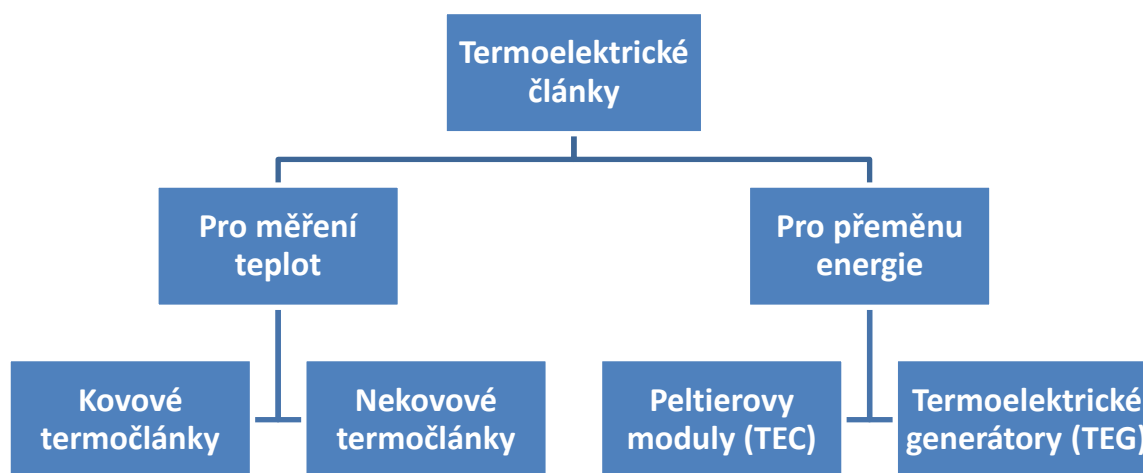
Jedná se vlastně o jev inverzní k Seebeckovu jevu. Pokud na termoelektrický obvod připojíme zdroj stejnosměrného napětí, pak jím bude protékat stejnosměrný proud. Dle jeho směru se pak na spojích dvou vodičů, tvořící tento obvod, bude určité množství tepla buď uvolňovat, nebo naopak pohlcovat. Toto teplo nazýváme teplem Peltierovým. [3]

2.7 Peltierovo teplo

Ve spoji dvou kovů se tedy uvolňuje a pohlcuje Peltierovo teplo Q_P , navíc vzniká Jouleovo teplo Q_J . Pokud je Peltierovo teplo uvolňováno, spoj se zahřívá ($+Q_P$). Je-li pohlcováno, spoj se ochlazuje ($-Q_P$). Celkové teplo Q , které v termoelektrickém článku vzniká průchodem stejnosměrného proudu, můžeme vyjádřit logickým vztahem 2.9. [3]

$$Q = Q_J \pm Q_P \quad [J] \quad (2.9)$$

3 Rozdělení termoelektrických článků



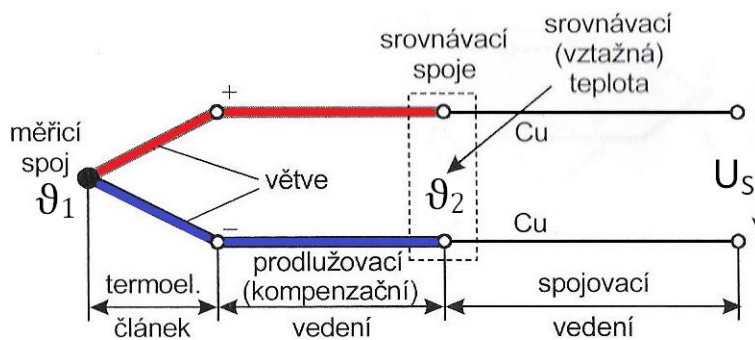
Obr. 3.1 Rozdělení termoelektrických článků.

Termoelektrické články můžeme z hlediska využití a použitých materiálů rozdělit do dvou hlavních částí, tak jak vyplývá z výše znázorněné hierarchie (obr. 3.1). Termoelektrické články sloužící pro měření teplot a pro přeměnu energie tepelné na elektrickou a naopak. Články pro snímání teplot jsou vyráběny především z kovů, zatím co články pro přeměnu energie jsou vyráběny výhradně z polovodičů.

3.1 Termočláanky pro snímání teploty

Termočlánek je elementární prvek tvořený spojením dvou různých materiálů, který je využíván výhradně jako senzor pro snímání teploty. Využívá principu Seebeckova jevu, tedy přímé přeměny tepelné energie na elektrickou. V elektrotechnice je nejrozšířenějším snímačem teploty, především pro svou jednoduchost a široký teplotní rozsah. Přesnost termočláneků dnes při měření teplot dosahuje mnohdy až $\pm 0,1$ °C. To je výsledkem dlouholetého vývoje výrobních postupů a složení materiálů. Termočláanky jsou nejčastěji vyráběné ze dvou kovů. To jim zajišťuje velké množství výhod, kterými jsou:

- Nízká teplotní setrvačnost – téměř okamžitá reakce na změny teplot
- Nízká tepelná kapacita – k jeho ohřátí stačí pouze malé množství tepla
- Vysoká citlivost – tím také poměrně velká přesnost
- Možnost měření teplot i na velmi dlouhou vzdálenost od měřeného místa
- Široký teplotní rozsah (přibližně -250 °C až 1600 °C)



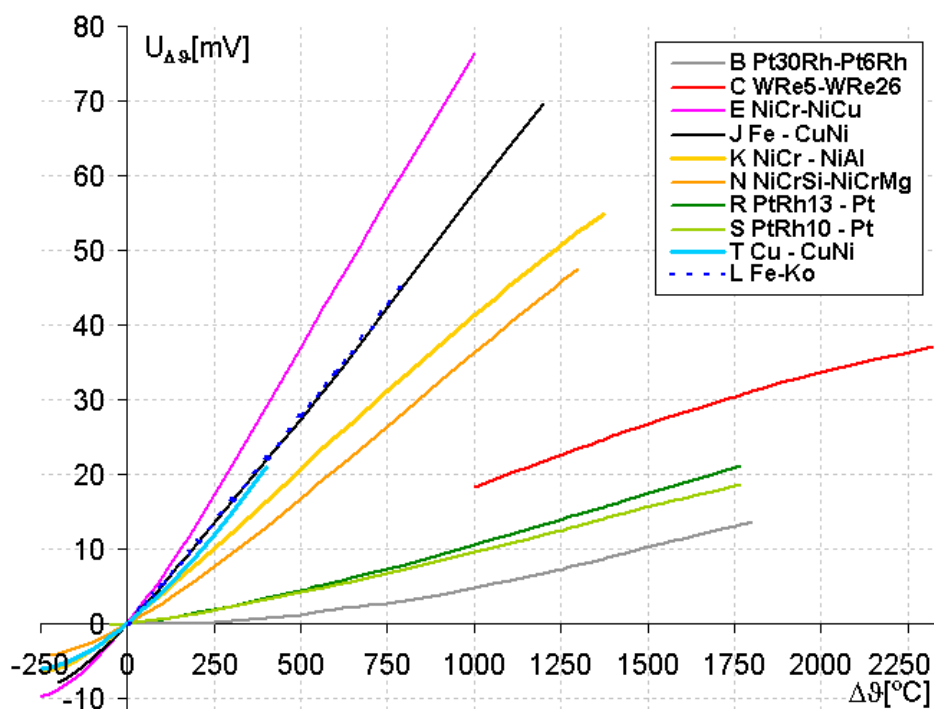
Obr. 3.2 Terminologie termočláanky. [5]

Na obrázku 3.2 je znázorněno obecné názvosloví jednotlivých částí termočláanky. Při popisu terminologie z levé strany směrem vpravo je první na řadě měřicí spoj. To je místo, kde jsou materiály pevně a vodivě spojeny. Měřicí spoj umístíme do přímého nebo velmi blízkého kontaktu s měřeným prostředím o teplotě ϑ_1 . Spolu s dostatečně dlouhou částí obou větví tvoří termočlánek. Termočláanky vyrobené z běžných kovů (Fe, Cu, Al) mají prodlužovací vedení tvořeno rovněž těmito kovy. To znamená, že například termočlánek Fe-Cu bude mít jednu větev prodlužovacího vedení vyrobenou ze železa a druhou z mědi. Jedná-li se o kompenzační vedení, to slouží k prodloužení termočláanky vyrobených převážně z vzácných kovů (Pt, Au, Rh, Ag, Pd). V takovém případě musí tato levnější náhrada splňovat stejné nebo alespoň přibližně stejné termoelektrické vlastnosti a v daném teplotním rozsahu i

charakteristiku jako tyto drahé kovy. Nejedná se tedy v tomto termínu o žádnou kompenzaci. Prodlužovací vedení je ukončeno v místě, kde již nemůže být ovlivněno zdrojem tepla z měřeného místa. Zde jsou umístěny srovnávací spoje obou větví, ve kterých je vztažná teplota ϑ_2 . Ta by měla být neustále konstantní. Spojovací vedení může být tvořeno kterýmkoliv běžně používaným vodičem (Cu, Al), jelikož třetí kov vložený mezi srovnávací spoj nemá na funkci termočláнку žádný vliv. V obvodu plní funkci pouhého vodivého propojení termočláнку s citlivým měřicím přístrojem. [5]

3.1.1 Typy termočláneků

Dnes již jsou normalizovány základní páry termoelektrických materiálů pro výrobu termočláneků, které se liší svými vlastnostmi (přijatelná nelinearita napětí při vysokých teplotách, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření). Dříve se druhy termočláneků odlišovaly pomocí barev, dnes jsou značeny velkými písmeny abecedy. Typy termočláneků, jejich teplotní rozsahy a hodnoty Seebeckových koeficientů jsou uvedeny v tabulce 3.1. Na obrázku 3.3 jsou znázorněny statické charakteristiky termoelektrického napětí v závislosti na rozdílu teplot vybraných termočláneků. V České republice se nejčastěji používají levnější typy J a K. Typ J (železo-konstantan) a K (chromel-alumel) lze užívat v oxidační a inertní atmosféře. Typ J lze navíc používat v redukční atmosféře a vakuu. [5]



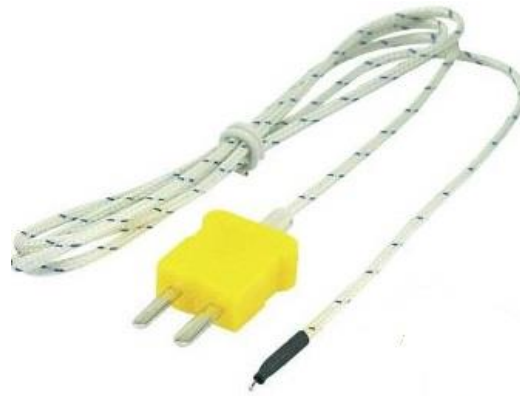
Obr. 3.3 Charakteristiky některých typů termočláneků. [25]

Typ	Složení	Rozsah teplot [°C]		Hodnota Seebeckova koeficientu α [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]		
		Dlouhodobě	Krátkodobě	Při 100 °C	Při 500 °C	Při 1000 °C
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až +1100	-180 až +1350	42	43	39
T	Cu (+) CuNi (-)	-185 až +300	-250 až +400	46	-	-
J	Fe (+) CuNi (-)	+20 až +700	-180 až +750	54	56	59
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až +1100	-270 až +1300	30	38	39
E	NiCr (+) CuNi (-)	0 až +800	-40 až +900	68	81	-
R	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700	8	10	13
S	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až +1550	-50 až +1750	8	9	11
B	PtRh30 (+) PtRh6 (-)	+100 až +1000	+100 až +1820	1	5	9
G	W (+) WRh (-)	+20 až +2320	0 až +2600	5	16	21
C	WRh5(+) WRh26 (-)	+50 až +1820	+20 až +2300	15	18	18

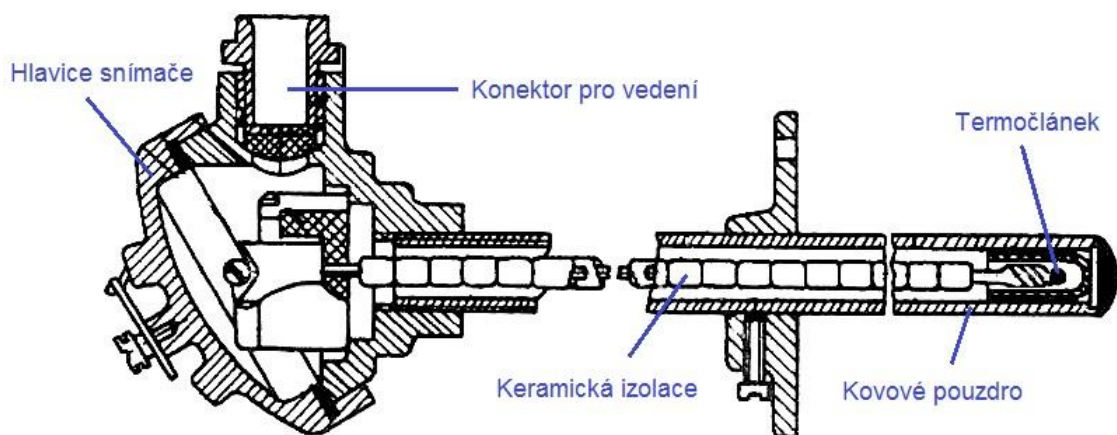
Tab. 3.1 Typy termoelektrických článků a jejich vlastnosti.

3.1.2 Konstrukce termočlávkových snímačů

Termočlávky jsou obvykle zhotoveny z tenkých drátů o průměrech 0,1 až 0,5 mm. Pro průmyslové využití pak 0,5 až 3,5 mm. Spojení jejich konců se u velmi tenkých vodičů provádí pevným mechanickým zkroucením. Dalšími způsoby jsou obloukové nebo laserové svařování a pájení. Z hotových termočlávků se pak vyrábí snímače, například jednoduché drátové teplotní sondy, jako na obrázku 3.4. Teplotní sondy jsou modifikovány pro připojení k multimetrům nebo dataloggerům. V průmyslu se volí složitější konstrukce termočlávkového snímače. Jde o tyčové, jímkové a plášťové snímače teploty. Konstrukčně se tyto snímače příliš neliší. Základem je kovové pouzdro (tyč), které je vyplněno nejčastěji keramickou izolací se dvěma kapilárami pro uložení prodlužovacího vedení termočlávků. Prodlužovací vedení je ukončeno v hlavici snímače, ve které je uložen konektor pro připojení spojovacího vedení k měřicímu přístroji. Takové pouzdro termočlávek chrání před poškozením a přímému vystavení fyzikálním, mechanickým a chemickým vlivům. Příklad takového snímače lze vidět na obrázku 3.5. [5,7]

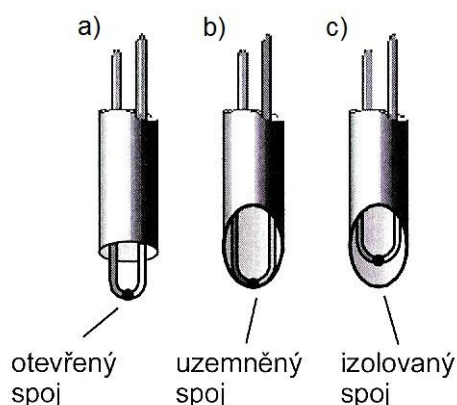


Obr. 3.4 Termočlávková teplotní sonda.



Obr. 3.5 Průmyslový snímač teploty s termočlávkem. [7]

Průmyslové termočlávkové snímače teploty mají velký rozsah využití. Podle konkrétních aplikací je možné přizpůsobit jejich všeobecnou odolnost, citlivost a také stabilitu. První takovou úpravou může být, tak jako na obrázku 3.6a, tzv. otevřený spoj. Jeho největší výhodou je vysoká citlivost a s ní spojená doba odezvy. Spoj ale nelze použít v agresivním a vlhkém prostředí. Hodí se k měření teploty proudícího plynu, kde je potřeba vysoké citlivosti. Rychlejší odezva je předností i uzemněného spoje (obr. 3.6b), který je chráněn pláštěm před vlivem měřeného prostředí. Uzemněný spoj ale může být ovlivněn elektrickým a elektromagnetickým rušením. Nejméně citlivý je pak spoj izolovaný (obr. 3.6c), který je plně ochráněn před okolními vlivy. [5]



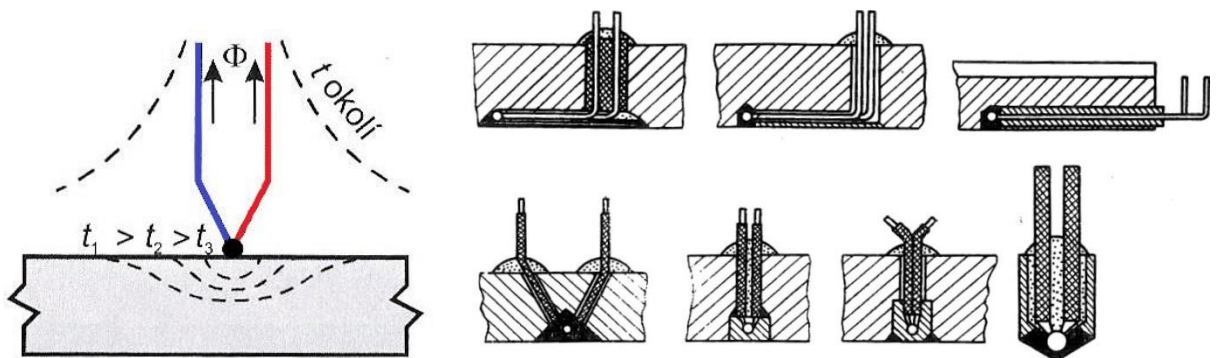
Obr. 3.6 Příklady zakončení pouzder průmyslových snímačů. [5]

3.1.3 Odchyly při měření s termočládky

Při sledování vysokých teplot pomocí termočládkových snímačů roste s teplotou i pravděpodobnost chyby měření. Izolace (případně plášť) termočládkového vedení ztrácí s rostoucí teplotou své elektrické izolační schopnosti a v termoelektrickém obvodu vznikají parazitní měřicí spoje. Tím výsledná hodnota určuje spíše než teplotu v měřeném místě teplotu samotných větví termočládku. Další příčinou chyby měření v důsledku vysokých teplot je postupná termo-chemická degradace vodičů obou větví termočládku. Ta postupně mění vlastnosti termočládku, proto je zapotřebí termočládek po určitém časovém období znovu kalibrovat. Po dlouhodobém vystavení termočládku teplotám vyšším, než pro jaký teplotní rozsah jsou určeny, může dokonce dojít k přerušení jedné z větví a tím k nenávratnému zničení. V případě drátových termočládků se mohou jejich vlastnosti měnit také mechanickým namáháním vodičů. I tak může dojít k přerušení větve. Nejvýznamnější příčinou odchylek měření je kolísání srovnávací (vztažné) teploty v termoelektrickém obvodu. Tomu lze zabránit uložením srovnávacích spojů do termostatu (zařízení, které v určitém uzavřeném prostoru udržuje stálou teplotu), použitím kompenzačního zapojení nebo číselnou korekcí. [8]

Vzhledem k velmi nízkým hodnotám termoelektrického napětí je vedení termočládku velmi náchylné na okolní rušení (elektrické, magnetické a elektromagnetické pole; parazitní kapacity a proudové smyčky). Zkroucením vedení termočládku je potlačeno magnetické pole. Pokud vedení opatříme stíněním, zbavíme ho vlivu elektrostatického a elektrického pole. [5]

K měření teplot na povrchu těles slouží většinou termočlánky bez izolační ochrany spoje. Ta má za následek zvýšení přesnosti, ale pouhým přiložením termočlánku k povrchu této přesnosti nelze plně využít. V místě dotyku spoje s povrchem tělesa je část tepla předána termočlánku. To způsobí pokles teploty v měřeném místě, jak je vidět na obrázku 3.7. Nejlepším způsobem jak tomu zabránit je vkonstruovat spoj přímo do útrob tělesa nebo po vysoce vodivou destičku. Zvětšením plochy dotyku článku s tělesem je tento problém eliminován. Na obrázku 3.8 jsou zobrazeny příklady takovýchto uložení. [7]



Obr. 3.7 Povrchové měření teploty. [5]

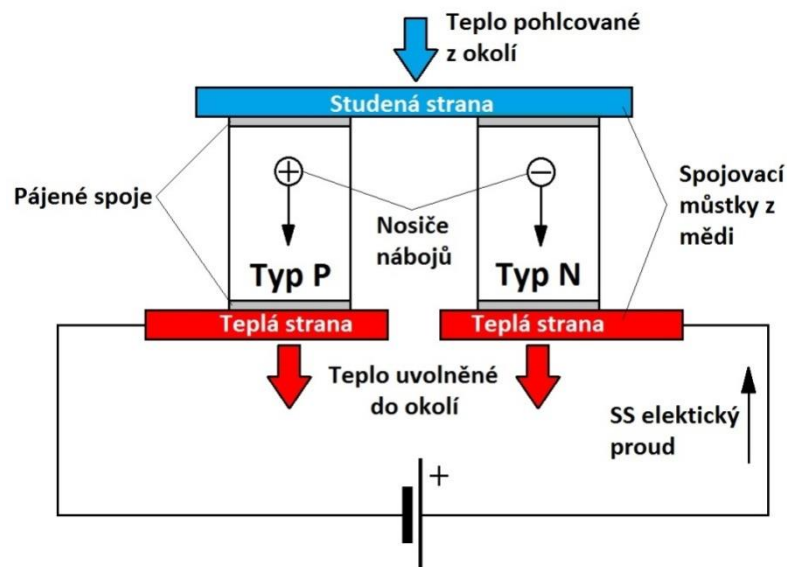
Obr. 3.8 Příklady uložení termočlánku v povrchu tělesa. [7]

3.2 Peltierovy chladicí moduly (TEC)

Peltierovy moduly (TEC - *Thermoelectric cooler*) pracují na principu Peltierova jevu a jejich základní funkcí je především ochlazovat nebo naopak ohřívat. Základem pro výrobu těchto modulů jsou termoelektrické články, zásadně tvořené polovodiči typu P a N. To je dáno hlavně skutečností, že materiály pro výrobu těchto článků musí splňovat potřebné vlastnosti: velký Seebeckův koeficient, malou měrnou tepelnou vodivost a velkou měrnou elektrickou vodivost (malý měrný elektrický odpor). Nevýhodou TEC modulů je zatím jejich poměrně malá účinnost v porovnání s ostatními komerčními způsoby chlazení. V posledních desítkách let se ale ve výzkumu polovodičů pro výrobu TEC článků značně pokročilo a můžeme předpokládat, že tomu tak bude i nadále. Dalšími nevýhodami jsou vysoká elektrická spotřeba, v případě velkých výkonů také cena a přehřívání teplé strany modulu. [1]

Za jeho výhody se považuje:

- a) Možnost libovolného rozměru a tvaru modulu
- b) Nepřítomnost pohyblivých částí
- c) Možnost velmi přesné regulace teploty (0,1 až 0,001°C)
- d) Bezhlukový chod bez vibrací
- e) Vysoká spolehlivost
- f) Netoxická (bezfreonová) technologie
- g) Životnost až desítky let
- h) Možnost modulární stavby chladicích zařízení podle požadovaného výkonu
- i) Možnost ohřevu i chlazení stejným modulem (změnou polarity proudu)
- j) Možnost dosažení i velmi nízkých teplot (až -80°C) [9]

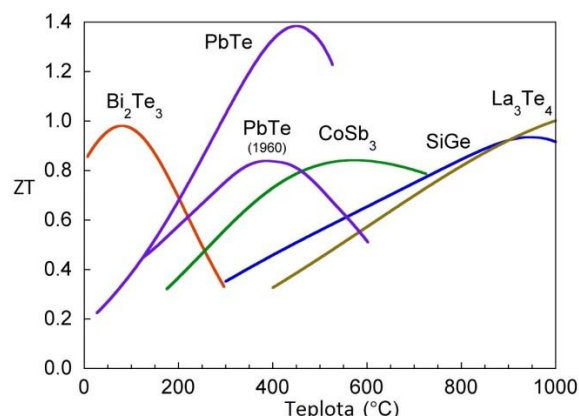
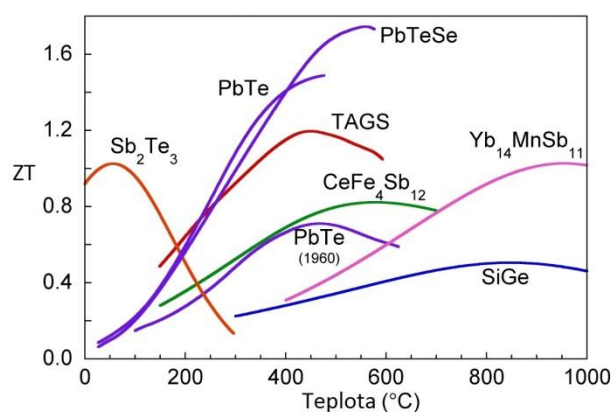


Obr. 3.9 Elementární Peltierův článek. [3]

3.2.1 Výroba a konstrukce TEC modulů

Samotné články (obr. 3.9) jsou tvořeny dvěma hranolky z polovodičového materiálu. Jeden typu P, druhý typu N. Výroba těchto polovodičů je prováděna tavením nebo spékáním. Jde-li o výrobu tavením, přesně spočítaná množství jednotlivých složek jsou odváženy a ve vakuových pecích pak taveny. Tak je získána potřebná čistota látek. Pro dosažení neporušené krystalické mřížky je třeba použít tzv. způsob „normal freezing“. Tavenina je ihned po vytažení z pece přelita do trubice chlazené vodou. Vzniklé válcové odlitky jsou následně zpracovány do potřebných rozměrů. Tato metoda je velmi pracná a není vhodná pro sériovou

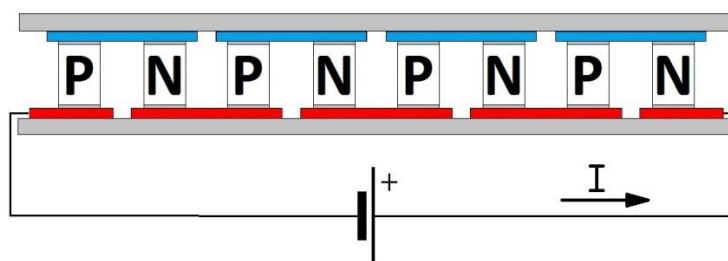
výrobu. Metoda spékání (tzv. prášková metalurgie), kdy je potřeba složky rozemlít na prášek s určitou jemností. Výsledná směs je lisována do forem, poté následuje proces spékání. Konečné vlastnosti polovodičů lze změnit poměrem vstupních složek. Například přeměnit polovodiče typu N na typ P. Základním polovodičovým materiálem pro Peltierovy články jsou převážně vizmut-telluridy, tj. Bi-Te-Se (N) a Bi-Sb-Te (P). V následujících grafech jsou zobrazeny charakteristiky ZT parametrů některých polovodičů typu P (obr. 3.10) a typu N (obr. 3.11) v závislosti na zvyšující se teplotě. [10, 11, 1]



Obr. 3.10 Graf ZT parametrů polovodičů typu P. [11]

Obr. 3.11 Graf ZT parametrů polovodičů typu N. [11]

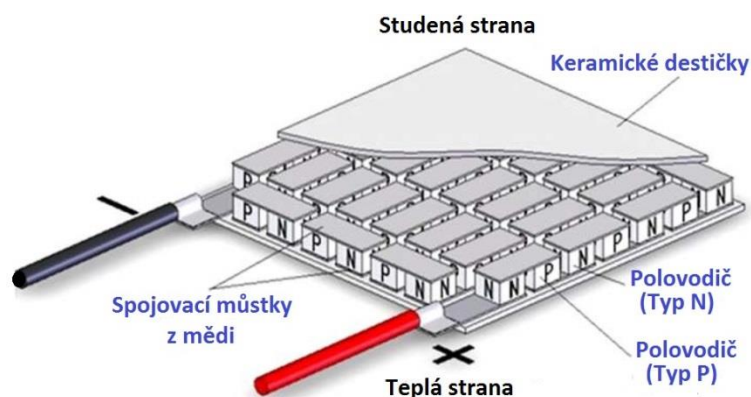
Hotové polovodičové hranolky jsou vodivě (zpravidla pájením) spojeny můstkem z materiálu s nízkým měrným elektrickým odporem a dobrou pájitelností. Velmi vhodná a osvědčená je měď, která bohužel může difundovat do polovodičů a tím ovlivnit jejich vlastnosti. V místě styku polovodiče a můstku existuje přechodový odpor, který snižuje účinnost článku. Cílem je zvolit takový postup výroby a druh spojovacího materiálu, aby byl tento odpor co nejnižší. Z takovýchto článků se poté skládají moduly (obr. 3.12 a 3.13) kýžených parametrů a velikostí řazením do série nebo paralelně.



Obr. 3.12 Sériově řazené články v termoelektrickém modulu. [3]

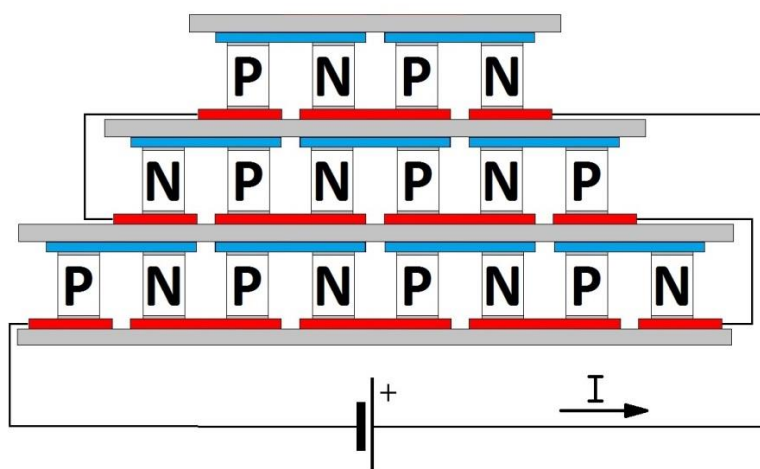
Na tyto celky jsou z obou stran upevněny tenké keramické destičky kvůli mechanickému zpevnění a elektrické i chemické izolaci modulu od okolí. Na vstup a výstup elektrického

obvodu jsou připájeny vodiče. Modul (obr. 3.13) bývá na odkrytých bočních stranách utěsněn tepelně odolným silikonovým tmelem zejména z důvodu omezení možné kondenzace vodních par obsažených ve vzduchu a tím zabránění nežádoucí oxidace článku. Zároveň se zamezuje vniknutí možných nečistot (prach, mastnota, aj.). Kondenzace vodních par by mohla nastat vzhledem k teplotnímu rozdílu mezi okolním vzduchem a studenou stranou modulu, jehož teplota může být výrazně nižší než teplota vzduchu.

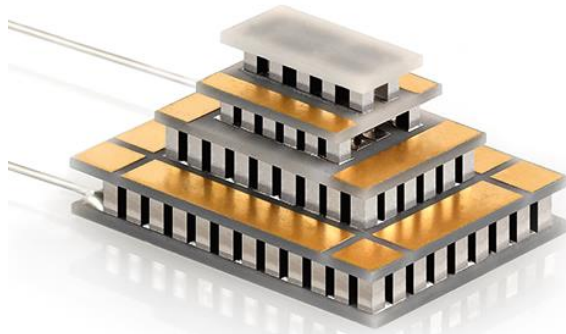


Obr. 3.13 Struktura termoelektrického modulu. [10]

K dosažení velkých chladicích výkonů jsou moduly skládány na sebe do tzv. kaskády. Na studenou stranu jednoho TEC modulu je přiložena teplá strana druhého. Tímto způsobem lze skládat libovolné množství TEC modulů. Řazení spojovaných modulů bývá sériové tak jako na obr. 3.14. Teplotní rozdíly vzniklé na jednotlivých modulech se sčítají a udávají výsledný celkový teplotní rozdíl. Nejčastěji se na sebe skládají kaskádní TEC moduly (obr. 3.15) vždy velikostně menší, aby se docílilo centralizace výkonu na potřebně velkou plochu. [10]



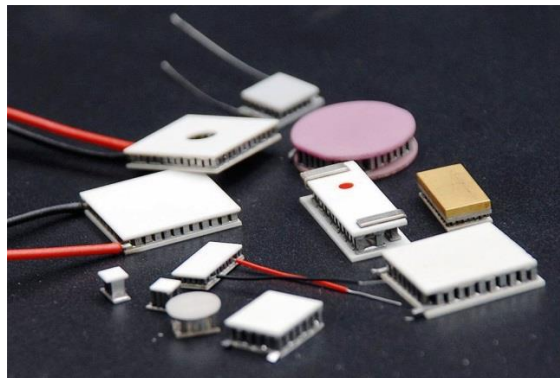
Obr. 3.14 Sériové řazení kaskádně skládaných modulů. [10]



Obr. 3.15 Příklad kaskádního TEC modulu. [12]

3.2.2 Využití TEC modulů

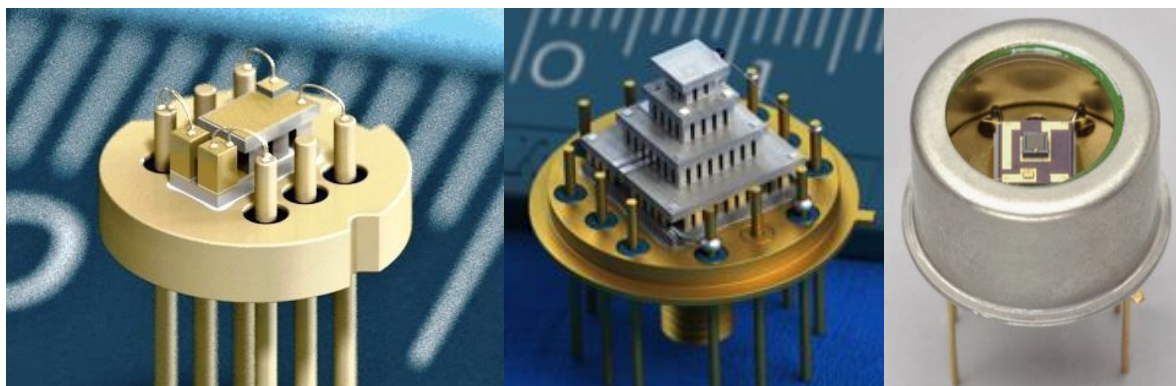
TEC moduly jsou pro své chladicí účinky hojně využívány v lékařství, průmyslu, vědě a výpočetní technice. Moduly mohou být vyrobeny ve všech tvarech a velikostech. Od miniaturních článků až po několikacentimetrové moduly. Jejich tvar může být libovolně přizpůsoben. Na obrázku 3.16 jsou vyobrazeny některé modifikace TEC modulů.



Obr. 3.16 Různé modifikace TEC modulů. [13]

1. Chlazení výkonných elektronických součástek

Miniaturní chladicí moduly je možné zakomponovat přímo do integrovaných polovodičových součástek (obr. 3.17) a zajistit jim tak vyšší výkon a stabilitu. Polovodičové vrstvy jsou nanášeny rovnou na studenou plochu modulu, což umožňuje jejich efektivní chlazení. Modul je uložen v pouzdře součástky tak, že jeho teplá strana je s pouzdrům kontaktně spojena. Tím pouzdro slouží jako pasivní chladič modulu a teplo je z něj pak odváděno do okolí. Napájení článků je přivedeno na samostatné vývody součástky. [12, 14]



Obr. 3.17 Ukázka chlazení polovodičových součástek TEC modulem. [14]

2. Chlazení snímačů digitálních fotoaparátů

Některé velmi sofistikované zařízení pro optický záznam vyžadují optické snímače s tak vysokým rozlišením a kvalitou, že je potřeba instalovat chladicí systém. TEC moduly jsou lehké a pro tuto aplikaci vhodné. Takto jsou chlazené například optické mikroskopy se zabudovaným digitálním fotoaparátem (obr. 3.18) nebo některé digitální fotoaparáty pro speciální použití (obr. 3.19) jako například snímání noční oblohy. [12]



Obr. 3.18 Digitální mikroskop chlazený TEC modulem.[12]

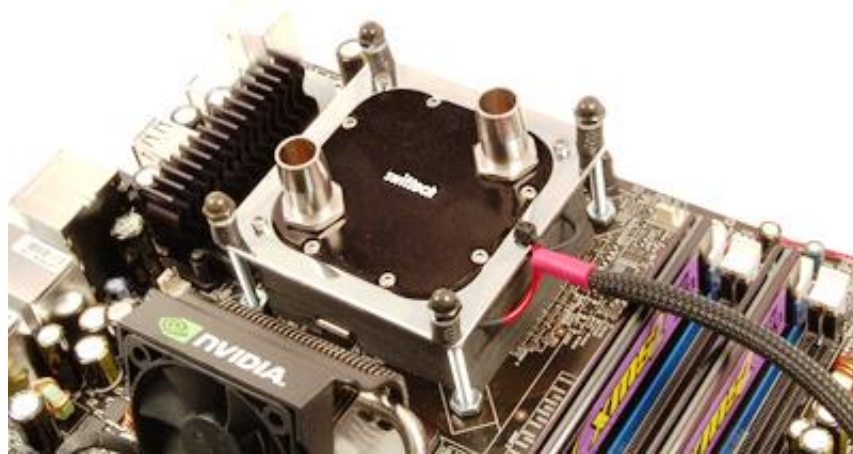


Obr. 3.19 Digitální fotoaparát součástí teleskopu pro pozorování noční oblohy. [12]

3. Účinnější chlazení ve výpočetní technice

Neustále rostoucí výkony výpočetních procesorů, chipsetů, paměťových karet a grafických karet vede k jejich podstatnému zahřívání. Pasivní chlazení tvořené dobře tepelně vodivým kovem (Al, Cu) s žebrováním je neefektivní a již nepřipadá v úvahu. Přidáním ventilátoru (aktivní chlazení) se sice jeho účinnost odvodu tepla zvýší, ale mnohdy ani to

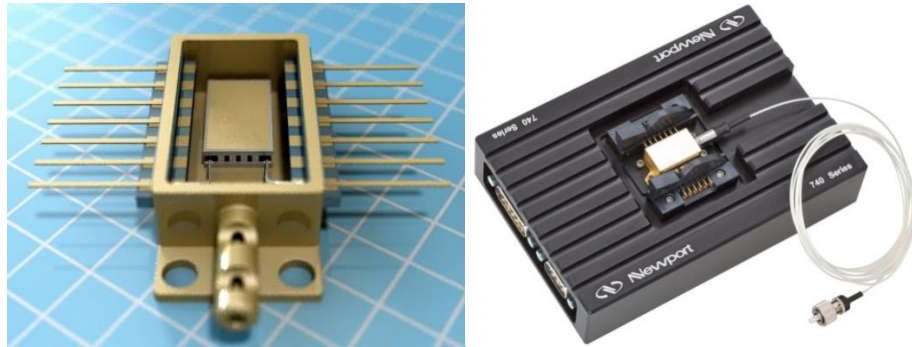
nezaručí stabilitu daného komponentu. V takových případech je nutné zvolit vodní chlazení, u kterého hrozí riziko netěsnosti celého systému, únik kapaliny do zařízení a její následné zničení. Další možností je tedy použít TEC modul chlazený aktivním chladičem. Protože jde o suché řešení, je mnohem bezpečnější a zaručuje stabilní chod komponentu. Jedinou nevýhodou vyplývající z praxe je nutnost časového zpoždění odpojení modulu od zdroje napájení oproti vypnutí chlazeného zařízení. Po odpojení totiž na modulu dochází k vyrovnání teplotních hodnot obou jeho stran a snadno se tak objeví v tu chvíli na chlazeném komponentu vysoká teplota, která by mohla vést taktéž k jeho zničení. Zpožděním se teplejší strana modulu stihne uchládit na nižší teplotu. V extrémních případech lze oba způsoby zkombinovat a chladit TEC modul vodním chlazením (*obr. 3.20*). [24]



Obr. 3.20 Procesor stolního počítače chlazený kombinací TEC modulu a vodního bloku. [24]

4. Chlazení laserových a diodových modulů

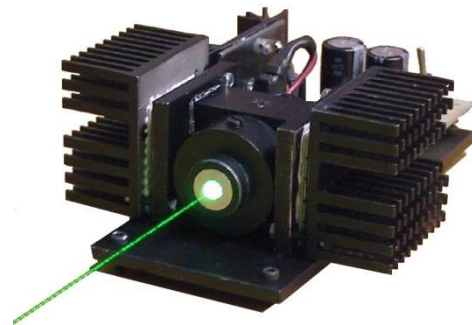
Lasery, laserové diody a výkonné diodové moduly dnes pokrývají široké spektrum použití v elektrotechnice, zdravotnictví, průmyslu, vědě, astronomii i armádě. Chod těchto zařízení ale produkuje obrovské množství tepla. To by je mohlo zničit nebo je připravit o jejich vlastnosti. Proto je na místě použití TEC modulů k jejich tepelné regulaci. Takto jsou například chlazeny laserové diody světelných zdrojů pro optické kabely (*obr. 3.21*), laserové DFB moduly (Distributed feedback) do spektroskopů (*obr. 3.22*) nebo výkonné lasery (*obr. 3.23*) a diodové moduly.[12, 14, 15, 16]



Obr. 3.21 Laserový světelný zdroj pro optické kabely chlazený TEC modulem. [14]



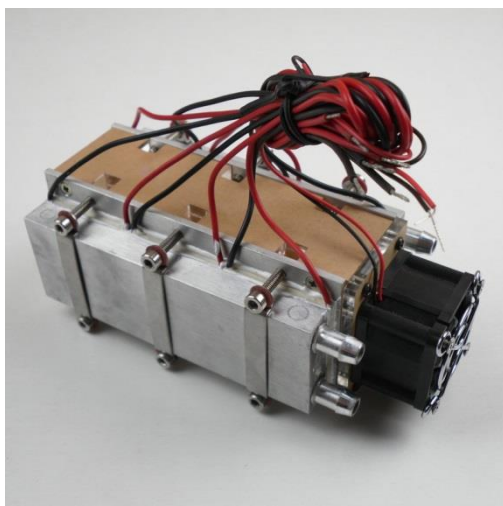
Obr. 3.22 DFB laserová dioda. [15]



Obr. 3.23 Výkonný laser chlazený dvěma TEC moduley. [16]

5. Klimatizační jednotky a autochladničky

Jedním z principů sloužících v klimatizačních systémech jsou právě TEC moduly. Tohoto principu se nejvíce využívá u klimatizačních jednotek v osobních automobilech (obr. 3.24). To je tvořeno trubici z tepelně dobře vodivého materiálu (Cu, Al). Uvnitř trubice bývá většinou žebrování pro efektivnější změnu teploty proudícího vzduchu trubicí. Vzduch je trubicí hnán do interiéru automobilu ventilátorem. Z vnější strany je trubice chlazena TEC modulem, které jsou na teplé straně vybaveny vodními bloky propojenými s vodním chladícím okruhem automobilu. Moduly lze velmi dobře regulovat, navíc po prohození polarit složí zařízení i jako topení. V případě autochladniček (obr. 3.25) jsou TEC moduly chlazeny pouze aktivním chladičem. Z toho vyplývá, že nejnižší teploty, kterých lze u autochladniček dosáhnout jsou dány maximálním rozdílem (běžně 30°C) teplot na TEC modulu odečteného od teploty okolí. Rovněž je možné přepnutí do režimu ohřevu, například pro udržení potravin v teplém stavu. [17]



Obr. 3.24 Klimatizační TEC jednotka pro osobní automobil.[17]



Obr. 3.25 Autochladnička s TEC modulem.[17]

6. Ostatní aplikace

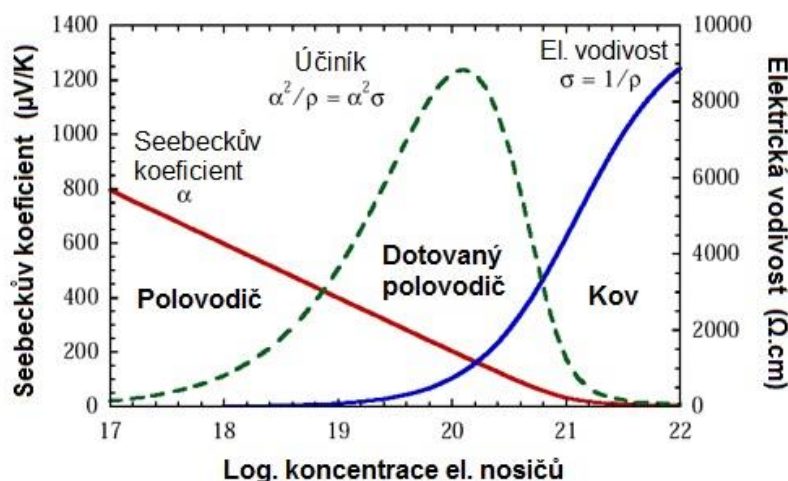
Výčet možných aplikací TEC modulů je velmi rozsáhlý, a proto jsou zde uvedeny jen ty nejzásadnější. Mimo jiné jsou využívány ve zdravotnictví pro podchlazování nebo naopak ohřev s udržováním určitých konstantních teplot vzorků tkání. V armádě jsou TEC moduly například chlazeny přístroje pro noční vidění. Obecně se využívají pro udržování teplot kapalin a plynů v různých chladicích systémech.

3.3 Termoelektrické generátory (TEG)

Zásoby fosilních paliv se ve světě neustále tenčí a tím roste jejich cena na trhu. To vyvolává všesměrovou snahu o snížení jejich spotřeby. Například všeobecně předpokládané zásoby ropy dokáží pokrýt celosvětovou spotřebu pouze na 40 let. Jedním z důsledků je rostoucí zájem o obnovitelné zdroje. Dále vznikla myšlenka využívat fosilní a jiné zdroje efektivněji, protože jejich potenciální energie je využívána pouze částečně. V automobilovém, energetickém, strojírenském, slévárenském a jim podobných průmyslech tak vzniká odpadní teplo, které většinou nemá žádné využití a tepelná energie v něm obsažena je ztracena bez užitku. Veškerá tato tepelná energie může být přímo přeměněna v energii elektrickou. Zde hovoříme o tzv. sklizení energie (energy harvesting), které umožňují právě termoelektrické generátory, zkráceně označované TEG (thermoelectric generator).

3.3.1 Výroba a konstrukce TEG modulů

Termoelektrický generátor pracuje na principu Seebeckova jevu, tedy přeměny tepelné energie na elektrickou v závislosti na teplotním rozdílu mezi spojenými konci dvou různých materiálů. Protože u kovů je účinnost takového zařízení velmi malá, využívá se u TEG modulů rovněž polovodičů jako u TEC modulů. Konstrukce TEG modulů je zcela totožná s konstrukcí TEC modulů (obr. 3.12). Jednotlivé termoelektrické články TEG modulů z polovodičů typu P a N jsou taktéž řazeny za sebou do série a pájeny k měděným můstkům (obr. 3.13). Kaskádního skládání se u TEG modulů nevyužívá, pro jejich funkci ztrácí význam a naopak by se tak jejich výkon snížil. [18]



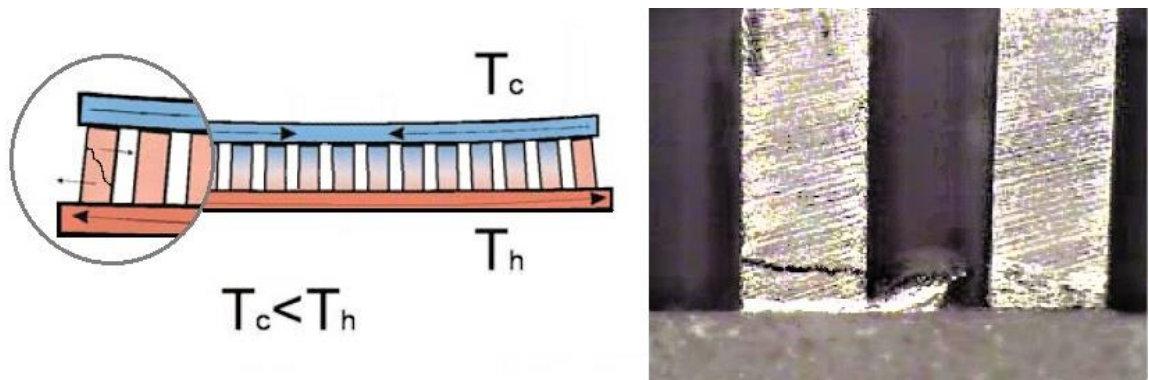
Obr. 3.26 Graf termoelektrických vlastností kovů a polovodičů.[11]

Z hlediska výběru vhodného materiálu pro výrobu TEG modulů je důležité, aby splňoval v rámci možností stejné vlastnosti jako TEC moduly. Vyšší Seebeckův koeficient udává modulu vyšší termoelektrické napětí v závislosti na teplotním rozdílu mezi plochami modulu. Tento teplotní rozdíl je ale vlivem měrné tepelné vodivosti použitého materiálu snižován. Proto je vhodné volit materiály s měrnou tepelnou vodivostí co nejnižší. Zároveň tento materiál musí mít velkou měrnou elektrickou vodivost (malý měrný elektrický odpor), aby jím dobře procházel elektrický proud. V praxi je dosažení všech těchto vlastností zároveň velmi obtížné, ne-li nereálné. Je známo, že nejvyšší elektrickou vodivostí disponují kovy. S elektrickou vodivostí ale zároveň roste i vodivost tepelná, proto jsou kovy v TEG a TEC modulech nepoužitelné. Naopak polovodiče mají obecně velmi vysokou hodnotu Seebeckova koeficientu, nízkou měrnou tepelnou vodivost, ale stejně tak i měrnou elektrickou vodivost. Vhodné materiály bylo tedy nutné vytvořit uměle dotováním obecných polovodičů tak, aby

bylo dosaženo kompromisu mezi všemi třemi důležitými faktory. Tuto problematiku jasně vystihuje graf na obrázku 3.26. [11, 18]

3.3.2 Vlastnosti TEG modulů

I přes neustálý vývoj polovodičových materiálů se stále nevyplatí TEG moduly využívat jako primární zdroje energie (například náhrada za parní turbíny v jaderných a tepelných elektrárnách → teplo přímo přeměňováno na elektřinu). Především pro jejich relativně malou účinnost (4 až 10%), která je považována za jejich největší nevýhodu. Další nevýhodou TEG modulů je maximální provozní teplota. Ta v závislosti na použitých materiálech a především na technologii spojování polovodičů (pájení, svařování aj.) dosahuje stovek stupňů Celsia. Pokud je maximální provozní teplota dlouhodobě překročena, dochází nejčastěji k natavení pájky a přerušení kontaktů (zničení modulu). Ke zničení zařízení nebo zhoršení jeho vlastností může také dojít vlivem tepelné roztažnosti. Plocha (keramická destička) teplé strany je tepelnou roztažností rozšiřována, naopak plocha chlazené strany je smršťována (*obr. 3.27*). Tak vzniká mechanický tlak mezi destičkami, který působí na hranolky polovodičů. V polovodičích pak vznikají miniaturní praskliny, které vedou ke zvýšení lokálního elektrického odporu nebo dokonce k přerušení obvodu. Tato nevýhoda je vlastní i TEC modulům, pokud není jejich ohřívající se strana intenzivně chlazená. [18, 14]



Obr. 3.27 Vznik mikroprasklin vlivem teplotní roztažnosti.

TEG moduly mají i mnoho výhod oproti ostatním zdrojům elektrické energie:

- a) Možnost libovolného rozměru a tvaru modulu
- b) Nepřítomnost pohyblivých částí
- c) Možnost přímé přeměny tepelné energie na elektrickou
- d) Bezhlučný chod bez vibrací
- e) Vysoká spolehlivost
- f) Životnost až desítky let
- g) Možnost modulární stavby zařízení pro výrobu energie potřebného výkonu
- h) Využitelnost i velmi malých teplotních rozdílů
- i) Bezobslužný chod

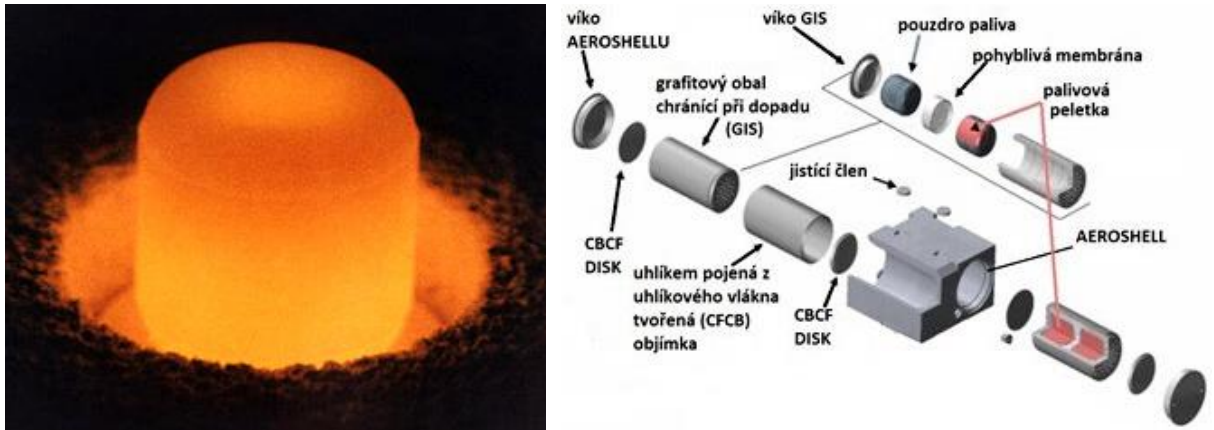
3.3.3 Využití TEG modulů

V minulosti byly termoelektrické generátory využívány jako méně výkonné alternativní zdroje energie. Existovali koksově pece, které byly obklopeny termoelektrickými generátory. V menším provedení pak byl vyráběn termoelektrický generátor, který sloužil k nasazení na petrolejovou lampu. Jeho výkon stačil pro napájení rádiového přijímače v oblastech, kde neexistovala rozvodná elektrická síť. Dnešním hlavním smyslem využití TEG modulů je již zmiňované zužitkování ztrátového odpadního tepla. V tomto směru existuje nespočet možných i již realizovaných aplikací, většinou jako doplňkového zdroje k primárnímu. Avšak nejdůležitější a zatím nenahraditelnou úlohu plní TEG moduly v kosmonautice, kde slouží jako zdroje primární.

1. Zdroj energie v kosmonautice

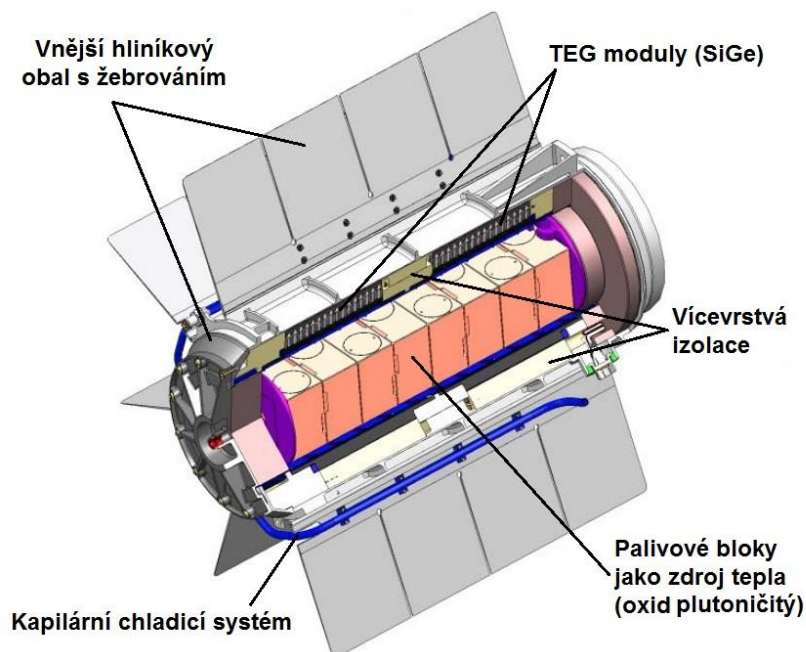
S rostoucí vzdáleností vesmírných zařízení od slunce začínají být solární panely jako zdroj elektrické energie značně neefektivní. Pro mise do hlubokého vesmíru jsou tak používány tzv. radioizotopové termoelektrické generátory, zkráceně RTG. Základem celého systému je izotop radioaktivního prvku, který svým rozpadem uvolňuje záření alfa, beta nebo gama do okolí. Kinetická energie vyzařovaných částic pronikajících do okolí se v materiálu obklopujícího prvek přeměňuje v teplo, které je zužitkováno termoelektrickým generátorem. Nejčastěji takovým použitým radioaktivním prvkem bývá izotop plutonia. Ten vyzařuje záření alfa, které lze snadno odstínit. Velkou výhodou je doba, po kterou vydrží vydávat dostatečné množství energie. Tu můžeme stanovit poločasem rozpadu (doba, za kterou se

aktivita vyzařování prvku sníží na polovinu) plutonia, který činí přibližně 87,7 let. Aby se předešlo haváriím (výbuch rakety při startu nebo shoření v atmosféře), při kterých by došlo k úniku radioaktivního materiálu do okolí, přešlo se k tepelně odolnějšímu a nárazu vzdornějšímu oxidu plutoničitému PuO_2 v keramické formě (obr 3.28). Keramické palivové peletky jsou obaleny v několika vrstvách z různých materiálů (iridium a uhlík) tak, aby byly dostatečně chráněny a zároveň jimi mohlo dobře prostupovat teplo. [19]



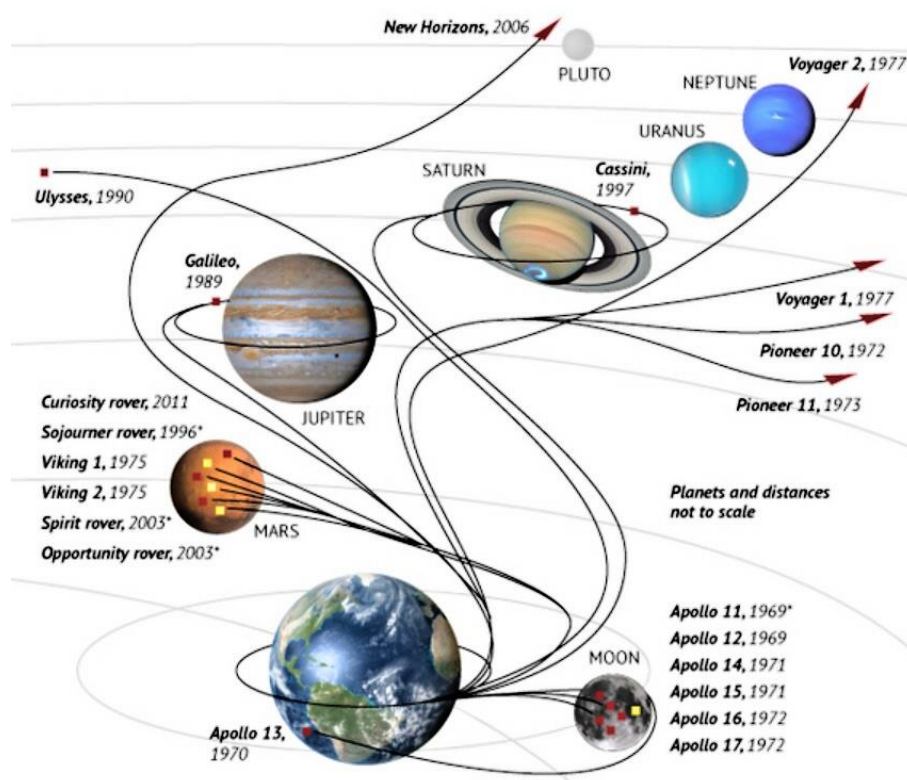
Obr. 3.28 Rozžhavená tableta PuO_2 a konstrukce jejího obalu pro RTG. [19]

Výsledné stínící bloky tvoří výplň vnitřní komory RTG baterie (obr. 3.5). Stěny komory jsou zhotoveny z TEG modulů (SiGe), které dodávají potřebnou energii pro dané zařízení. Vše je důkladně izolováno a stíněno. Vnější obal RTG tvoří hliníková nádoba s žebrováním, která slouží k chlazení zevní strany TEG modulů.

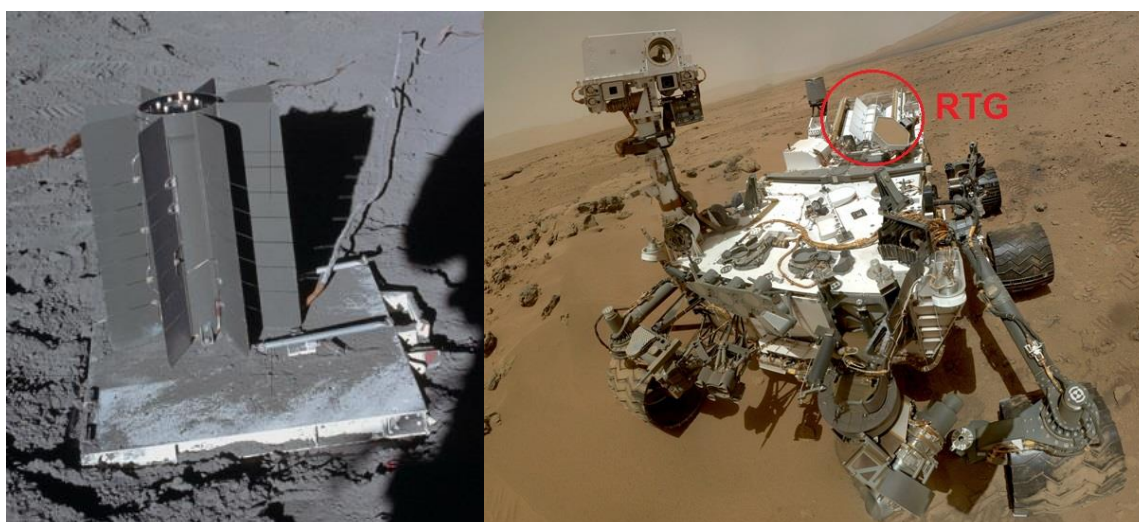


Obr. 3.29 Struktura radioizotopového termoelektrického generátoru. [19]

RTG baterie byly již použity při desítkách vesmírných misí, jak znázorňuje obrázek 3.30. Byly nepostradatelnou součástí misí na Měsíc (*obr. 3.31*), Mars i při zkoumání ostatních planet naší soustavy. Kdyby například vesmírné sondy, které již opustily hranice sluneční soustavy (Voyager, Pioneer), používali jako zdroj energie solární panely, jejich rozměry by musely být při stejném výkonu větší než 100 m². RTG baterie jsou hlavním zdrojem energie marsovských vozítek (rover) Opportunity, Spirit a Curiosity (*obr. 3.31*). Poslední vyslanou vesmírnou sondou s RTG baterií je New Horizons (*obr. 3.32*) vyslaná v roce 2006 na misi zkoumající planetu Pluto. [19, 20]



Obr. 3.30 Vesmírné mise používané RTG moduly. [20]



Obr. 3.31 RTG baterie na měsíci a ve vozítku Curiosity na Marsu. [20]



Obr. 3.32 RTG baterie napájící sondu New Horizons. [19]

Mimo vesmírný program mají RTG baterie mnohačetné použití i na Zemi. Jako napájení špatně dostupných bezobslužných majáků na souši i na otevřeném moři, energetické zdroje v odlehlých oblastech mimo civilizaci a v rozvojových zemích.

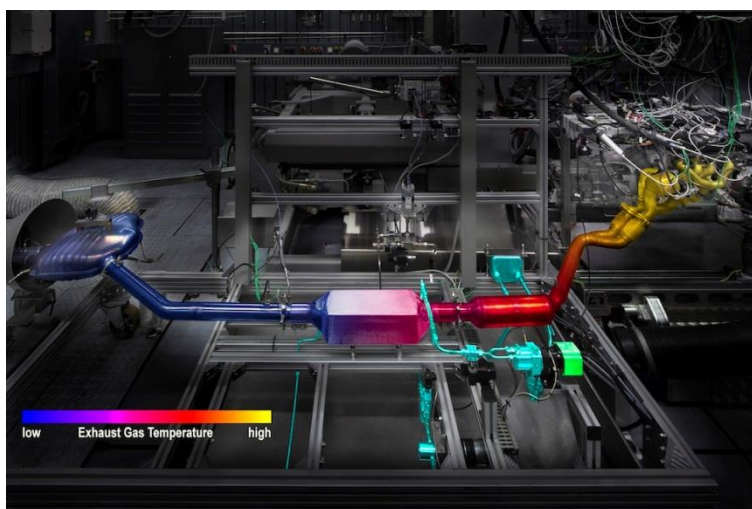
2. Využití odpadního tepla v energetice

Velký potenciál by mohlo mít využití TEG modulů v jaderných, tepelných a jiných elektrárnách, ve kterých vzniká odpadní teplo. Tím je myšlen okruh sloužící pro kondenzaci vodní páry pohánějící turbíny nebo přímo tato vodní pára. Vždy je v určité části obou okruhů třeba vodu zchladit. U turbínového okruhu v kondenzátoru par, u chladicího okruhu obvykle v chladicích věžích. Místo aby se toto teplo ztratilo do okolí, mohlo by být využito TEG moduly, to by navíc pomohlo k lepšímu chlazení.

Dle mého názoru jsou TEG moduly velmi slibným způsobem jak využít teplo, které vyzařuje uskladněný vyhořelý jaderný odpad. Princip by mohl být stejný jako u RTG baterií. Použité palivo je z reaktoru umístěno do vodního bazénu přímo v elektrárně, kde je skladováno několik let, než jeho radioaktivita klesne na polovinu své původní hodnoty. Po celou tuto dobu by palivo mohlo být obklopeno pouzdrům z TEG modulů. Sama voda v bazénu by ochlazovala jejich druhou stranu. Elektrická energie takto vytvořená by pomohla pokrýt spotřebu chodu samotné elektrárny. Použité palivo je nakonec vloženo do speciálních kontejnerů a převezeno do skladů jaderného odpadu. I tam by toto teplo mohlo být dále využíváno.

3. Využití odpadního tepla spalovacích motorů

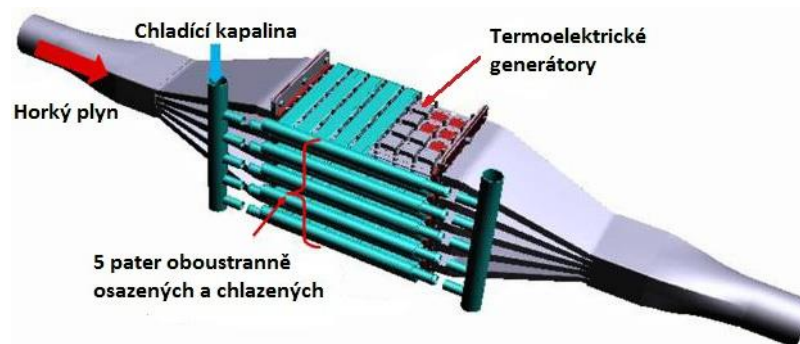
Jednou z možností je aplikace TEG modulů jako vedlejšího zdroje energie v osobním automobilu, který využívá odpadního tepla výfukového potrubí. Toto teplo vzniká ve spalovacích motorech při každém zážehu palivové směsi a dále odchází nevyužito soustavou výfukového potrubí do okolí. Přibližně jedna třetina energie, kterou palivo vytvoří, se ztrácí již v samotném bloku motoru. Ten je jednak chlazen vodou, dochází v něm k tření, různým tlakovým ztrátám a nedokonalému spalování paliva. Pouze jedna třetina této energie je přeměněna v motoru na mechanickou. Potrubím se pak ve výfukových plynech mimo automobil ztratí 30 – 35 % tepelné energie. Tímto teploty v potrubí dosahují až 700 °C. Takto vysoké teploty (*obr. 3.33*) mohou být snadno přeměněny termoelektrickým generátorem na elektrickou energii, která může být využita v rámci úspor pro dnes již tak rozsáhlou elektroniku ve výbavě automobilů (protiblokovací systém brzd ABS, protipokluzový systém ASR, inteligentní bezpečnostní program ESP, klimatizace a další spotřebiče). [6, 18]



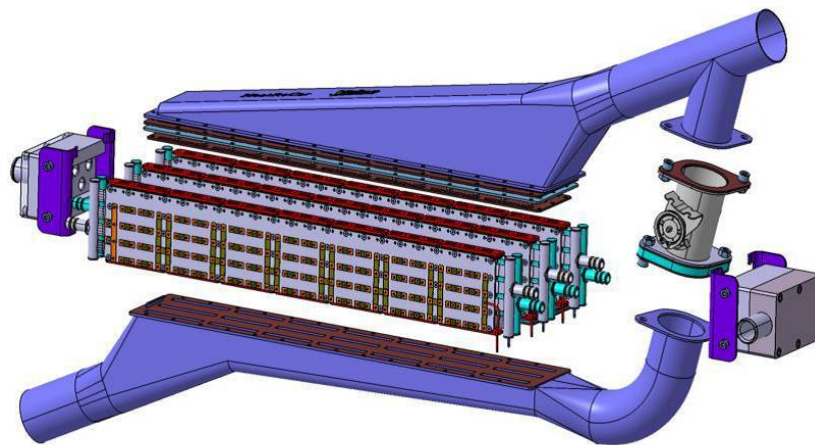
Obr. 3.33 Rozložení teplot ve výfukovém potrubí. [6]

TEG může být jednoduše připojen do soustavy vodního chlazení automobilu, čímž se na článku dosáhne rozdílu teplot v řádech několika set stupňů Celsia. Pokud uvažujeme, že výkon jednoho takto zkonstruovaného termoelektrického generátoru dosáhne hodnoty 1 kW, umožní tak snížení spotřeby paliva o 5 až 7 %. Například vývojové středisko automobilky BMW již v roce 2008 instalovalo do prototypového vozu první generace TEG o výkonu 200 wattů. Současný vývoj materiálů na výrobu termočlánků, technologií výroby i konstrukce samotných generátorů v automobilech však slibuje brzké dosažení potřebného výkonu 1 kW. Aktuální konstrukce vyvinuta automobilkou BMW vychází z plošného skládání článků

v několika vrstvách tak, že vždy z jedné strany na každou vrstvu článků přiléhá horké potrubí výfuku a ze strany druhé potrubí soustavy vodního chlazení. Takto se při stejných rozměrech celého zařízení dosáhne, při vyšším počtu instalovaných článků na větší plochu potrubí, také i vyššího výkonu. Velmi podobnou konstrukci zvolila i automobilka Fiat (*obr. 3.34*). Ta ve svém vývoji intenzivně pokračovala a výsledkem byla nová odlišná konstrukce s regulovatelným by-passem (*obr. 3.35*). Tak je možné regulovat teplotu v generátoru a průchod spalin potrubím ve vyšších otáčkách. [6, 21]



Obr. 3.34 Konstrukce TEG pro výfukové potrubí. [21]

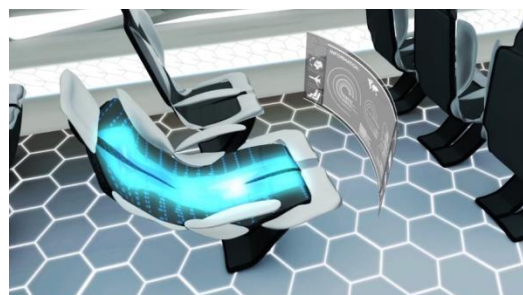
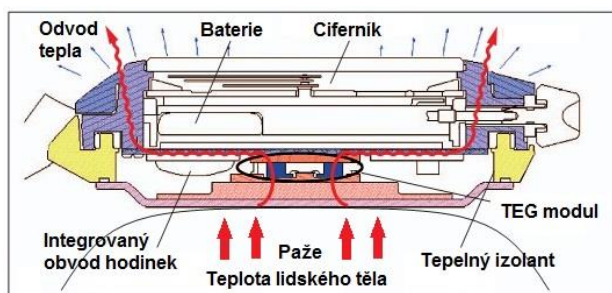


Obr. 3.35 Finální koncept TEG značky Fiat s regulovatelným by-passem. [21]

4. Aplikace TEG modulů využívající teplotu lidského těla

Jakkoliv zní tato myšlenka futuristicky, tak dnes existují studie i již zrealizované aplikace TEG modulů, které by pro svou činnost využívaly lidské tělesné teploty. Tato možnost existuje, protože TEG moduly dokáží produkovat elektrickou energii i při minimální teplotním rozdílu. Lidské tělo má přibližnou průměrnou teplotu 35,8 až 37,3 °C. Při pokojové teplotě okolí 25 °C tedy vzniká teplotní rozdíl více než 10 °C. TEG moduly jsou tedy

například používány výrobci náramkových hodinek, kde slouží k dobíjení baterie jako na obrázku 3.36. Dalším příkladem je studie společnosti Airbus, která pracuje s vizí, že TEG moduly instalované v budoucnu do sedaček letadel pokryjí spotřebu osvětlení kabiny letadla (obr. 3.37). S TEG moduly se do budoucna počítá i ve zdravotnictví, kde se testují jako možné zdroje kardiostimulátorů a jiné elektroniky pro lidské tělo. [22, 23]



Obr. 3.36 TEG modul v náramkových hodinkách. [23] Obr. 3.37 TEG moduly v křeslech letadel. [22]

4 Praktické měření TEG modulu

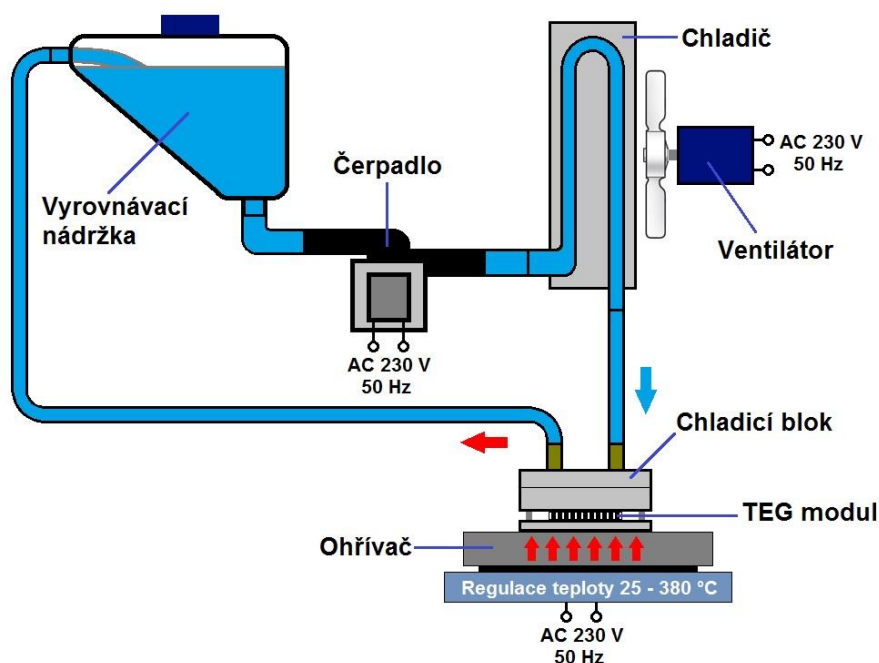
Cílem praktického měření TEG modulu bylo simulovat situaci termoelektrického generátoru využívajícího odpadního tepla ve výfukovém potrubí spalovacího motoru a následně určit jeho chování. TEG moduly jsou v těchto generátorech řazeny ve větším počtu sériově a paralelně podle potřebných proudů a napětí. V místech, kde bývají do výfukového potrubí připojeny, teploty dosahují až 450 °C. Vhodně zvolené TEG moduly s dostatečnou maximální provozní teplotou mohou být osazeny svou teplou stranou přímo na potrubí. Studenou stranu je možné chladit zapojením do chladicího okruhu auta nebo sekundárním chladicím okruhem s vlastním náporovým chladičem jako na obrázku 4.1 tak, aby nedocházelo k přehřívání chladicí kapaliny motoru. [6]



Obr. 4.1 Návrh sekundárního chladicího okruhu pro TEG automobilky BMW. [6]

4.1 Návrh chladicího okruhu pro TEG modul

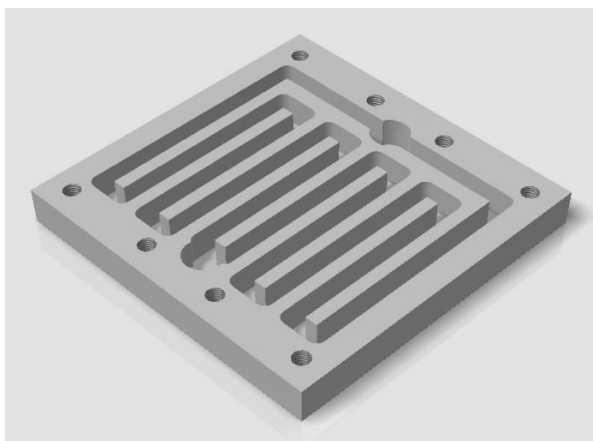
Praktické měření simulovalo právě případ sekundárního okruhu z obrázku 3.38. Jako sekundární náporový chladič byl použit radiátor z vozu Škoda Octavia, který má velmi podobné rozměry a je schopen plnit stejnou funkci. Nápor vzduchu vznikající při jízdě automobilu simuloval ventilátor poháněný elektromotorem. Reálně je chladicí kapalinou destilovaná voda – při simulaci byla nahrazena vodou z vodovodu, což na výsledek měření nemělo žádný vliv. Voda v sekundárním okruhu (obr. 4.1) cirkuluje pomocí čerpadla, které mechanicky pohání motor. Jeho náhradou bylo zvoleno radiální vypouštěcí čerpadlo značky Askoll z pračky Whirlpool. Pro správnou funkci celého okruhu bylo nutné před čerpadlo zařadit vyrovnávací nádržku. Konkrétně byla použita vyrovnávací nádržka chladicího okruhu z vozu Škoda Favorit. Nejdůležitějším komponentem celé chladicí soustavy byl chladicí blok, který bylo třeba navrhnout a vyrobit. Chladicí blok s TEG modulem byl pevně připevněn k ohřívači, který nahrazoval výfukové potrubí. Na místo styku plochy bloku a plotýnky ohřívače byla nanesena grafitová teplotnosná pasta, pro snížení tepelného odporu. Celý simulační chladicí okruh byl pospojován hadičkami z PVC, utěsněn SK páskami a je zjednodušeně znázorněn na obrázku 4.2.



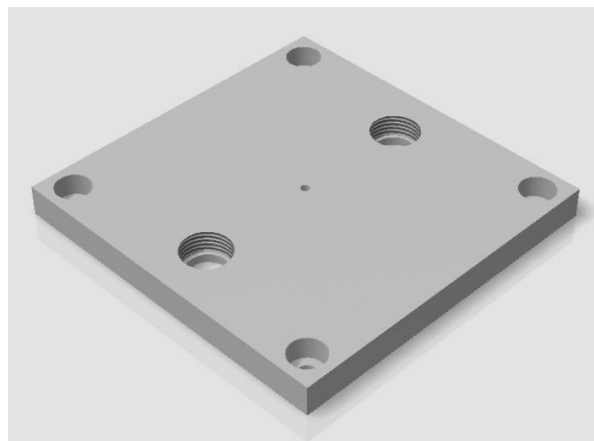
Obr. 4.2 Schéma navrženého chladicího okruhu TEG modulu.

4.1.1 Návrh, výroba a sestavení chladicího bloku TEG modulu

Návrh chladicího bloku byl vytvořen studentskou verzí modelovacího softwaru Autodesk Inventor Professional 2014. Blok byl složen ze dvou částí s rozměry 79x78x10 mm (DxŠxV). Ve spodní části (*obr. 4.3*) byla vymodelována drážka s hloubkou 8 mm, šířkou 4 mm a sloužící pro průtok kapaliny. Cesta drážky pro chladicí kapalinu byla zvolena na základě analogie výměníku tepla s využitím skript termomechaniky. Je známo, že protiproudé uspořádání je výhodnější než souproudé. Proto chladná kapalina směřuje nejdříve do chladnějších krajních míst bloku a teprve poté do teplejšího středu. Tím se dosáhlo vyšší efektivity chlazení, než kdyby kapalina protékala naopak. Dále byly ve spodní části vymodelovány otvory se závity pro montážní šrouby držící obě části pevně u sebe a pro šrouby na připevnění TEG modulu. Model vrchní části (*obr. 4.4*) obsahuje pouze otvory se závitem pro našroubování fitinek, ve svém středu otvor pro termočlánek snímající teplotu bloku a v rozích otvory se zahloubením pro montážní šrouby. [28]

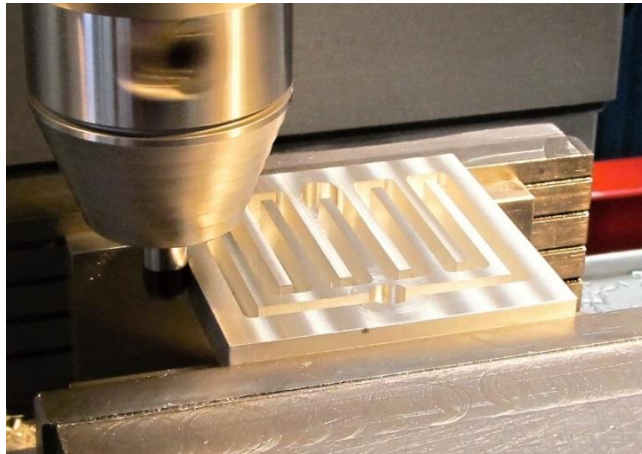


Obr. 4.3 Model spodní části chladicího bloku.



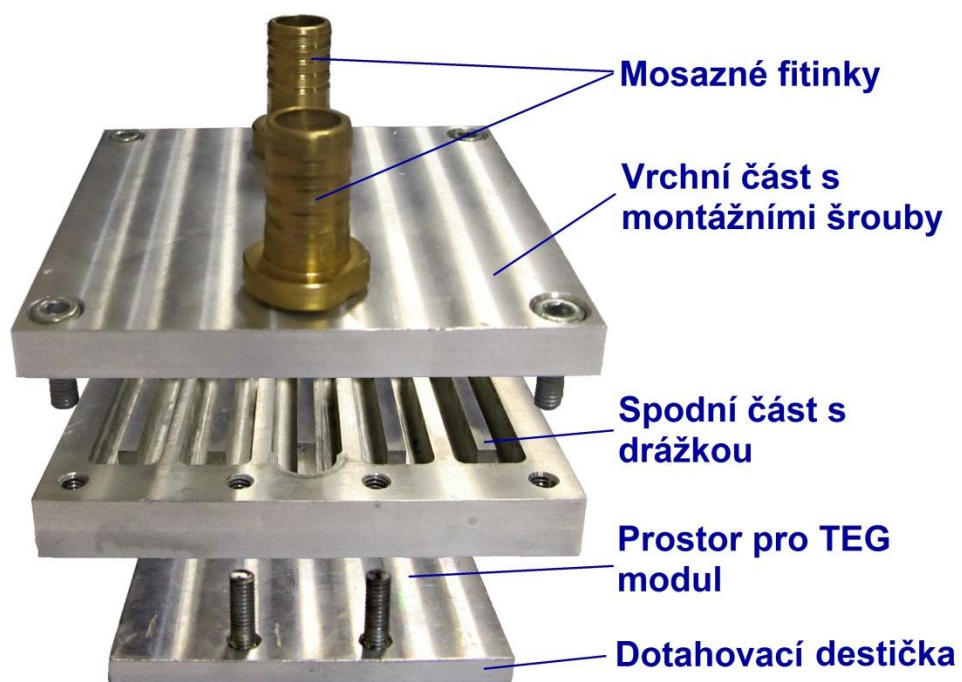
Obr. 4.4 Model vrchní části chladicího bloku.

Následně byly modely okótovány a předloženy firmě specializující se na kovovýrobu, aby obě části vyhotovila. Výrobním materiálem byl zvolen hliník pro svou výbornou tepelnou vodivost a cenovou dostupnost. Pro usnadnění práce obsluze frézky byl nakreslen 2D výkres, přímo pro cestu frézy. Rovněž byly z mosazi vysoustruženy dvě fitinky přesně na míru a vyfrézována hliníková destička se slabší tloušťkou. Destička sloužila k přitažení TEG modulu na spodek bloku. Na obrázku 4.5 je vyobrazeno frézování spodní části bloku.



Obr. 4.5 Frézování spodní části bloku.

Po zhotovení všech částí byla celá sestava zkompletována tak, jak je vidět na obrázku 4.6. Fitinky a všechny šrouby byli obaleny teflonovou páskou z důvodu utěsnění a v případě spodních šroubů i tepelné izolaci mezi horkou a studenou částí. Fitinky byly pevně utaženy do vrchní části. Na spodní část bloku byla pouze úzce po okrajích nanесena vrstva vysoce voděodolného pokrývačského tmelu Bitumen, který blok dokonale utěsnil. Na zbytek plochy byla nanесena vrstva grafitové teplotnosné pasty pro tepelně vodivé spojení mezi oběma částmi bloku. Následně byly obě části pevně staženy montážními šrouby k sobě. Zakoupený TEG modul měl na obou stranách nanесenou grafitovou fólii, proto jej stačilo pouze přitáhnout šrouby mezi destičku a spodek bloku.



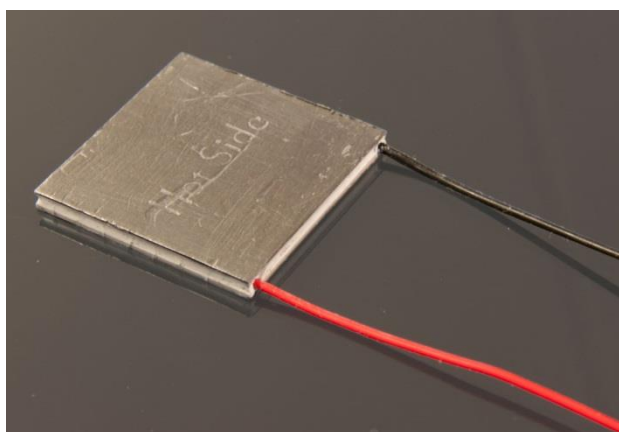
Obr. 4.6 Kompletní sestava chladičho bloku pro TEG modul.

4.1.2 Výběr TEG modulu

Při výběru TEG modulu byly zvažovány produkty několika výrobců. Většina společností zabývajících se výrobou TEG modulů měla sídlo v USA, bez poboček v Evropě. Například společnost Custom thermoelectric nebo Thermal Electronics Corp. Od těchto společností bylo upuštěno, protože cena poštovního a doba dodání by znemožňovala včasné odměření simulace. Nejvhodnějším dodavatelem v Evropě byla společnost Thermalforce.de. Ta bohužel nabízela pouze TEG moduly pro maximální teplotu 200°C, což bylo nedostačující. Konečná volba padla na čínskou společnost Thermonamic, která má soukromého dodavatele přímo v České republice. Vybrán byl TEG modul založený na Bi-Te (bismut-tellur) technologii s kódovým označením **TEHP1-1264-0.8** (obr. 4.7). Datasheet k TEG modulu s charakteristikami danými výrobcem je doložen v **příloze I.** [27]

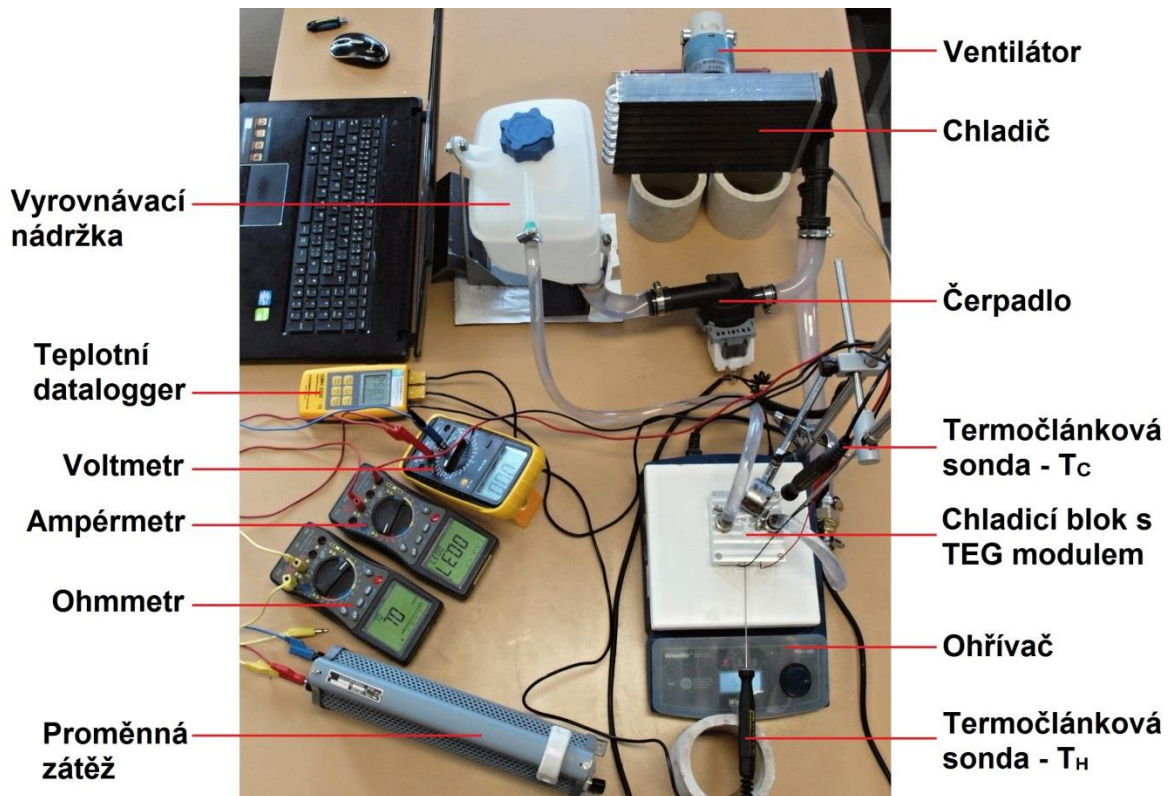
Optimální parametry měřeného TEG modulu	
Teplota teplé strany T_H	300 °C
Teplota studené strany T_C	30 °C
Napětí naprázdno	8 V
Optimální zatěžovací odpor	1,59 Ω
Optimální výstupní napětí	4 V
Optimální výstupní proud	2,4 A
Optimální výstupní výkon	9,6 W
Tepelný tok modulem	188 W
Hustota tepelného toku	11,8 W.cm ⁻²

Tab. 4.1 Maximální hodnoty modulu TEHP-1264-0.8 pro rozdíl teplot 270 °C.



Obr. 4.7 TEG modul TEHP1-1264-0.8.

4.2 Měření charakteristik TEG modulu



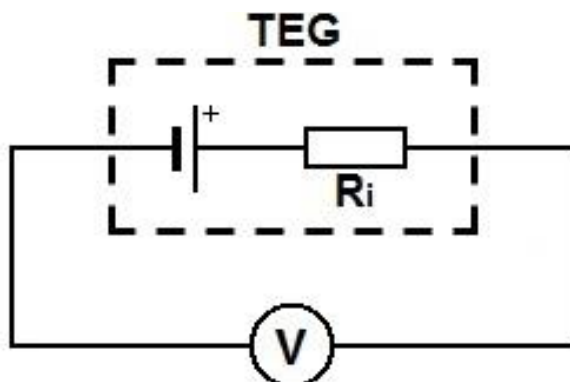
Obr. 4.8 Vzhled skutečného zapojení.

Na obrázku 4.8 je vyfocen průběh měření charakteristik TEG modulu se všemi použitými přístroji. Chladicí okruh byl uveden do provozu zapojením ventilátoru a čerpadla do síťové zásuvky (230 V, 50 Hz) ihned poté, co byla do vyvážovací nádržky nalita voda. Poté byl do zásuvky zapojen i ohřivač s počáteční konstantní hodnotou 25 °C. Na plotýnku ohřivače byla nanášena vrstva teplotnosné pasty a mechanicky přitlačen chladič s TEG modulem. Snímání teplot bylo zajištěno termočláňkovými jehlovými sondami na chladičím bloku v předem připravených otvorech na studené a teplé straně TEG modulu. Pro přesnější snímání teplot byly otvory vyplněny teplotnosnou pastou. Snímané teploty se zobrazovaly na teplotním dataloggeru.

4.2.1 Měření výstupního elektrického napětí naprázdno

První změřenou charakteristikou bylo výstupní elektrické napětí odporově nezátíženého (naprázdno) TEG modulu s rostoucím teplotním rozdílem ΔT . Na ohřivači byla postupně zvyšována teplota od 25 °C do 380 °C. Z teplot odečítaných na dataloggeru byl vypočítáván teplotní rozdíl ΔT z hodnot na studené straně T_C a teplé straně T_H . Na svorky TEG modulu byl připojen pouze voltmetr, ze kterého bylo pro jednotlivé ΔT odečítáno elektrické napětí.

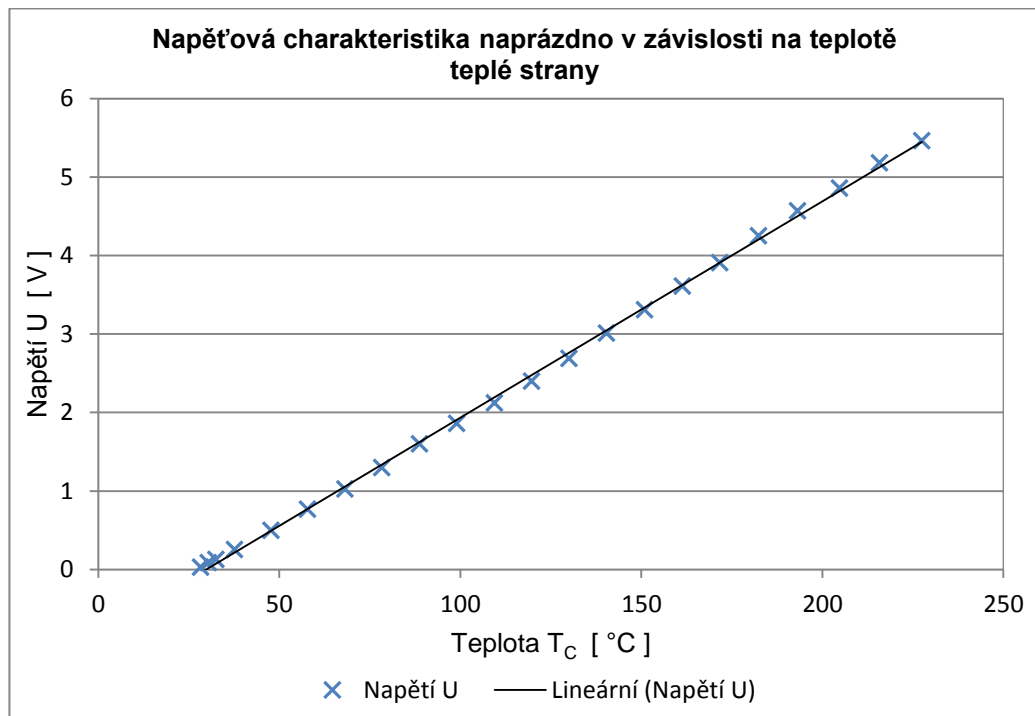
Schéma tohoto zapojení je zobrazeno na obrázku 4.9. Odečtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2. Předpokládaným grafem průběhu výstupního napětí nezátíženého TEG modulu měla být lineárně rostoucí přímka. Graf skutečných hodnot je vyobrazen na obrázku 4.10.



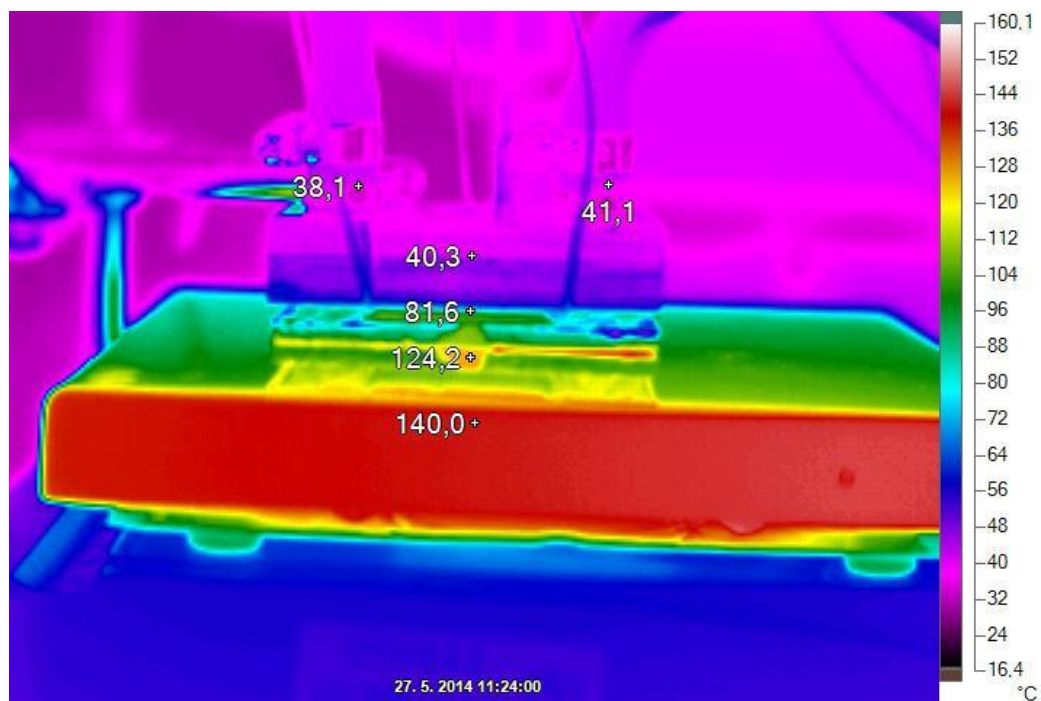
Obr. 4.9 Schéma zapojení TEG modulu naprázdno.

Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Napětí U [V]
1	27,3	28,3	0,03
3	27,4	30,4	0,085
5	27,5	32,5	0,126
10	27,6	37,6	0,253
20	27,7	47,7	0,5
30	27,8	57,8	0,767
40	28,1	68,1	1,025
50	28,3	78,3	1,3
60	28,7	88,7	1,598
70	29	99	1,86
80	29,4	109,4	2,12
90	29,7	119,7	2,4
100	30	130	2,69
110	30,4	140,4	3,01
120	30,9	150,9	3,31
130	31,3	161,3	3,61
140	31,7	171,7	3,91
150	32,4	182,4	4,25
160	33,2	193,2	4,57
170	34,7	204,7	4,86
180	35,8	215,8	5,18
190	37,5	227,5	5,46

Tab. 4.2 Změřené hodnoty el. napětí U naprázdno pro různé rozdíly teplot ΔT .



Obr. 4.10 Graf el. napětí při zapojení TEG modulu naprázdno.



Obr. 4.11 Snímek rozložení teplot při měření vyfocený termokamerou ($T_C=35^\circ\text{C}$; $T_H=150^\circ\text{C}$)

Obrázek 4.11 vystihuje rozložení teplot v okolí TEG modulu. Na první pohled je zřejmé, že teplota vstupní hadičky je nižší než výstupní. Chladicí blok je z vnější strany vystaven konvekci tepla z ohříváče a termokamera ukazuje vyšší teplotu než termočlánek v jeho středu. Stejně tak teplota ohříváče je zkrácena úhlem jejího snímání.

Použité přístroje:

Digitální teplotní datalogger – Greisinger GMH 3230 (typ K); inv. č. 203215

Digitální multimetr – Ben electronic MY-64

Termokamera - IR Fusion Technology TI-55FT; inv. č. 500929

Proměnný odpor – IP 00; 16 Ω ; 4 A; 70 V DC; 48 V AC

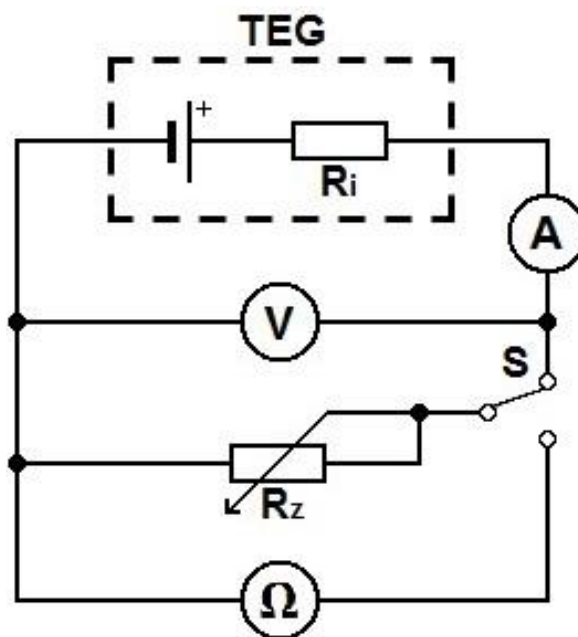
Digitální ohřívač – WiseStir MSH-20D (25°C-380°C)

Čerpadlo – Askoll M224; 220-240V AC; 50 Hz; 0,2 A; 34 W

Ventilátor – OPP Znojmo; 11 m³/min.; 16 W; 220 V AC; 50 Hz; inv. č. 10619

4.2.2 Měření maximálního výkonu pro různé rozdíly teplot

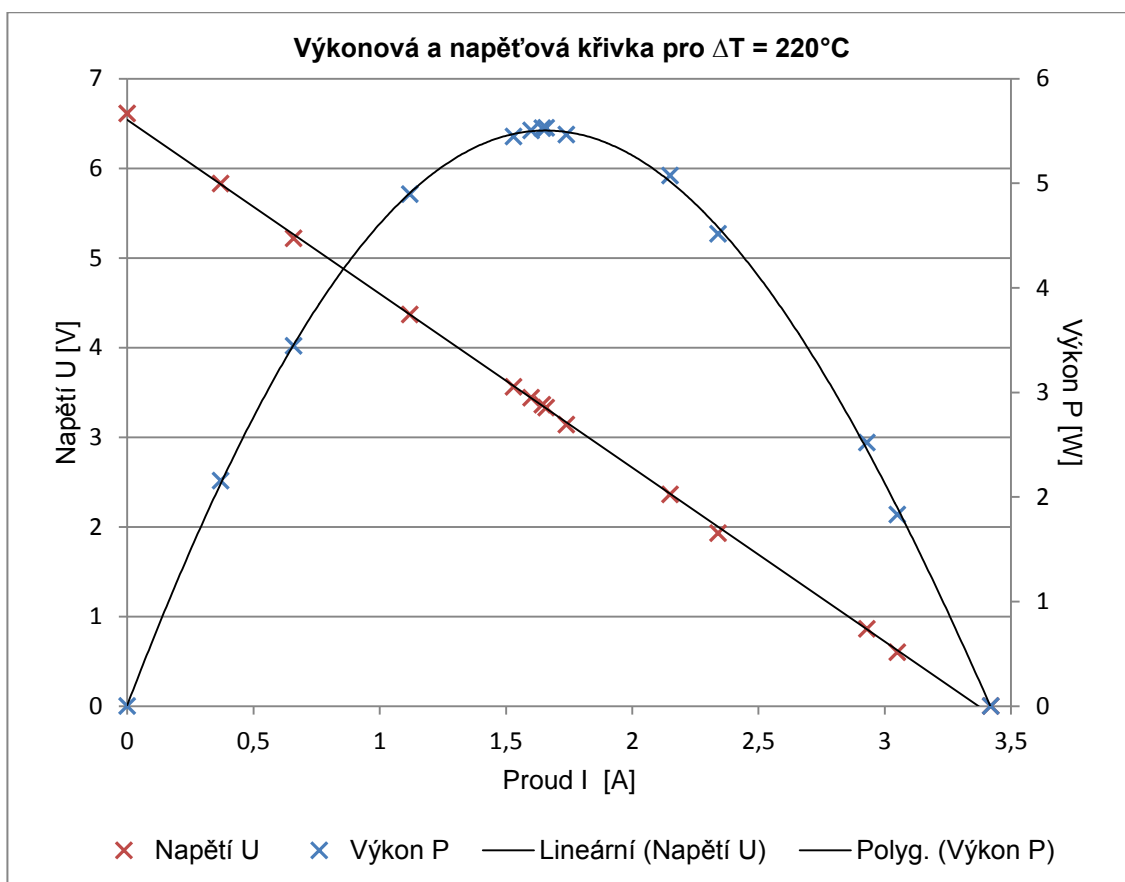
Cílem dalšího měření bylo stanovit maximální možný elektrický výkon TEG modulu při teplotních rozdílech $\Delta T = 20, 70, 120, 170$ a 220 °C. Tento výkon se mění se změnou velikosti zátěže R_Z . Proto byly pro každý teplotní rozdíl odečítány hodnoty napětí na zátěži a proudu zátěži při různých hodnotách zatěžovacího odporu R_Z . Tak byl pro každý teplotní rozdíl nalezen ideální zatěžovací odpor R_Z , při kterém byl výstupní výkon nejvyšší. Odpor byl od zapojení nakrátko dále volen v desetinách ohmů, jednotkách ohmů až po zapojení naprázdno. Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 4.3. Optimální zátěž s max. výkonem je zobrazena tučně. Schéma zapojení měřeného obvodu je znázorněno na obrázku 4.12. Odpor proměnné zátěže R_Z byl soustavně přeměřován ohmmetrem, který bylo nutné při odčítání hodnot odpojit přepínačem S, aby nezkresloval výsledky měření. Graf vypočteného výkonu a změřeného napětí na zátěži v závislosti na proudu zátěži je na obrázku 4.13.



Obr. 4.12 Schéma zapojení obvodu při měření výkonu TEG modulu na proměnné zátěži.

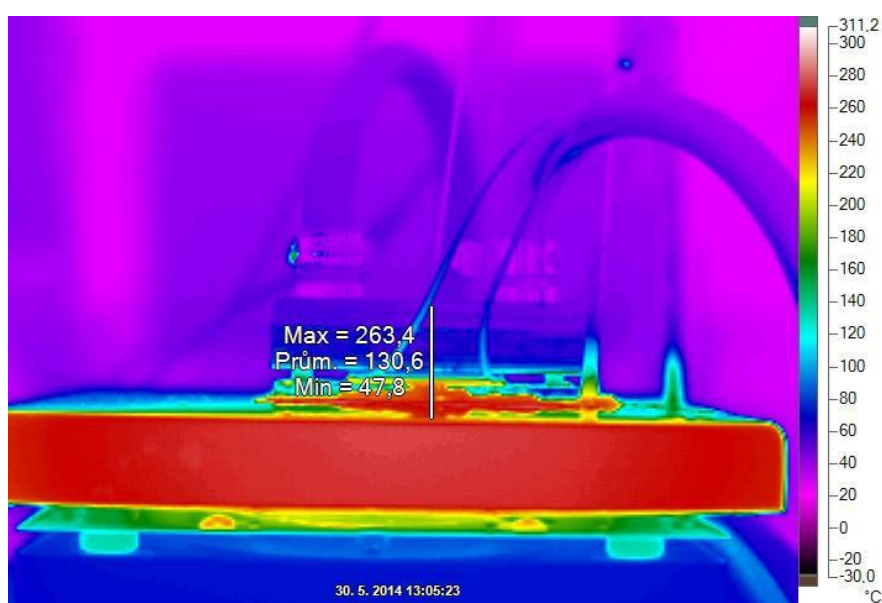
Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Výkon P [W]
220	36,5	256,5	0	0	3,42	0
220	37	257	0,3	0,6	3,05	1,83
220	37,3	257,3	0,5	0,86	2,93	2,5198
220	37,5	257,5	1	1,93	2,34	4,5162
220	37,8	257,8	1,3	2,36	2,15	5,074
220	38	258	1,5	3,14	1,74	5,4636
220	38,1	258,1	2	3,36	1,645	5,5272
220	38,2	258,2	2,15	3,33	1,66	5,5278
220	38,4	258,4	2,3	3,44	1,6	5,504
220	38,6	258,6	2,5	3,56	1,53	5,4468
220	38,7	258,7	4	4,37	1,12	4,8944
220	38,8	258,8	8	5,22	0,66	3,4452
220	38,9	258,9	16	5,83	0,37	2,1571
220	38,9	258,9	Naprázdko	6,61	0	0

Tab. 4.3 Změřené hodnoty zatíženého TEG modulu při rozdílu teplot $\Delta T = 220$ °C.

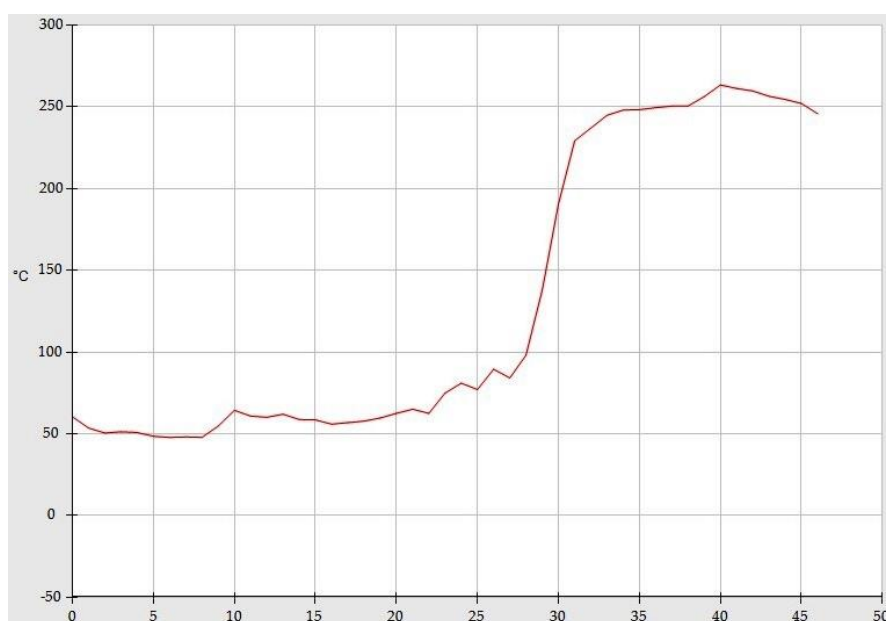


Obr. 4.13 Graf výkonu a napětí TEG modulu v závislosti na proudu proměnnou zátěží pro rozdílu teplot $\Delta T = 220$ °C.

Tabulky vypočtených výkonů, změřených hodnot napětí na zátěži a proudů zátěží pro teplotní rozdíly $\Delta T = 20, 70, 120$ a 170 °C jsou přiloženy v **příloze II**. Stejně tak i výsledné grafy pro tyto teplotní rozdíly. Pro měření při teplotním rozdílu $\Delta T = 220$ °C byl pořízen termokamerou další snímek tepelného toku TEG modulem (*obr. 4.14*), ze kterého byl vytvořen graf prostupu tepla z plotýnky přes modul do chladicího bloku (*obr. 4.15*). Z grafu lze snadno rozeznat dvě přibližně konstantní hladiny teplot (teplota plotýnky ohříváče a teplota chladicího bloku) a mezi nimi ostrý lineární teplotní růst. Tento teplotní růst znázorňuje tepelný tok TEG modulem. TEG modul s ideálními parametry by měl nulový tepelný tok, který by se v tomto místě grafu projevil skokovou změnou teploty (vyšší výkon).

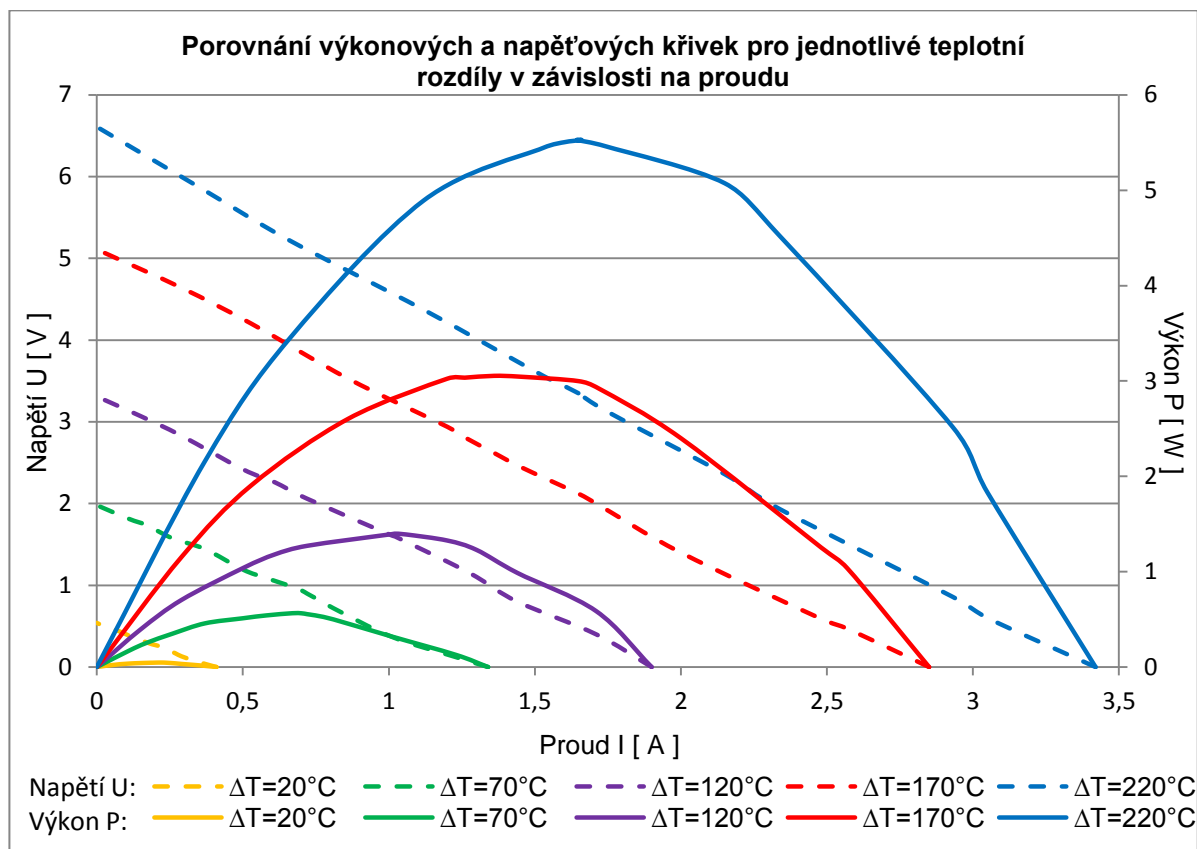


Obr. 4.14 Snímek tepelného toku TEG modulem pořízený termokamerou při $\Delta T = 220$ °C.



Obr. 4.15 Graf prostupu tepla z plotýnky přes modul do chladicího bloku při $\Delta T = 220$ °C.

V grafu na obrázku 4.16 jsou pospolu vyobrazeny křivky vypočtených výkonů a změřených napětí v závislosti na proudu proměnnou zátěží všech teplotních rozdílů $\Delta T = 20, 70, 120, 170$ a 220 °C. S rostoucím teplotním rozdílem logicky roste i maximální možný výkon TEG modulu. Obecně křivka výkonu TEG modulu v závislosti na proudu opisuje parabolu.

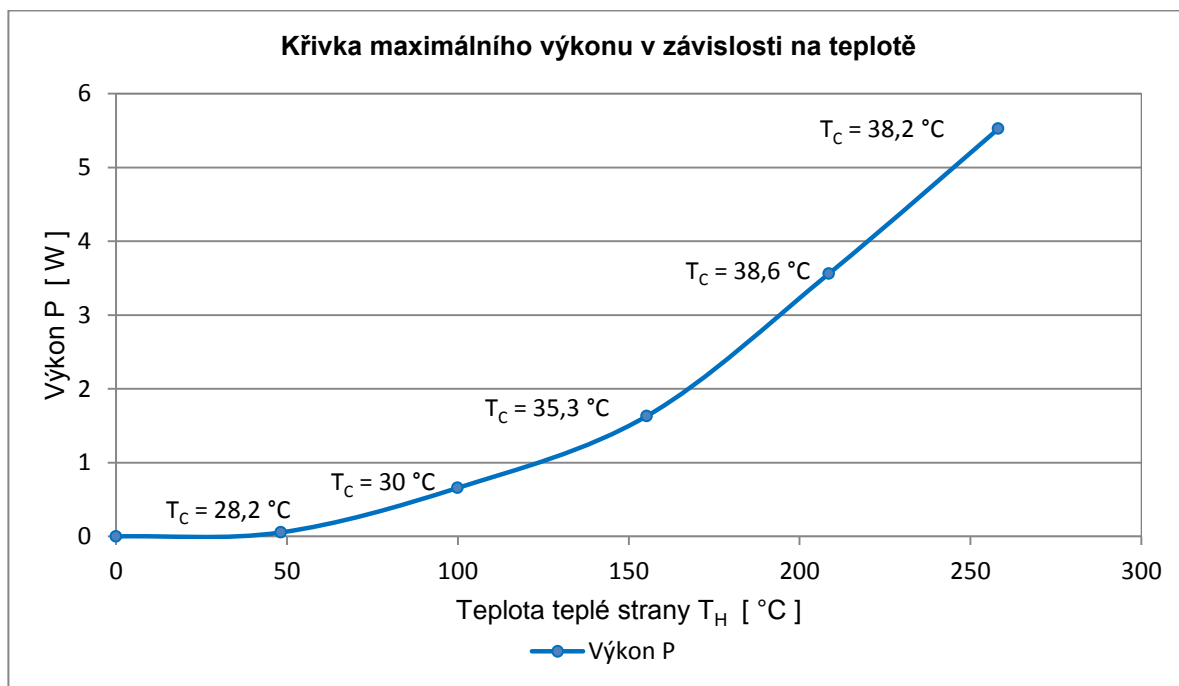


Obr. 4.16 Jednotný graf výkonů a napětí všech teplotních rozdílů ΔT .

Optimální hodnoty ideálních zátěží a jejich maximálních výkonů pro všechny teplotní rozdíly byly shrnuty do tabulky 4.4. Z té byl vytvořen graf na obrázku 4.17, který představuje růst maximálního výkonu při ideálních odporových zátěžích v závislosti na teplotě T_H .

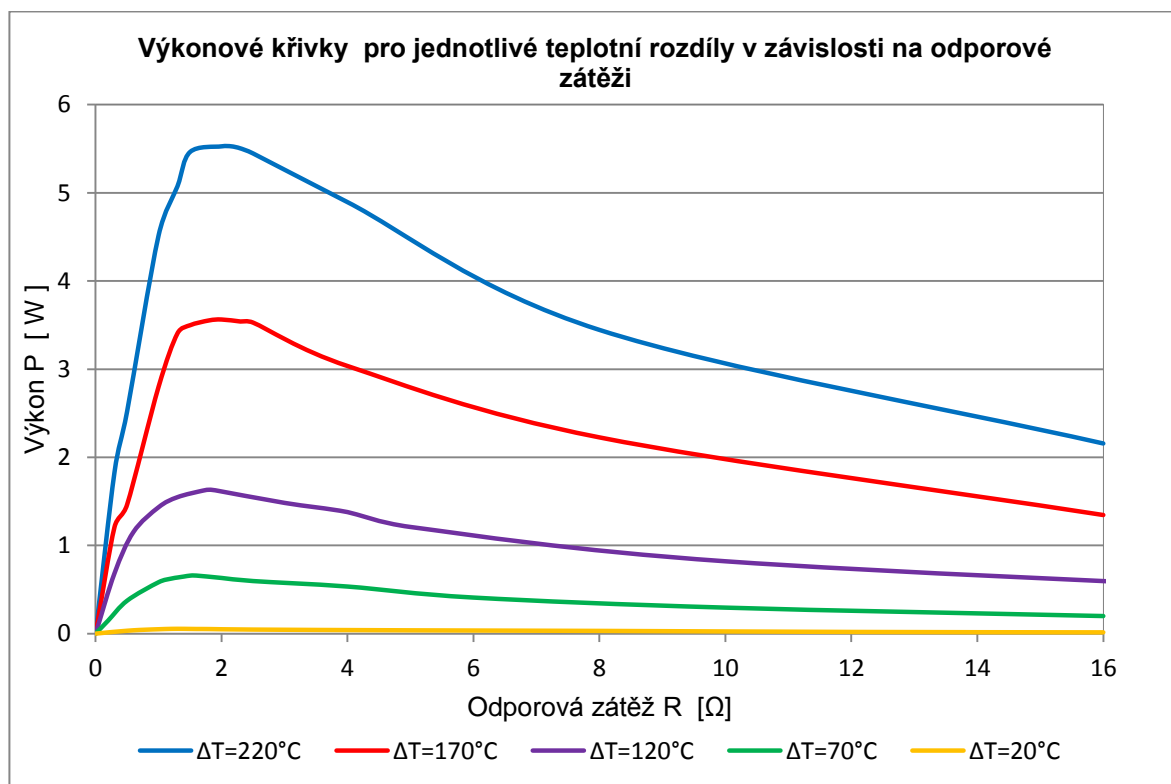
Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Ideální zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Maximální výkon P [W]
20	28,2	48,2	1,4	0,26	0,21	0,0546
70	30	100	1,6	0,983	0,67	0,6586
120	35,3	155,3	1,8	1,6	1,02	1,632
170	38,6	208,6	2	2,62	1,36	3,5632
220	38,2	258,2	2,15	3,33	1,66	5,5278

Tab. 4.4 Souhrn ideálních hodnot max. výkonů TEG modulu pro jednotlivé ΔT .



Obr. 4.17 Graf růstu maximálních výkonů v závislosti na teplotě.

Podobně jako v grafu na obrázku 4.16 je i v grafu na obrázku 4.18 vyobrazen souhrn křivek výkonů, tentokrát v závislosti na připojeném zátěžovém odporu. Z grafu je patrný ostrý nárůst výkonů až do jejich maxima při ideálních hodnotách zátěží. Poté výkon s rostoucí zátěží pozvolna klesá.



Obr. 4.18 Jednotný graf výkonů TEG modulu v závislosti na odporu pro všechny ΔT .

Použité přístroje:

Digitální teplotní datalogger – Greisinger GMH 3230 (typ K); inv. č. 203215

Digitální multimetr – Ben electronic MY-64

2 x Digitální multimetr – Metex M-3890D USB; inv. č. 171137

Termokamera - IR Fusion Technology TI-55FT; inv. č. 500929

Proměnný odpor – IP 00; 16 Ω ; 4 A; 70 V DC; 48 V AC

Digitální ohříváč – WiseStir MSH-20D (25°C-380°C); inv. č. 209933

Čerpadlo – Askoll M224; 220-240V AC; 50 Hz; 0,2 A; 34 W

Ventilátor – OPP Znojmo; 11 m³/min.; 16 W; 220 V AC; 50 Hz; inv. č. 10619

4.3 Závěr měření TEG modulu

Všechny výsledné charakteristiky odpovídají charakteristikám danými výrobcem (příloha I.) až na drobné odchylky způsobené neudržením konstantních teplot studené strany T_C teplé strany T_H . I když byly dodrženy jednotlivé teplotní rozdíly ΔT , s rostoucí teplotou studené strany T_C se výstupní parametry TEG modulu zhoršují. Bohužel nebyly změřeny maximální parametry TEG modulu, tedy při rozdílu teplot $\Delta T = 270$ °C. Nejvyšší možná nastavitelná teplota ohříváče (380 °C) neumožňovala dosáhnout a udržet na teplé straně TEG modulu teplotu ± 300 °C. To ovšem vypovídá o velmi dobré účinnosti navrženého a zkonstruovaného chladicího okruhu. Při nejvyšší dosažené teplotě $T_H = 250$ °C byla na ohříváči nastavena teplota 380 °C. Z toho vyplývá, že pro dosažení teploty $\Delta T = 270$ °C by byla potřeba ohříváč s maximální možnou teplotou přibližně 450 °C nebo vyšším výkonem. Odchylky v měření mohly vzniknout také výraznou teplotní hysterezí ohříváče. Rozdíly teplot nebylo jednoduché udržet na konstantních hodnotách, a proto nebylo měření plynulé. Mimo jiné bylo v měření prokázáno, že ideální zátěž pro dosažení maximálního výkonu TEG modulu mírně roste (v měřeném rozsahu 1,4 až 2,15 Ω) s rozdílem teplot ΔT . Je nutné podotknout, že teploty nasnímané termokamerou na obrázcích 4.11, 4.14 a 4.15 nemusí nutně odpovídat hodnotám skutečným. Termokamera snímá pouze teploty povrchové a ty mohly být snadno ovlivněny podmínkami okolního prostředí (tlak 976 hPa; teplota 24 °C, vlhkost 58%), prouděním horkého vzduchu z plotýnky v okolí chladicího bloku a špatnou emisivitou všech snímaných povrchů. Měření prokázalo, že sekundární chladicí systém v automobilu je schopen velmi efektivně chladit studenou stranu TEG modulů ve výfukových generátorech. Byly změřeny parametry jednoho kusu TEG modulu, lze předpokládat, že ve výsledném zařízení výfukového generátoru budou výkony všech TEG modulů sčítány.

Závěr

Z poznatků získaných při studiu tematiky termoelektrických jevů je zjevné, že využití termoelektrických článků ve všech svých modifikacích (teplotní termočlánky, TEC moduly, TEG moduly) je v elektrotechnice velmi početné. Byl zpracován základní přehled jejich historie, včetně rozboru elementárních pojmů a rovnic těchto jevů. Ukázalo se, že kovové teplotní termočlánky, jejichž funkce je založena na principu Seebeckova termoelektrického jevu, plní důležitou úlohu v oblasti měření teplot. Jejich velkou výhodou oproti ostatním snímacím prvkům je velký teplotní rozsah umožňující měřit i vysoké teploty ve slévárenském průmyslu s výbornou přesností. Podstatnou výhodou je také fakt, že jejich výstupem je elektrický signál. Ten umožňuje přímé zakomponování do regulačního systému bez potřeby převodníku z neelektrických veličin. Přímá aplikace Peltierova jevu v termoelektrickém článku propůjčuje TEC modulům především výborné chladicí vlastnosti, které lze užívat v mnohačetných aplikacích slaboproudé a výkonové elektroniky. Tyto aplikace jsou v práci velmi obsáhle popsány, stejně tak i struktura TEC a TEG modulů. TEG moduly, které na principu Seebeckova jevu dokáží s účinností 4 - 10% přímo přeměňovat tepelnou energii na energii elektrickou mají před sebou velkou budoucnost v oblasti tzv. sklizení energie. Veškeré odpadní teplo nebo dokonce i teplo, které je dnes v energetice zužitkováno turbínami s přibližně 30% účinností, by mohlo být v budoucnu zužitkováno termoelektrickými generátory. Vše záleží na budoucím vývoji polovodičových materiálů, které by jim zajistily vyšší účinnost. Účinnost TEG modulů v posledních několika dekádách vzrostla až dvojnásobně. To by jim mohlo značit slibnou budoucnost. Vzhledem k nulové údržbě, životnosti i stovky let a nepřítomnosti mechanických částí je to ekonomicky velmi prospěšný způsob výroby elektřiny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 152 s. Malá elektrotechnická knihovna; sv. 24., ISBN 04-572-63.
- [2] KOŠTÁL, Josef. *Významné osobnosti vědy a techniky: Thomas Johann Seebeck* [online]. roč. 2011, č. 07 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44253
- [3] GOLAB, František, KAMENČÁK, František. *Termoelektrické jevy a jejich užití*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, Vydání 1., 1975, 83 s.
- [4] ŠAFÁŘOVÁ, Klára. *Laboratoř mikroskopie atomárních sil* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/vys/fermi.html>
- [5] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [6] MIHÁLIK, Miro. BMW Turobosteamer a TEG: Tepelná elektrárna na kolech.[online]. roč. 2011, č. 08 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/bmw-turobosteamer-a-teg-tepelna-elektrarna-na-kolech/>
- [7] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977. Automatizace a regulace, svazek 21.
- [8] HONNER, Milan. *Měření ve fyzikálních technologiích: texty k laboratorním cvičením*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 144 s. ISBN 80-708-2971-0.
- [9] CON BRIO. *Peltierův jev: Výhody Peltierova chlazení* [online]. Pardubice [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: www.conbrio.cz
- [10] Peltierovy termobaterie. DŘÍNEK, Milan. [online]. Redakce HW, 1999 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termo-baterie.html>
- [11] California Institute of technology. *Thermoelectrics: Caltech materials sciens* [online]. California, 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/index.html>
- [12] Ferro Tec. *Thermoelectric Module Applications* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/applications/thermal>
- [13] Arctic TEC: Technologies. [online]. 2011 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.arctitec.com/tec/9-micro-tec.html>
- [14] TEC Microsystems: *Thermoelectric Coolers for Cooled TOSA Applications*. [online]. 2009 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.tec-microsystems.com/EN/Blog_news/Entries/2009/3/12_Going_TOSA_-_Thermoelectric_Coolers_for_Cooled_TOSA

Applications.html

- [15] Toptica Photonics: *DFB – Distributed Feedback Diodes*. [online]. [cit. 2014-0-15]. Dostupné z: <http://www.toptica.com/?id=127>
- [16] Laser Rocket team: *Stratosfera project*. [online]. [cit. 2014-0-17]. Dostupné z: <http://www.missilistica.it/laser/dpss.htm>
- [17] Alibaba.com: *Peltier water cooling air conditioner*. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-detail/2014-New-arrival-high-quality-6pieces_1695056442.html?s=p
- [18] KABEŠ, Karel. *Význam termoelektrických generátorů rychle roste* [online]. roč. 2011, č. 04 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43318
- [19] VTM E15: *Jak lze získat v kosmu energii bez slunce?*. [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/jak-lze-ziskat-v-kosmu-energii-bez-slunce>
- [20] Space.com: *Nuclear Generators Power NASA Deep Space Probes (Infographic)*. TATE, Karl. [online]. 2011 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.space.com/13702-nuclear-generators-rtg-power-nasa-planetary-probes-infographic.html>
- [21] Case Study Fiat: *The First Light Commercial Vehicle Equipped with a Thermo - electric Generator*. [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.automotive-iq.com/PDFS/IQ_Article_Thermoelectricity_FIAT_case_study.pdf
- [22] Financial post: *Take a tour of the Airbus 'plane of the future' that will blow your mind*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://business.financialpost.com/2012/11/22/take-a-tour-of-the-airbus-plane-of-the-future-that-will-blow-your-mind/>
- [23] Small Thermoelectric Generators. SNYDER, G. Jeffrey. [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf
- [24] SWIFTECH MCW6500- T. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://xtreview.com/addcomment-id-1657-view-Swiftech-MCW6500--T.html>
- [25] Charakteristiky termočlánků. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/TEM/senzory/grafy.htm>
- [26] Podobizny. [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.wikipedia.org/>
- [27] Thermonamic: *High Performance TEHP Series Thermoelectric Power Module*. [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=801
- [28] JÍLEK, Miroslav. *Thermomechanics*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 2000, 176 s. ISBN 80-010-2077-0.

Seznam příloh

- Příloha I. – obsahuje datasheet parametrů a charakteristik udávaných výrobcem pro TEG modul TEHP1-1264-0.8. Rozsah 2 s. [27]
- Příloha II. – obsahuje tabulky zbylých naměřených hodnot a výsledné grafy pro teplotní rozdíly $\Delta T = 20, 70, 120$ a 170 °C. Rozsah 4 s.

Příloha I.

Datasheet TEG modulu – TEHP1-1264-0.8

Thermonamic Module

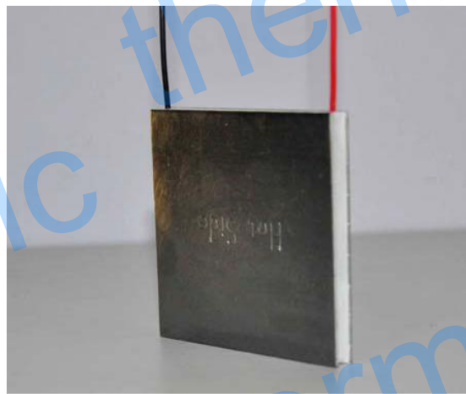
High Performance and Highly Reliable Solution
for Cooling and Heating Applications

Specification of Thermoelectric Module

TEHP1-1264-0.8

Description

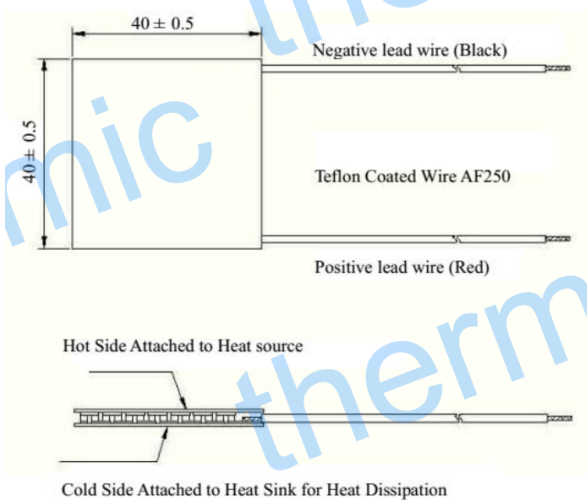
The power module is designed and manufactured by our unique technology for converting heat source directly into electricity. The module is Bi-Te based thermoelectric module that can work at the temperature of as high as 330 °C (626 °F) heat source continuously and up to 400 °C (752 °F) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase therefore. The module is stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides of the ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature.



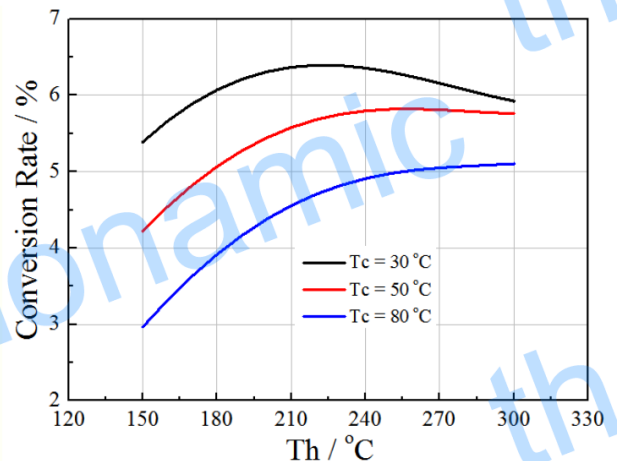
Specification of the Module

Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	8
Matched Load Resistance (ohms)	1.59
Matched load output voltage (V)	4
Matched load output current (A)	2.4
Matched load output power (W)	9.8
Heat flow across the module(W)	≈ 188
Heat flow density(W cm ⁻²)	≈ 11.8
AC Resistance (ohms) Measured under 27 °C at 1000 Hz	0.8 ~ 1.0

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc



Noted: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

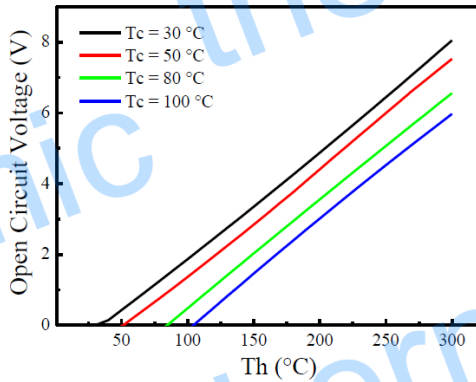
Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products.
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com Web Site: www.thermonamic.com

Thermonamic Module

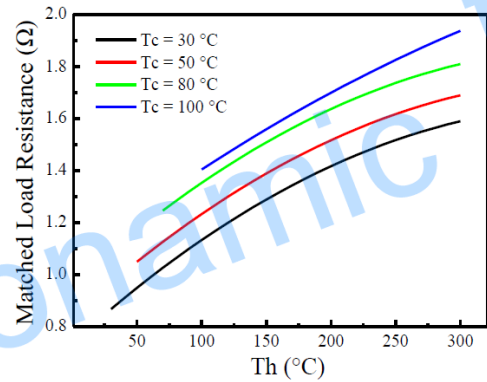
High Performance and Highly Reliable Solution
for Cooling and Heating Applications

Performance Curves of the Module

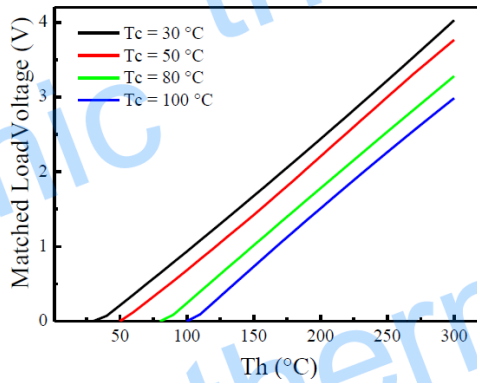
TEHP1-1264-0.8



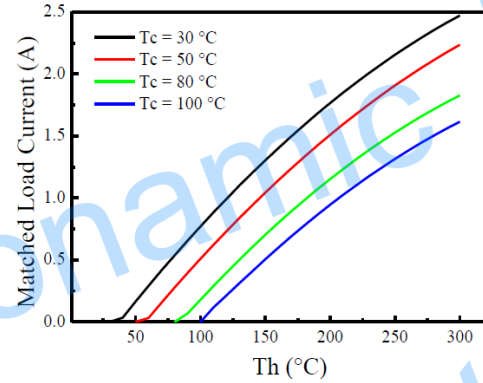
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



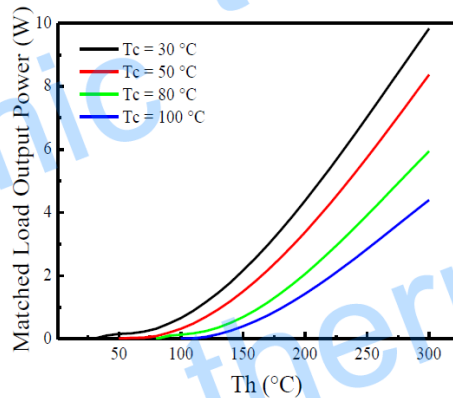
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



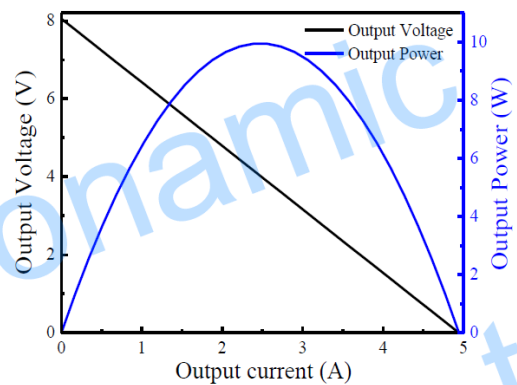
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current

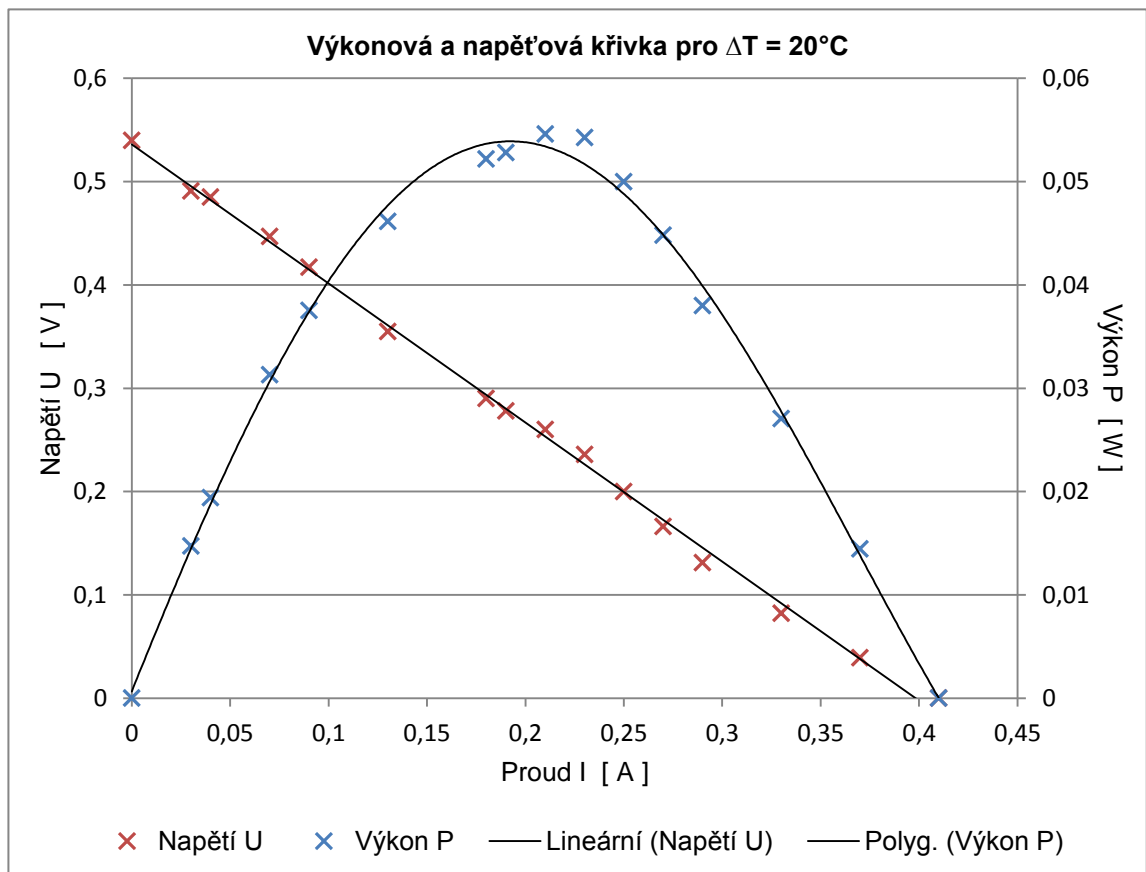
under $T_h=300\text{ °C}$ and $T_c=30\text{ °C}$

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products.
Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com Web Site: www.thermonamic.com

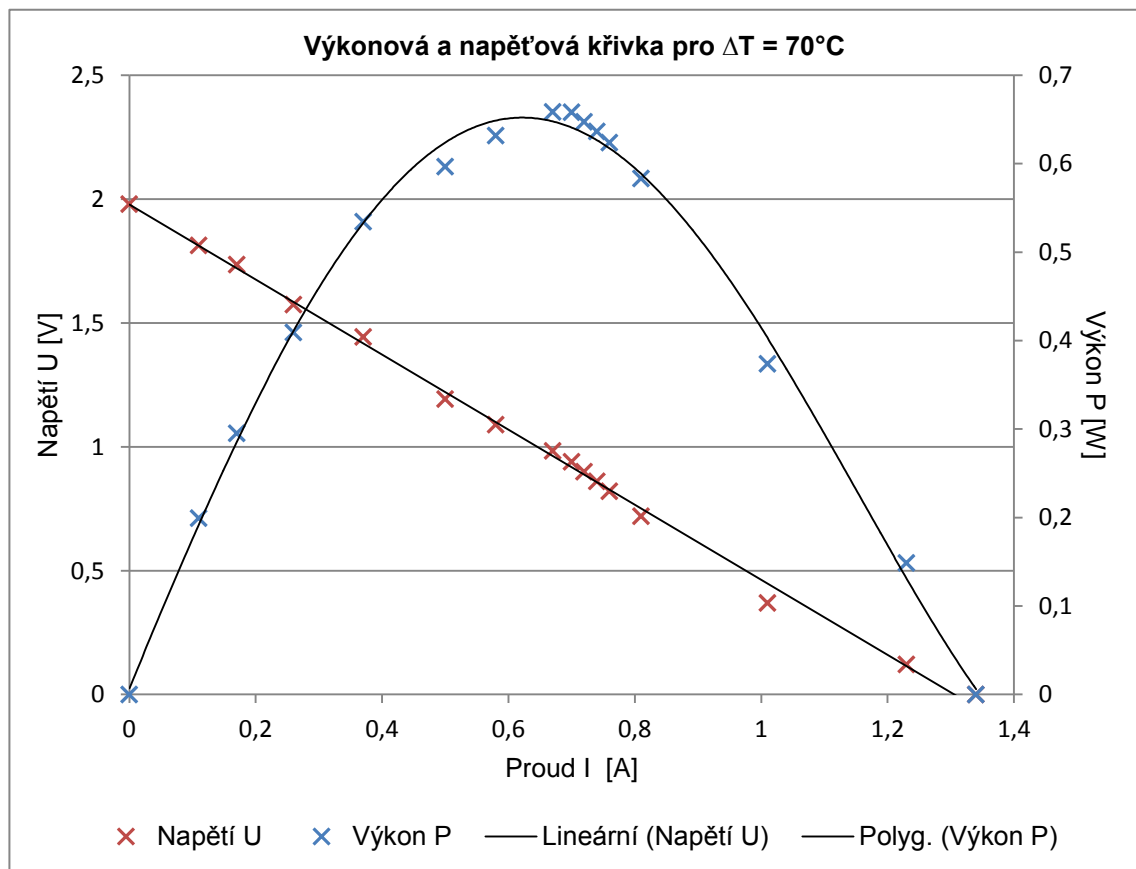
Příloha II.

Tabulky naměřených hodnot a grafů pro $\Delta T = 20, 70, 120$ a 170 °C.

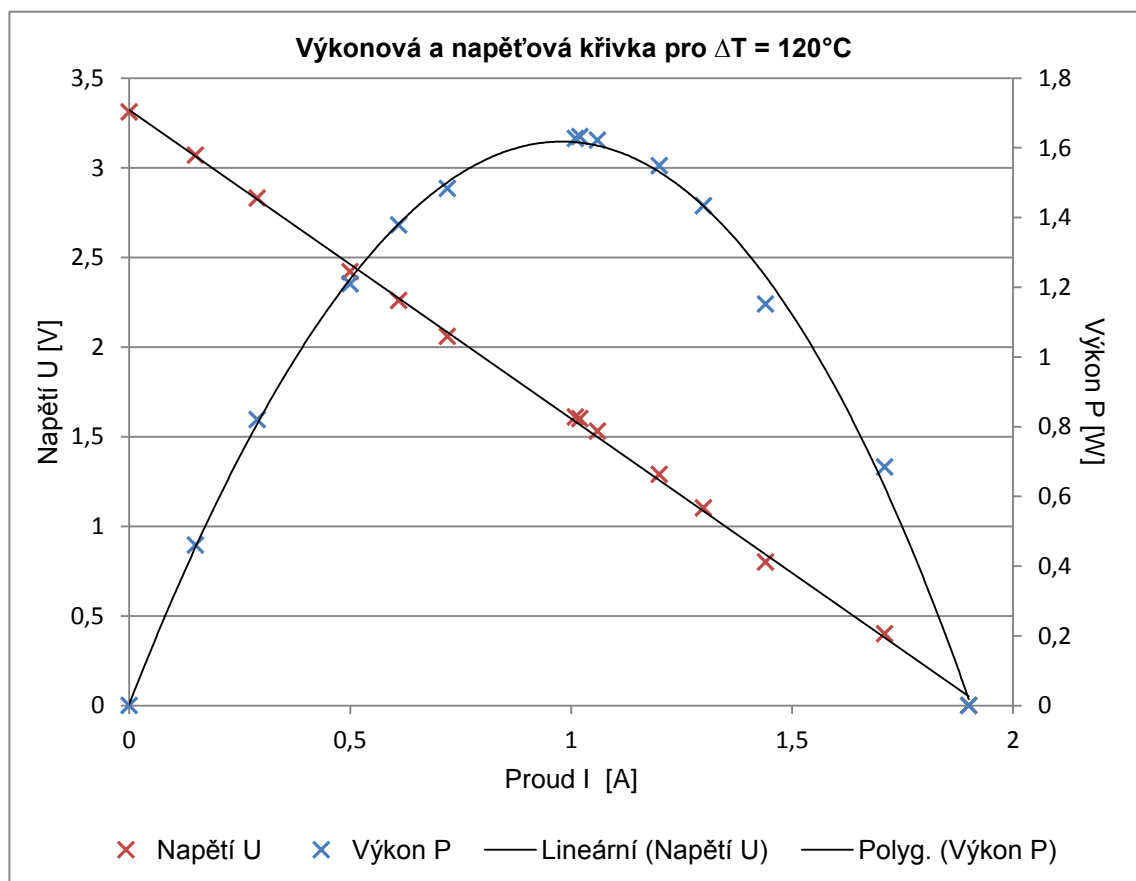
Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Výkon P [W]
20	29,2	49,2	0	0	0,41	0
20	29,8	49,8	0,2	0,039	0,37	0,01443
20	29,4	49,4	0,4	0,082	0,33	0,02706
20	29,1	49,1	0,6	0,131	0,29	0,03799
20	28,9	48,9	0,8	0,166	0,27	0,04482
20	28,5	48,5	1	0,2	0,25	0,05
20	28,3	48,3	1,2	0,236	0,23	0,05428
20	28,2	48,2	1,4	0,26	0,21	0,0546
20	28,2	48,2	1,6	0,278	0,19	0,05282
20	28,2	48,2	1,8	0,29	0,18	0,0522
20	27,8	47,8	2,5	0,355	0,13	0,04615
20	27,7	47,7	5	0,417	0,09	0,03753
20	27,7	47,7	8	0,447	0,07	0,03129
20	27,7	47,7	12	0,485	0,04	0,0194
20	27,7	47,7	16	0,491	0,03	0,01473
20	27,6	47,6	Naprázdko	0,54	0	0



Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Výkon P [W]
70	30,6	100,6	0	0	1,34	0
70	30,6	100,6	0,2	0,121	1,23	0,14883
70	30,6	100,6	0,5	0,37	1,01	0,3737
70	29,9	99,9	1	0,72	0,81	0,5832
70	29,2	99,2	1,2	0,821	0,76	0,62396
70	29	99	1,3	0,86	0,74	0,6364
70	28,8	98,8	1,4	0,899	0,72	0,64728
70	29,2	99,2	1,5	0,94	0,7	0,658
70	30	100	1,6	0,983	0,67	0,65861
70	28,7	98,7	2	1,089	0,58	0,63162
70	30	100	2,5	1,193	0,5	0,5965
70	30,2	100,2	4	1,444	0,37	0,53428
70	30,6	100,6	6	1,574	0,26	0,40924
70	30,6	100,6	10	1,736	0,17	0,29512
70	30,6	100,6	16	1,813	0,11	0,19943
70	30,6	100,6	Naprázdko	1,98	0	0



Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Výkon P [W]
120	31	151	0	0	1,9	0
120	35,6	155,6	0,3	0,4	1,71	0,684
120	35,6	155,6	0,6	0,8	1,44	1,152
120	32,6	152,6	1	1,103	1,3	1,4339
120	35,2	155,2	1,3	1,29	1,2	1,548
120	35,6	155,6	1,7	1,53	1,06	1,6218
120	35,3	155,3	1,8	1,6	1,02	1,632
120	35,7	155,7	1,9	1,61	1,01	1,6261
120	34,7	154,7	3	2,06	0,72	1,4832
120	34,4	154,4	4	2,26	0,61	1,3786
120	33,9	153,9	5	2,42	0,5	1,21
120	35,6	155,6	10	2,83	0,29	0,8207
120	35,6	155,6	20	3,07	0,15	0,4605
120	35,6	155,6	Naprázdko	3,31	0	0



Rozdíl Teplot ΔT [°C]	Studená strana T_C [°C]	Teplá strana T_H [°C]	Zátěž R [Ω]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Výkon P [W]
170	31	201	0	0	2,85	0
170	32,5	202,5	0,3	0,47	2,57	1,2079
170	34	204	0,5	0,59	2,48	1,4632
170	34,9	204,9	1	1,4	2	2,8
170	37,8	207,8	1,3	1,98	1,72	3,4056
170	35,8	205,8	1,5	2,12	1,65	3,498
170	36,5	206,5	1,8	2,45	1,45	3,5525
170	38,6	208,6	2	2,62	1,36	3,5632
170	38,7	208,7	2,3	2,81	1,26	3,5406
170	36,8	206,8	2,5	2,94	1,2	3,528
170	37,2	207,2	4	3,53	0,86	3,0358
170	37,4	207,4	8	4,2	0,53	2,226
170	38,3	208,3	16	4,64	0,29	1,3456
170	38,5	208,5	Naprázdko	5,11	0	0

