

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Fyzikální charakteristiky polovodičových prvků

diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vypracoval: Bc. Michal Taičman

PRAHA 2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra fyziky
Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Taičman Michal

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Fyzikální charakteristiky polovodičových prvků

Anglický název

Physical characteristics of the semiconductor elements

Cíle práce

- Navrhnout měřicí metodu pro měření fyzikálních charakteristik vybraných elektronických součástek.
- Systematicky prostudovat fyzikální charakteristiky vybraných elektronických součástek.
- Učinit vlastní závěry z hlediska vhodnosti těchto součástek k určitým aplikacím.

Metodika

Systematické studium polovodičových součástek z hlediska fyzikálních charakteristik. Návrh měřicích metod, proměření příslušných charakteristik a vlastní závěry. Posoudit vybrané aplikace těchto součástek v technické praxi.

Osnova práce

Studium literatury a rešeršní část práce během 1. poloviny r. 2012.

Vlastní měření během 2. poloviny r. 2012.

Sepsání práce během ledna a února 2013.

Odevzdání práce v dubnu 2013.

Rozsah textové části

40 až 45 stran

Klíčová slova

Polovodič, dioda, elektronika

Doporučené zdroje informací

L. Eckertová a kol., Fyzikální elektronika pevných látek. Karolinum, Praha, 1992, ISBN 80-7066-535-1.

Vedoucí práce

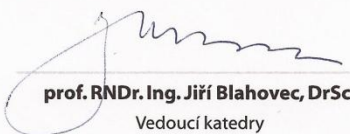
Libra Martin, prof. Ing., CSc.

Termín zadání


listopad 2011

Termín odevzdání

duben 2013



prof. RNDr. Ing. Jiří Blahovec, DrSc.
Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 6.2.2012

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Fyzikální charakteristiky polovodičových prvků“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Martina Libry, CSc. a využil jsem jen citovaných pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Informace, u kterých není uvedena citace, vycházejí ze zkušeností autora práce nebo z informací odborníka pracujícího v tomto oboru.

V Praze dne:

.....

Bc. Michal Taičman

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. za cenné rady při zpracování diplomové práce a dále za pedagogickou a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Pilnému za pomoc při řešení technických problémů. Taktéž děkuji paní Bc. Vendule Marešové za jazykovou korekturu.

V Praze dne:

.....

Bc. Michal Taičman

Fyzikální charakteristiky polovodičových prvků

diplomová práce



Abstrakt:

Obsah této práce se zabývá problematikou termoelektrického článku. Úkolem práce je bližší seznámení čtenáře s problematikou užití termočlánku. První polovina práce je čistě teoretická a slouží k zasvěcení čtenáře do problematiky. V této části jsou vysvětleny pojmy jako například typy polovodičů, typy vodivosti a stavy na přechodech polovodičů. Dále nahlédneme do historické posloupnosti objevů, které vedly ke vzniku samotného termočlánku, taktéž známého jako Peltierův článek. V posledních dvou kapitolách teoretické části je popsán základní princip článku a jeho různé typy. Teoretická část je zakončena popisem TEC článku a dále popisem a ukázkami využití TEG článku v praxi.

V úvodu praktické části se věnuji měření charakteristik Peltierova článku, konkrétně typu M-TEC1-12710 HT. Hlavním cílem praktické části je přestavba modelu auta na dálkové ovládání, respektive změna jeho napájecí soustavy. Model nebude napájen bateriemi, ale energie bude získávána přeměnou tepelné energie na elektrickou pomocí Peltierova článku. Jako zdroj tepla bude použit líh. Poslední kapitola praktické části se věnuje chlazení procesoru počítače pomocí Peltierova článku a následné jeho přetaktování (tzv. OverClocking).

Klíčová slova:

Peltierův článek, Sebeckův jev, Thomsonův jev, Peltierův jev, termočlánek, termobaterie

Abstract:

The content of this work deals with thermocouple. The goal of this thesis is to familiarize readers with the problem of thermocouple usage. The first half of the work is purely theoretical and introduces readers to the issue. In this part some crucial terms are explained, for example the types of semiconductors, the types of conductivity, and the state transitions in semiconductors. Further, we look into the history of discoveries which lead to the invention of thermocouple itself, commonly known as Peltier module. In the last two parts of the theoretical section, the basic working principle of thermocouple and the different types of thermocouples are explained. The theoretical part is finished with the description of TEC module followed by the description of TEG module with the examples of use in practice.

The introduction of the practical part deals with the measurement of the characteristics of the Peltier module, namely type M-TEC1-12710 HT. The main goal of the practical part is the reconstruction of a remote control car model, more precisely the change of its power system. The model will not be powered up by batteries but the energy will be obtained by the transformation of heat energy into electric energy with the use of the Peltier module. As the source of the heat ethyl alcohol is used. The last chapter of the practical part deals with the cooling of computer processor unit by the Peltier module and its subsequent OverClocking.

Key words:

Peltier module, Seebeck effect, Thomson effect, Peltier effect, thermocouple, thermobattery

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika.....	2
2.1	Cíl práce.....	2
2.2	Metodika	2
3	Polovodiče.....	3
3.1	Vlastní polovodič.....	3
3.2	Nevlastní polovodič.....	3
3.2.1	Vodivost typu N (negativní).....	4
3.2.2	Vodivost typu P (pozitivní)	4
3.3	Přechod typu PN	5
3.3.1	Bez zdroje napětí.....	5
3.3.2	Závěrný směr.....	5
3.3.3	Propustný směr	6
3.3.4	Dioda	6
4	Historie objevování termoelektrických jevů	7
4.1	Seebeckův jev.....	7
4.2	Peltierův jev	9
4.3	Thomsonův jev	10
5	Princip a provedení článku.....	13
5.1	Základní princip.....	13
5.2	Více přechodů znamená větší výkon.....	14
5.3	Různé typy provedení Peltierových článků	15
5.3.1	Klasické „čtvercové“ články.....	15
5.3.2	Kaskádové články	16
5.3.3	Články speciálních tvarů.....	17
6	TEC a TEG článek	18
6.1	TEC článek	18

6.2	TEG článek	18
6.2.1	Malá domácí elektrárna	18
6.2.2	Využití odpadního tepla u automobilů.....	19
6.2.3	Hodinky využívající teplo z ruky	21
6.2.4	Historická ruská lampa	21
7	Praktická část - měření Peltierova článku	23
7.1	Potřebné vybavení a postup měření.....	23
7.2	Tabulky s naměřenými hodnotami	24
7.3	Výsledné grafy.....	26
7.4	Ukázka z termokamery při měření Peltierova článku	29
8	Praktická část - Vlastní řešení práce.....	31
8.1	Inspirace	31
8.2	Zakoupení modelu a Peltierova článku	32
8.3	Chlazení Peltierova článku	32
8.4	První kroky.....	33
8.5	Druhý pokus	34
8.6	Téměř finální model	35
8.7	Dokončení modelu	36
8.8	Zobrazení provozních teplot pomocí termokamery	37
8.9	Závěrem k modelu.....	39
9	Praktická část - Chlazení PC.....	41
9.1	Sestava a testy.....	41
9.2	Zhodnocení výsledků.....	42
10	Závěr.....	43
11	Citovaná literatura	45

1 Úvod

Téma této diplomové práce „Fyzikální charakteristiky polovodičových prvků“ je vybráno záměrně, neboť volně navazuje na moji bakalářskou práci, která pojednávala o LED diodách. Budu se zabývat zejména termočlánkem, tak zvaným Peltierovým článkem.

Ne každý ví, co to Peltierův článek je a co si pod tímto pojmem má představit. K jeho objevení vedla náhoda, při které Thomas Johann Seebeck v roce 1821 zjistil, že dva kovy s různými teplotami indukují nepatrné napětí. Tohoto faktu využil v roce 1834 Jean Charles Athanase Peltier, který ve svých pokusech poukázal na to, že při průchodu elektrické energie přechodem mezi dvěma vodiči je teplo vytvářeno, nebo odebráno (v závislosti na polaritě napájení). Podstatu tohoto jevu prokázal ve svých pokusech v roce 1838 fyzik Heinrich Friedrich Emil Lenz. Tento úkaz byl tedy pojmenován Peltierův jev.

A co si tedy pod pojmem Peltierův článek představit? Jedná se o dvě tenké keramické destičky, které jsou uprostřed spojeny mnoha NP přechody. Po přiložení napětí na tyto přechody začne mezi stranami destičky vznikat teplotní rozdíl. Totéž platí i v obráceném případě, při teplotním rozdílu vzniká napětí.

Abychom byli schopni získat elektrickou energii, je nejprve třeba dosáhnout teplotního rozdílu. Toho nejsnáze docílíme ohřevem „teplé“ strany článku. K ohřevu nám může sloužit jakýkoliv tepelný zdroj, jako např. kamna, krb, vodovodní trubka, komín, výfuk a mnoho dalších předmětů, rovněž lze využít sluneční energii. Při vhodně navržené soustavě zrcadel můžeme směřovat sluneční paprsky přímo na článek a tím jej ohřívat. Z výčtu možností ohřevu vyplývá, že získání energie z článku není obtížné. Bohužel články mají velmi nízkou účinnost (výrobci uvádějí kolem 3 - 5 % pro Bi_2TE_3 materiály, v praxi však této hodnoty nelze dosáhnout), nicméně díky výzkumům a novým technologiím vznikají stále lepší články a odhaduje se, že se účinnost zvýší až na 10 %. Články jsou také využívány ve vesmírných sondách, a to hlavně u sond, které jsou velmi vzdálené Slunci, a nedostatek slunečního záření proto znemožňuje užití solárních článků. Mezi nejznámější sondy patří Voyager 1 a Voyager 2. Jako zdroj tepla většinou slouží radioaktivní prvky (Plutonium).

Při stále se zvyšujícím problému s nedostatkem fosilních paliv má Peltierův článek dle mého soudu velkou budoucnost na poli alternativního získávání energie.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této práce je osvětlit problematiku termočlánků, jejich vlastnosti a možnosti využití jako případných zdrojů alternativní energie. Vysvětlit různé typy termočlánků, základní principy přeměny energie (ať již tepelné na elektrickou či obráceně) a dále uvést možnosti užití termočlánků v technice. Hlavním cílem práce je přestavba modelu auta na dálkové ovládání využívající ke svému pohybu elektrickou energii získávanou z baterií. Baterie jsou nahrazeny termočlánkem, kde teplo je získáváno spalováním lihu. Dále užiji článek k jeho primárnímu účelu, kterým je chlazení. Užití bude spočívat v chlazení procesoru počítače za účelem zvýšení výkonu pomocí přetaktování (tzv. OverClocking).

2.2 Metodika

Informace, data a údaje k sepsání této diplomové práce byly čerpány z internetových zdrojů. Nejčastěji se jednalo o zahraniční zdroje v anglickém jazyce, a to z toho důvodu, že české zdroje byly většinou nedůvěryhodné nebo již jednou někým přeložené originály. V neposlední řadě bylo užito tištěných publikací. Obrázky jsou čerpány z internetových zdrojů, nebo jsou vlastním dílem autora. Inspirací pro přestavbu modelu v praktické části byl internetový blog - Hawelson.ic.cz. Avšak samotné technické řešení přestavby je čistě autorova vlastní práce. Poslední kapitola zabývající se chlazením PC vychází z poznatků, které autor získal během dlouhodobého působení na poli informační techniky.

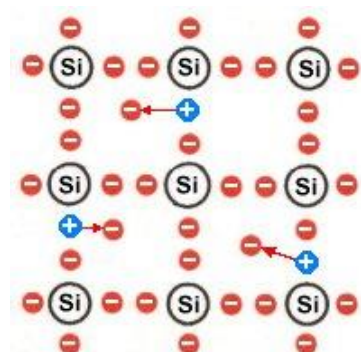
3 Polovodiče

Z elektrického hlediska můžeme látky rozdělit na tři základní skupiny. Tedy na vodiče, nevodiče a polovodiče. Polovodiče jsou látky, které mají měrný odpor několikanásobně větší než kovové vodiče a zároveň menší než izolanty. Jejich elektrická vodivost se silně zvyšuje s rostoucí teplotou. Naopak je tomu právě u vodičů, kde s rostoucí teplotou vodivost klesá. Vodivost polovodičů lze ovlivnit dodáním světelné nebo elektrické energie a dále změnou vnitřní struktury. Změnou struktury se rozumí přidání příměsí jiného prvku do daného polovodiče. Mezi nejvýznamnější polovodiče patří křemík (Si), germanium (Ge), selen (Se), fosfor (P), arzen (As) a další prvky [1; 2; 3; 4].

3.1 Vlastní polovodič

Elektrické vlastnosti polovodičů lze nejlépe vysvětlit na základě struktury jejich krystalové mřížky. Například u čtyřvazného křemíku je každý z valenčních elektronů jednoho atomu vázán touto vazbou s elektronem atomu sousedního. Při nízkých teplotách se křemík tedy chová jako izolant. Při dodání energie (zahřátí nebo přívod elektrické energie) se ionty v krystalové mřížce rozkmitají a dochází k uvolňování valenčních elektronů. Takto uvolněný elektron opustí své místo v mřížce (na obr. šipky). Místo, které zůstalo po uvolnění elektronu volné, se nyní tváří jako kladné, tedy „díra“ (na obr. modře). Do „díry“ může přeskočit jiný uvolněný elektron z krystalové mřížky, a doplní tak chybějící záporný náboj. Dojde k rekombinaci. Kladná „díra“ se však objeví na jiném místě, vypadá to tedy, jako by se „díry“ pohybovaly v krystalové mřížce z jednoho místa na jiné. Elektronová nebo děrová vodivost čistých polovodičů je označována jako vlastní vodivost [1; 4].

Obrázek 1 Vlastní polovodič - (zdroj [1])



3.2 Nevlastní polovodič

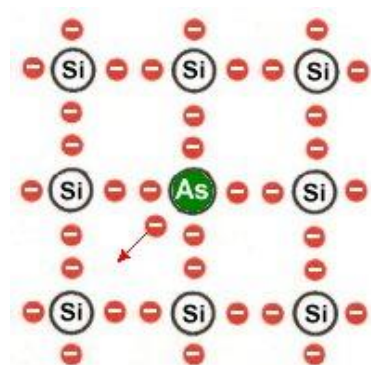
Pro technickou praxi mají největší význam tzv. nevlastní polovodiče. Jejich krystalová mřížka byla úmyslně „znečištěna“ přidáním nepatrného množství příměsí. Vhodným výběrem příměsí

můžeme dosáhnout toho, aby v polovodiči byl elektrický proud veden volnými elektrony (vodivost typu N), nebo „děrami“ (vodivost typu P). Ke změně vodivosti, například křemíku, není potřeba velké množství příměsi. Nevlastní polovodič lze vytvořit přidáním byť jednoho atomu příměsi do 100 milionů atomů křemíku [1; 4].

3.2.1 Vodivost typu N (negativní)

Některé atomy jsou v krystalu křemíku nahrazeny pětimocnými atomy (např. arzen). Čtyři z pěti elektronů se zúčastní vazeb s křemíkem. Pátý (nadbytečný) elektron se v chemických vazbách nemůže uplatnit. Je velmi slabě vázán a již při nízkých teplotách se stane volným elektronem. Křemík obsahující příměs pětimocného prvku (donoru), má nadbytek volných elektronů. Tyto elektrony po připojení ke zdroji způsobují jeho elektronovou vodivost typu N [1; 2; 4].

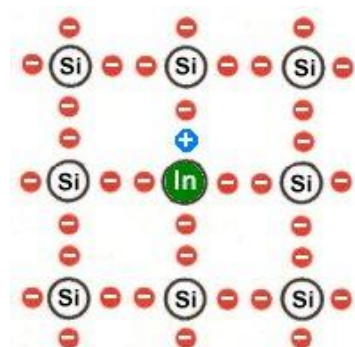
Obrázek 2 Polovodič typu N - (zdroj [1])



3.2.2 Vodivost typu P (pozitivní)

Pokud do krystalu křemíku přidáme trojmocný prvek (např. indium), nezbude dostatek elektronů k pokrytí všech vazeb. V místě nenasycené vazby vznikne „díra“. Tato „díra“ je kvazičásticí, která se chová jako by měla kladný náboj a elektron z jiné vazby ji může zaplnit. V případně zaplnění „díry“ však vznikne nová na jiném místě. Příměs trojmocného prvku (akceptoru) způsobuje v křemíku nadbytek kladných „děr“. Tyto „díry“ po připojení ke zdroji energie způsobují jeho děrovou vodivost typu P [1; 2; 4].

Obrázek 3 Polovodič typu P - (zdroj [1])



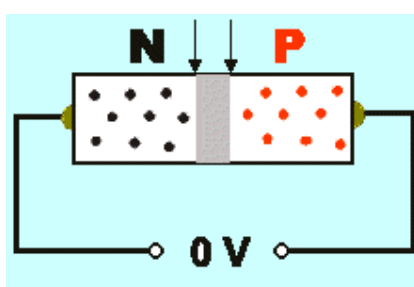
3.3 Přejchod typu PN

V elektronice má největší využití PN přechod. Pro jednoduchost si jej můžeme představit jako mechanické spojení dvou tyčí. Vezmeme jednu tyč typu P a k ní přiložíme jednu tyč typu N. Tímto způsobem nám vznikla oblast polovodičů s opačným typem vodivosti - přechod PN. Přejchod PN má tu vlastnost, že v jednom směru jím proud může procházet (chová se jako vodič), zatímco v opačném směru nikoli (chová se jako izolant). Na polovodiči PN mohou nastat následující 3 stavy - přechod je bez napětí, přechod je v závěrném směru a přechod je v propustném směru [1; 5; 6; 4].

3.3.1 Bez zdroje napětí

V oblasti, kde se oba polovodiče stýkají, je velká koncentrace „děr“ i elektronů. Dochází tak k samovolné rekombinaci. Část elektronů z oblasti N rekombinuje v oblasti P a část „děr“ z oblasti P rekombinuje v oblasti N. Kolem přechodu PN se vytvoří nevodivá oblast bez volných nábojů (na obrázku vyznačeno šedou barvou). Nevodivá oblast se nazývá hradlová vrstva (hradlo - přechod) a je silná asi $1\ \mu\text{m}$ [1; 5; 6; 7].

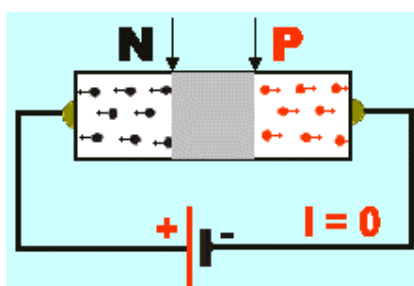
Obrázek 4 PN přechod bez napětí - (zdroj [1])



3.3.2 Závěrný směr

Jestliže připojíme k polovodiči N kladný pól zdroje a k polovodiči P záporný pól, dojde vlivem působení elektrického pole k „odtahování“ elektronů a „děr“ od přechodu PN. Nevznikají tedy žádné nosiče elektrického proudu. Hradlová vrstva se rozšíří, její odpor vzroste a v důsledku toho elektrický proud přechodem PN nemůže procházet [1; 5; 6].

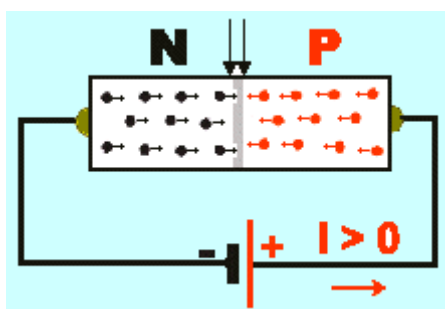
Obrázek 5 PN přechod s napětím v závěrném směru - (zdroj [1])



3.3.3 Propustný směr

Připojením vodiče v propustném směru (kladný pól na P a záporný pól na N) dojde k „přitahování“ volných elektronů přes přechod PN ke kladnému pólu a „díry“ jsou přitahovány k zápornému pólu. Tento proces má za následek zúžení hradlové vrstvy, její odpor se zmenší a elektrický proud může procházet přechodem PN [1; 5; 6].

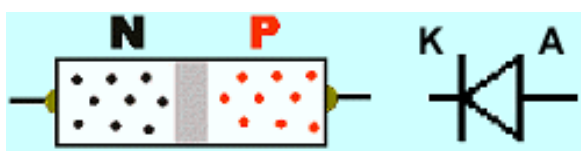
Obrázek 6 PN přechod s napětím v propustném směru - (zdroj [1])



3.3.4 Dioda

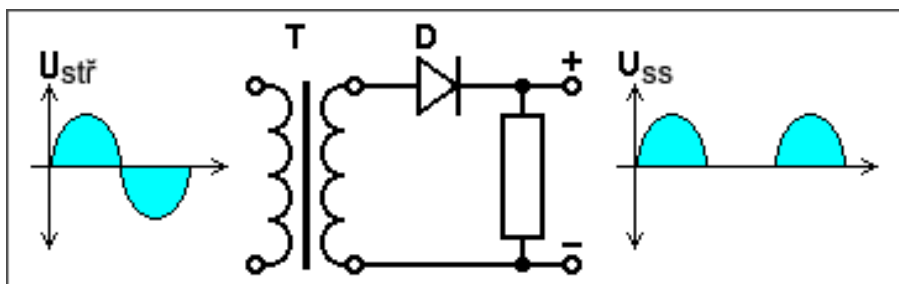
Výše uvedené tři stavy, kde polarita připojeného zdroje ovlivňuje odpor přechodu (případně jeho vodivost), obecně nazýváme jako diodový jev. Jedná se o nejjednodušší případ polovodičové součástky, tzv. polovodičovou diodu. Pokud chceme diodu připojit v propustném směru, je nutno připojit polovodič P k anodě (A) a polovodič N ke katodě (K). Na obrázku níže je znázorněn vztah mezi strukturou diody (vlevo) a její schematickou značkou [1; 5; 6].

Obrázek 7 Dioda - (zdroj [1])



Na následujícím obrázku je velice jednoduché schéma jednocestného diodového usměrňovače. Toto schéma nemá v praxi téměř žádné využití, nicméně je na něm názorně vidět jak lze pomocí diody získat ze střídavého proudu pulzující stejnosměrný proud [1].

Obrázek 8 Jednoduchý jednocestný usměrňovač - (zdroj [1])



4 Historie objevování termoelektrických jevů

Jako termoelektrický jev označujeme jev, kdy je možno přímou konverzí teplotního rozdílu získat elektrickou energii a naopak. Termoelektrické zařízení neboli termočlánek vytváří napětí kdykoliv je přítomen teplotní rozdíl mezi jeho stranami. Samozřejmě přiložením napětí na termočlánek lze získat rozdílné teploty obou stran. Termoelektrický efekt se využívá k výrobě elektrické energie, měření teploty nebo k chlazení či ohřívání objektů. Pojem termoelektrický jev v sobě zahrnuje tři odděleně identifikovatelné jevy: Seebeckův jev, Peltierův jev a Thomsonův jev [8].

4.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev je přeměna teplotních rozdílů dvou různých kovů na elektrické napětí. Tento jev byl náhodně objeven v roce 1821 estonsko-německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem (9. duben 1770 - 10. prosinec 1831). Seebeck si všiml, že dva různé kovy s různou teplotou jsou schopny vychýlit stříčku kompasu. Zprvu si myslel, že je toto způsobeno magnetismem, který vznikl díky teplotnímu rozdílu. Nicméně si rychle uvědomil, že za vychýlení může elektrický proud, který je indukován a dle ampérova zákona vychýlí magnet [9; 10; 11].

Obrázek 9 Johann Seebeck - (zdroj [12])



Vzniklé napětí je úměrné rostoucímu rozdílu teplot v přechodu dvou prvků. Toto napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia. Různé materiály mají různý elektrický potenciál - tzv. Seebeckův koeficient. Například železo má Seebeckův koeficient $19 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ při 0°C , což znamená, že s 1°C rozdílem okolo uvedené teploty vznikne napětí $19 \mu\text{V}$. Koeficient nemusí být vždy kladný. Například konstantan (sloučenina mědi a niklu) má Seebeckův koeficient $-0,35 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Výsledné napětí dvou různých materiálů můžeme vypočítat z následujícího vzorce [13; 14].

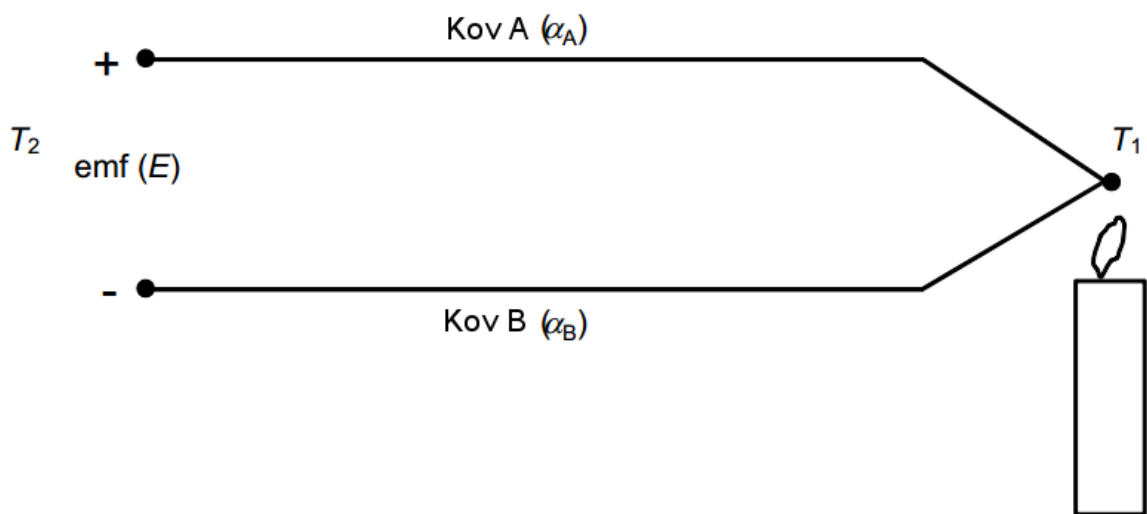
$$E = \alpha(T_1 - T_2) \text{ přičemž } \alpha = \alpha_A - \alpha_B$$

kde:

E - celková energie v μV , α - celkový rozdíl Seebeckových koeficientů A (α_A) a B (α_B), T_1 - Teplota „teplé“ strany, T_2 - Teplota „studené“ strany [14].

Výše uvedený vzorec nám přiblíží ilustrační obrázek.

Obrázek 10 Ukázka získání energie - (zdroj [14])



Některé Seebeckovy koeficienty lze zjistit z následující tabulky. Hodnoty v tabulce jsou porovnávány s platinou.

Tabulka 1 Seebeckovy koeficienty - (zdroj [15])

Kovy	Seebeckův koeficient [$\mu\text{V/K}$]	Polovodiče	Seebeckův koeficient [$\mu\text{V/K}$]
Antimon	47	Selen	900
Nichrome	25	Telur	500
Molybden	10	Křemík	440
Kadmium	7,5	Germánium	300
Wolfram	7,5	n-type Bi_2Te_3	-230
Zlato	6,5	p-type $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300
Stříbro	6,5	p-type Sb_2Te_3	185
Měď	6,5	PbTe	-180
Rhodium	6,0	$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Tantal	4,5	$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Olovo	4,0	$\text{Pb}_{09}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360
Hliník	3,5	$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710
Uhlík	3,0	$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990
Rtuť	0,6	SnSb_4Te_7	25
Platina	0	SnBi_4Te_7	12
Sodík	-2,0	$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
Potassium	-9,0	$\text{SnBi}_{2,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_7$	110
Nikl	-15	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
Konstantan	-35	PbBi_4Te_7	-53
Bismut	-72		

Pozn.: **Nichrome** je nemagnetická slitina niklu, chromu a často železa, většinou užívaná jako odporový drát. Je stříbrno šedá, odolná vůči korozi a má velmi vysoký bod tavení (kolem 1400 °C). Díky těmto vlastnostem je široce užívána jako elektrický topný element například v troubách, fénech, toustovačích, žehličkách, elektronických cigaretách atd. [16].

4.2 Peltierův jev

Peltierův jev je obrácený efekt Seebeckova jevu. To znamená, že při průchodu elektrického proudu přechodem mezi dvěma různými vodiči vzniká teplo. Zároveň může být teplo odebíráno

pouhým obrácením polarity napájení. Jev byl objeven v roce 1834 francouzským hodinářem a amatérským fyzikem Jean Charlesem Athanase Peltierem (22. únor 1785 - 27. říjen 1845) [12].

Obrázek 11 J. C. A. Peltier - (zdroj [12])



Idea tohoto jevu byla prokázána o pár let později v roce 1838 německým fyzikem Heinrichem Friedrichem Emilem Lenzem (12. únor 1804 - 10. únor 1865). Při experimentu s procházejícím proudem skrz přechod dvou rozdílných kovů (v tomto případě bismut (Bi) a antimon (Sb)) si Lenz všiml, že pokud umístí kapku vody na tento přechod, tak voda zmrzne. Dále zkusil obrátit polaritu napětí a zmrzlá voda opět roztála. Tímto pokusem Lenz dokázal, že při průchodu proudu dvěma rozdílnými prvky může být teplo absorbováno, nebo uvolňováno v závislosti na směru průchodu proudu. Tento jev byl pojmenován Peltierův efekt [17; 18; 11].

Z výše uvedeného vyplývá, že Peltierův jev a Seebeckův jev jsou ve své podstatě stejné. Rozdíl je pouze v tom, že jsou navzájem inverzního charakteru.

4.3 Thomsonův jev

Obrázek 12 William Thomson - (zdroj [12])

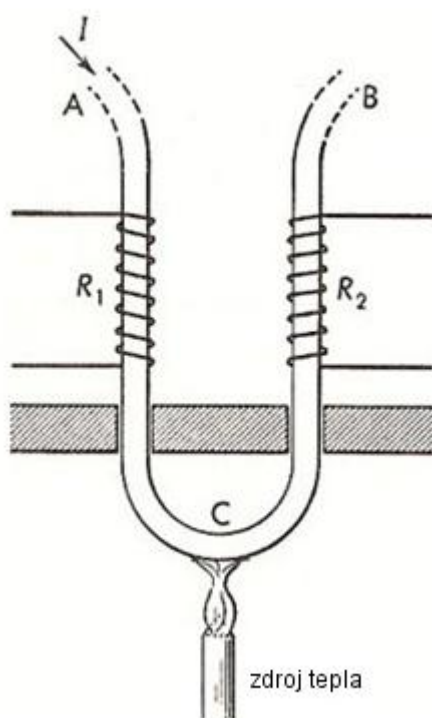


Třetí doplňující termoelektrický jev byl objeven a experimentálně ověřen v roce 1851 skotským fyzikem Williamem Thomsonem (26. červen 1824 - 17. prosinec 1907), později známým jako lord Kelvin of Largs. Jeho experiment spočíval v ohřívání kovové tyče pouze na jednom konci. Měřením zjistil, že při existenci teplotního gradientu vzniká nepatrné termoelektrické napětí. Tento jev

je velmi podobný Seebeckovu jevu. Rozdíl je v tom, že u Seebeckova jevu je potřeba dvou rozdílných vodičů s rozdílnou teplotou, kdežto u Thomsonova jevu je třeba pouze jednoho vodiče [19; 20; 21; 11].

Tento experiment ho vedl k závěru, že teplo je absorbováno (nebo vytvářeno) kdykoliv, kdy vodičem s teplotním gradientem prochází proud. Toto teplo je úměrné jak procházejícímu proudu, tak teplotnímu gradientu. Toto tvrzení lze dokázat a lépe osvětlit pomocí následujícího obrázku [12].

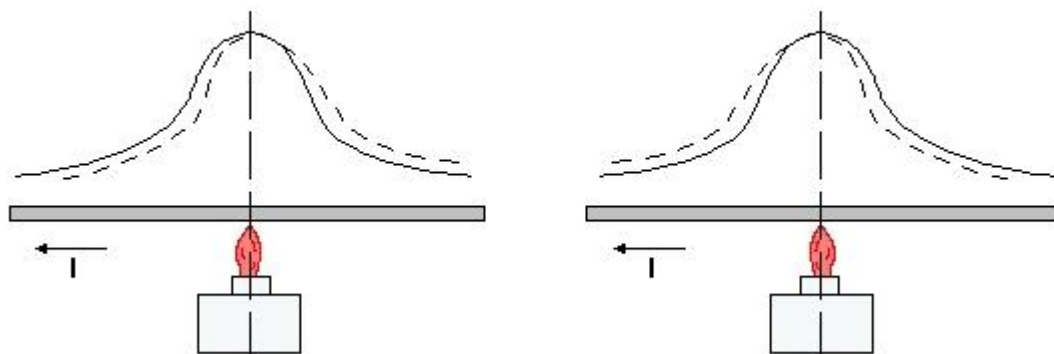
Obrázek 13 Thomsonův pokus s kovovou tyčí - (zdroj [22])



Jak je vidět z obrázku, tak proud prochází tyčí (například železnou), která je ohnutá do tvaru U. Na každou stranu tyče se omotají drátky, které slouží jako cívky mající odpor R_1 a R_2 . Tyto cívky jsou složky vyváženého Wheastonova můstku. Spodní část ohnuté tyče se poté ohřeje. To má za následek dva různé teplotní gradienty. Pozitivní ve směru z A do C a negativní ve směru z C do B. Výsledkem tohoto je nevyvážený můstek, indikující, že R_1 je větší než R_2 . Je tedy zřejmé, že teplo bylo odebráno na straně R_1 a předáno na straně R_2 [22].

Toto tvrzení platí pouze v případě negativního Thomsonova efektu. Tedy například pro materiály jako je železo, bismut, kobalt, nikl, platina. V případě pozitivního Thomsonova efektu je teplo při přechodu ze studené strany do teplé předáváno a při přechodu z teplé strany do studené odebíráno. Mezi pozitivní materiály patří například antimon, kadmium, měď a stříbro.

Obrázek 14 Ukázka Thomsonova efektu - (zdroj [23])



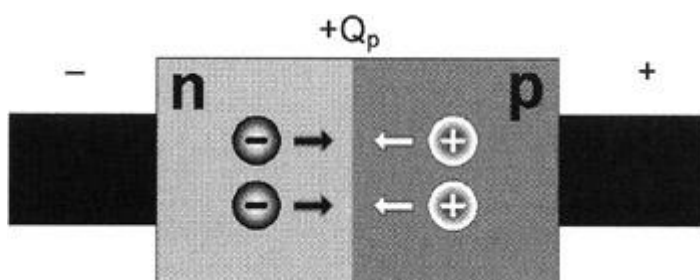
Obrázek vlevo zobrazuje pozitivní Thomsonův efekt, oproti tomu obrázek vpravo zobrazuje negativní Thomsonův efekt. Plná čára zobrazuje rozložení teploty bez průchodu proudu. Čerchovaná čára ukazuje změnu rozložení teploty při průchodu proudu vodičem.

5 Princip a provedení článku

5.1 Základní princip

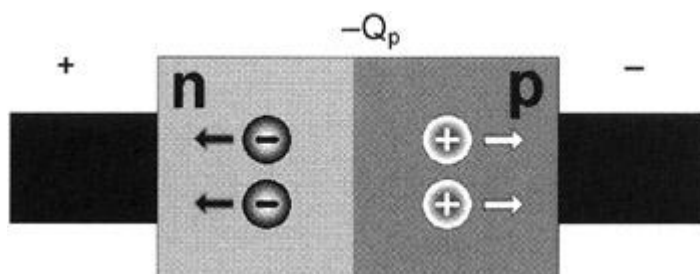
Pro pochopení principu přeměny elektrické energie na získání, případně odebrání tepla nám budou nápomocny následující obrázky. V prvním obrázku je naznačeno uvolňování tepla, v druhém poté absorpcie tepla [17].

Obrázek 15 NP přechod s uvolňováním tepla - (zdroj [17])



Pokud na NP přechod připojíme napětí v kladném směru, tedy záporný pól na N a kladný pól na P, dojde k uvolňování tepla. Elektrické pole začne totiž v N-polovodiči vytvářet volné elektrony a v P-polovodiči díry. Volné elektrony se budou snažit rekombinovat s dírami v přechodu PN. Při této rekombinaci dojde k uvolnění tepla [17].

Obrázek 16 NP přechod s absorpcí tepla - (zdroj [17])

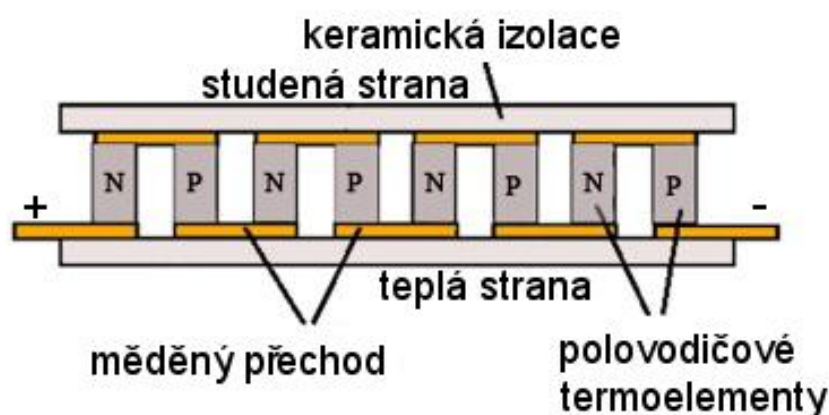


Při obrácení směru elektrického pole dojde k obrácenému pohybu elektronů a děr. Počet děr pohybujících se od přechodu PN bude větší, protože nové páry budou generovány při průchodu elektronů skrz P-polovodič do N-polovodiče. Generování takto vytvořených párů spotřebovává energii, která je kompenzována oscilací atomové mřížky. Elektrony a díry vytvořené v důsledku uvedeného principu budou mít navzájem opačný pohyb, který je dán směrem elektrického pole. Nové páry budou vznikat tedy tak dlouho, dokud bude připojen zdroj napětí. Tento princip má za následek absorpci tepla [17].

5.2 Více přechodů znamená větší výkon

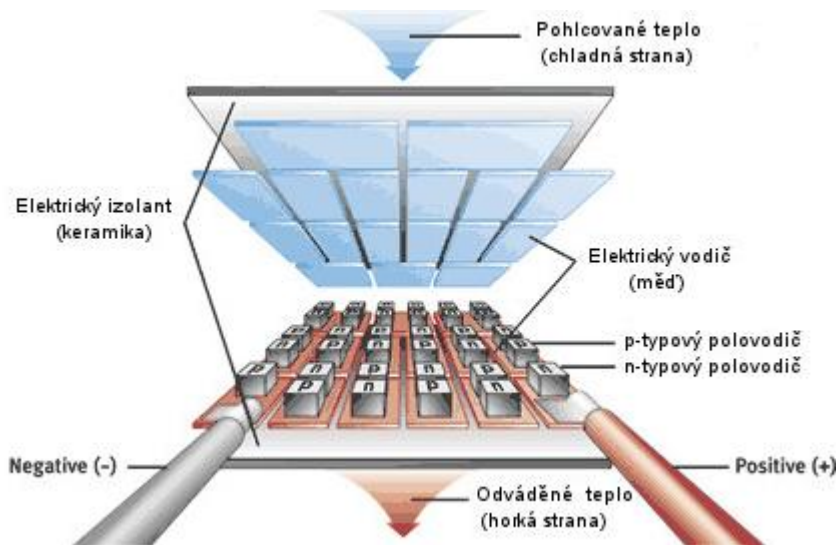
V závislosti na směru protékající elektrické energie skrz články polovodičů (PN a NP přechodů) bude teplo uvolňováno nebo absorbováno. Jestliže budou elektrony (N) a díry (P) rekombinovat, teplo se bude uvolňovat. V případě vytváření nových elektronů a děr se bude teplo absorbovat. Protože výkon jednoho přechodu PN nebo NP je velmi malý, využívá se spojení několika těchto přechodů, které vytvoří tzv. Peltierův článek, do jednoho celku [17].

Obrázek 17 Vnitřní uspořádání Peltierova článku - (zdroj [17; 24])



Peltierův článek se tedy skládá z mnoha přechodů PN a NP. Běžný počet přechodů se dá počítat v řádech desítek, v případě velmi výkonných článků i v řádech stovek. Každý tento přechod je spojen tepelným můstkem, který se dotýká keramické plošky článku tvořící jeho obal. Pokud tedy začne článkem procházet elektrický proud, začne se měnit teplota jednotlivých přechodů. To má za následek ochlazování jedné plochy článku, zatímco druhá plocha se ohřívá. Pokud tedy přiložíme chladnější stranu článku například na čip mikroskopu nebo obecně řečeno na jakýkoliv objekt určený k chlazení, začne se Peltierův článek chovat jako tepelná pumpa. Teplo bude z chlazeného objektu odebíráno studenou stranou článku a bude předáváno teplé straně článku. Tu je nutno chladit například žebrovaným chladičem, který bude ofukován ventilátorem, nebo ještě lépe kapalinou. Peltierův článek může být stejně jako každá tepelná pumpa popsán termodynamickou rovnicí. Proto můžeme články nazývat nejen termoelektrické ale také termodynamické [24].

Obrázek 18 Celkový pohled na termočlánek - (zdroj [25])



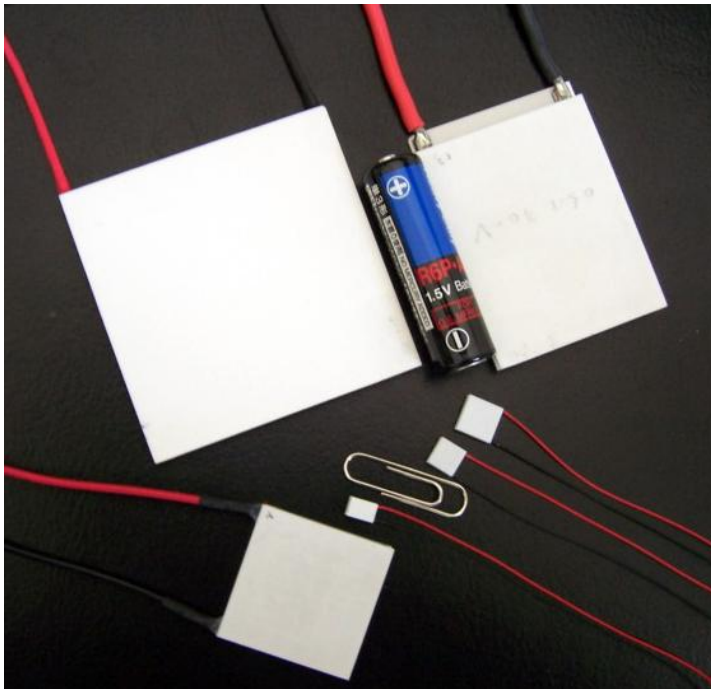
5.3 Různé typy provedení Peltierových článků

Peltierovy články lze koupit v nejrůznějších provedeních. Může se jednat o velmi malé články, rozměrově v řádech milimetrů, až po mnohem větší. Dále pak lze koupit kaskádové články a články s průmětem ve tvaru válce či prstence.

5.3.1 Klasické „čtvercové“ články.

Do první skupiny bych zařadil články klasického tvaru. V drtivé většině se jedná o články čtvercového typu. Tyto články jsou jedny z nejpoužívanějších a zároveň také nejlevnějších. Nejčastěji používaný rozměr těchto článků bývá 40x40x3mm. Články mohou být také velmi malých rozměrů, například článek TES1-0401AT125 má rozměry 1,8 - 3,4 x 3,4 x 2,4 mm. Takto malé články mají využití například u termokamer, elektronových mikroskopů, dalekohledů atp., kde chladí CCD čipy, které se při provozu hřejí a tím zanášejí do obrazu velmi nežádoucí šum [26].

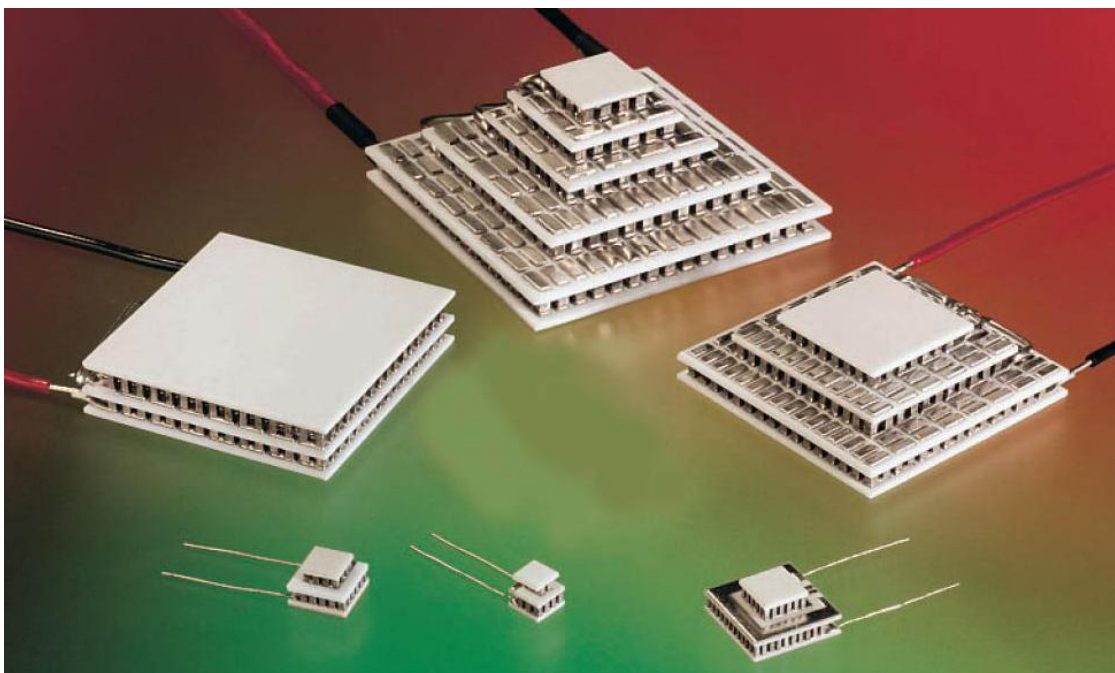
Obrázek 19 Ukázka klasických Peltierových článků - (zdroj [26])



5.3.2 Kaskádové články

Peltierovy články typicky dosahují maximálního teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou 67 °C. V případě, že je tento maximální rozdíl nedostačující, můžeme zvolit kaskádově řazené Peltierovy články. Tyto články dosahují většího rozdílu teplot. V případě dvouступňových se rozdíl pohybuje okolo 100 °C, v případě 6 stupňového až kolem 130 °C [17; 27; 28].

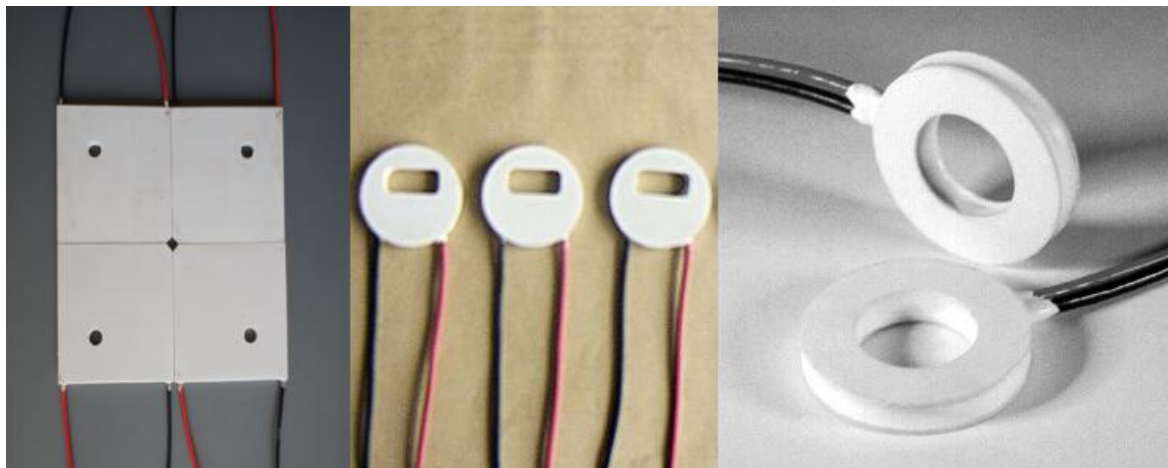
Obrázek 20 Ukázka kaskádových Peltierových článků - (zdroj [29])



5.3.3 Články speciálních tvarů

Do poslední skupiny bych zařadil články různých tvarů. Mohou to být například válce, kruhy, čtvercové provedení s dírou uprostřed a různé jiné články pro speciální účely. Tyto články jsou již více specifické a jejich sehnání (zejména na českém trhu) není zcela snadné.

Obrázek 21 Ukázka speciálních Peltierových článků - (zdroj [30; 31])



Pokud bychom i tak nebyli spokojeni s velmi velkým výběrem nejrůznějších tvarů, rozměrů a výkonů článků, můžeme si koupit samostatné N a P můstky a sestavit si tak vlastní Peltierův článek dle svých požadavků.

6 TEC a TEG články

Z hlediska užití lze termočlánky rozdělit na dvě velmi podobné skupiny. Tou první jsou již zmiňované termočlánky určené k chlazení. Tyto články mají z angličtiny původní název Thermoelectric Cooler, zkráceně TEC. Druhou skupinou jsou termočlánky určené primárně pro získávání energie. Nesou název Thermoelectric Generator, zkráceně TEG.

6.1 TEC článek

TEC články, jak jsem již uvedl, jsou určeny primárně pro chlazení. Tedy spotřebovávají elektrickou energii. Tyto články můžeme najít například v malých přenosných ledničkách do aut. Jejich účinnost chlazení je menší, než je tomu u klasické kompresorové jednotky, která se běžně užívá u domácích ledniček. Praktická udávaná účinnost u článku je 10 - 15 %, teoretická 20 - 25 %. U kompresorové jednotky je praktická účinnost cca 60 %, teoretická 70 - 80 % [11]. Výhodou článku je, že neobsahuje žádné pohyblivé součásti a má velmi dlouhou životnost. Při užití malých článků můžeme chladit součástky například v mikroelektronice. Větší a výkonnější články můžeme využít k chlazení PC procesorů, kde lze pomocí přetaktování dosáhnout vyšších výkonů (viz kapitola 9).

Při chlazení Peltierovým článkem musíme mít na paměti několik zásad. První zásadou je výkon chladiče na „teplé“ straně článku. Dle výkonu článku a tím pádem vyzářeného tepla je potřeba zvolit odpovídající chladič, nejlépe doplněný o ventilátor, případně chlazený vodou či jiným médiem. S výkonem článku také souvisí jeho schopnost „chladit“. Při volbě málo výkonného článku může docházet k přehřívání chlazeného prvku. V případě příliš výkonného článku hrozí kondenzace vodních par v okolí článku a chlazeného prvku. Pokud dojde k vysoké kondenzaci vody, může také dojít ke zkratu v elektrickém obvodu, a tím pádem ke zničení přístroje. Nadměrnému podchlazování lze zabránit například teplotním čidlem a řízením chladičového výkonu článku.

6.2 TEG článek

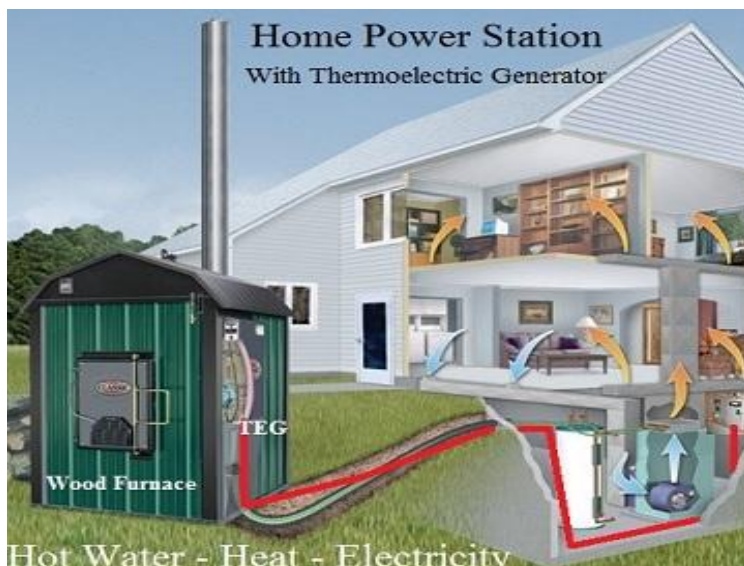
TEG články lze stejně jako TEC články využít k chlazení komponent. Ovšem jejich primární úkol je získávání energie z teplotních rozdílů. Pro TEG články lze najít jistě mnoho nejrůznějších využití. Uvedu zde několik velmi zajímavých ukázek.

6.2.1 Malá domácí elektrárna

Zajímavé řešení nabízí firma Tegpower. Jedná se tzv. dřevěnou pec. Toto zařízení přeměňuje teplo ze spáleného dřeva na elektrickou energii pomocí TEG článku. Zároveň je chladič chlazen

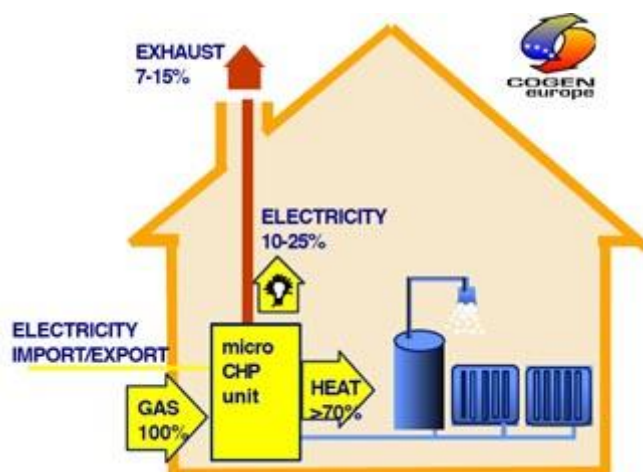
protékající vodou přímo z domu, a tak je zajištěno využití odpadního tepla na ohřev vody a následné vytápění domu. Vyobrazená jednotka má výkon 12 kWh za den a dle průměrné denní spotřeby 31 kWh je schopna pokrýt cca 1/3 nákladů [32].

Obrázek 22 Domácí dřevěná pec - (zdroj [32])



Další možné řešení je využití domácího ko-generátoru. Toto zařízení ve své podstatě přeměňuje zbytkové teplo (například z plynového kotle) na elektřinu. Pokud si například v zimě doma zatopíme, můžeme využít odpadního tepla, které uniká komínem, k výrobě elektřiny třeba k dohřátí vody. Výhodou tohoto systému je fakt, že nepotřebuje téměř žádnou údržbu, je naprosto tichý a podstatně snižuje náklady domácnosti na provoz [33].

Obrázek 23 Využití odpadního tepla v domácnosti - (zdroj [33])

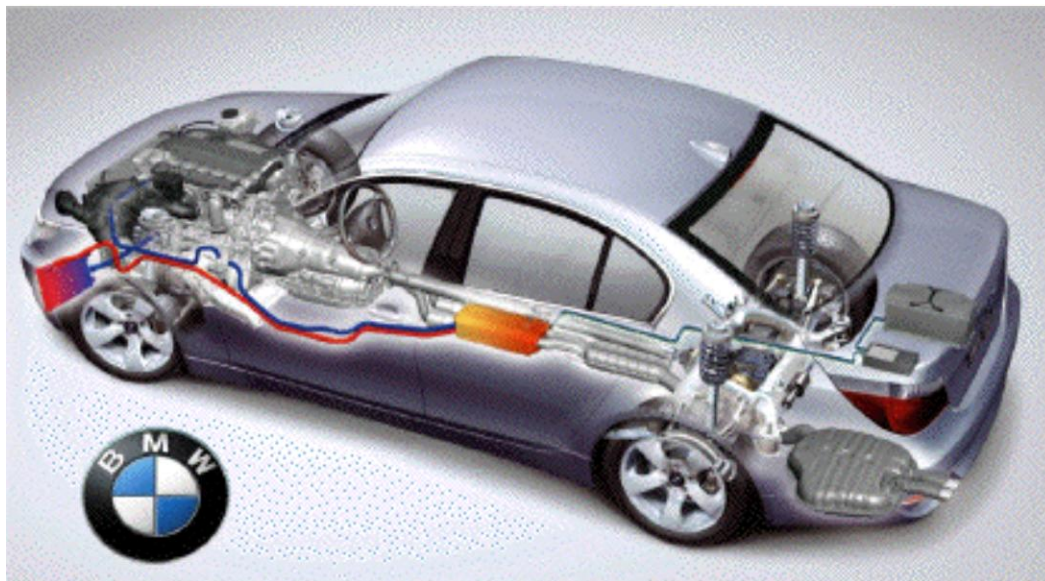


6.2.2 Využití odpadního tepla u automobilů

S dalším návrhem přišla automobilka BMW. Automobily jsou názornou ukázkou toho, jak je obrovská energie využívána s malou efektivitou. Zhruba 75 % energie vytvořené během spalování

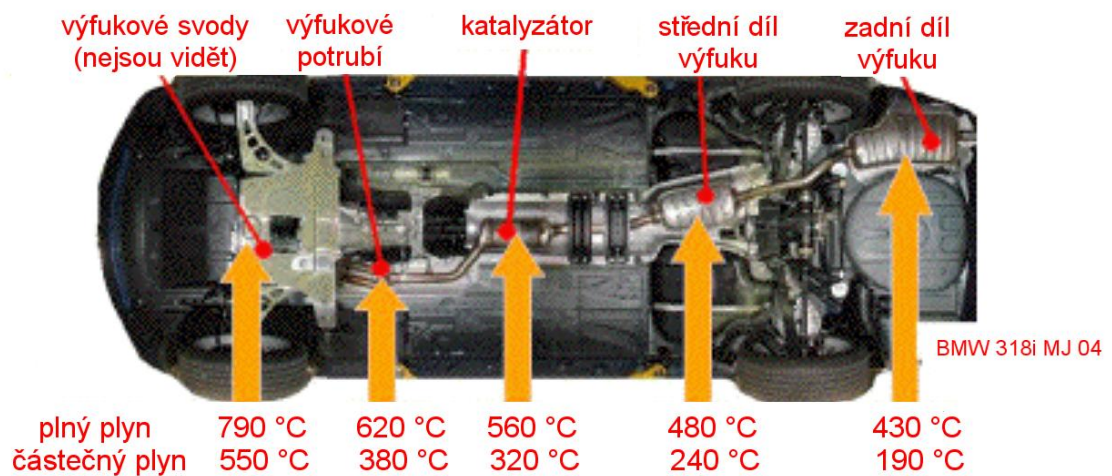
je ztraceno ve výfukovém potrubí a v chladícím okruhu motoru. Pokud vezmeme v úvahu 100 kW motor, vyjde nám, že 300 kW se ztratí ve výfukovém traktu a v chlazení (počítáno pro benzínový motor, kde je účinnost cca 25 %). Pokud by se ovšem na výfukové potrubí umístily TEG články, můžeme získávat energii potřebnou na dobíjení autobaterie. Nebylo by tedy třeba užívat alternátor, který značnou měrou zatěžuje motor, a zvyšuje tak jeho spotřebu. Tímto systémem je možno ušetřit okolo 10 % nákladů na palivo [33].

Obrázek 24 Využití odpadního tepla u automobilu - (zdroj [33])



Jak je vidět na obrázku níže, teplota výfukového traktu za katalyzátorem se v závislosti na jeho zatížení pohybuje okolo 300 - 500 °C. Termoelektrické generátory jsou tedy ideální pro tyto aplikace. Jsou malé, neobsahují žádné pohyblivé částice a jsou relativně efektivní při těchto teplotách [33].

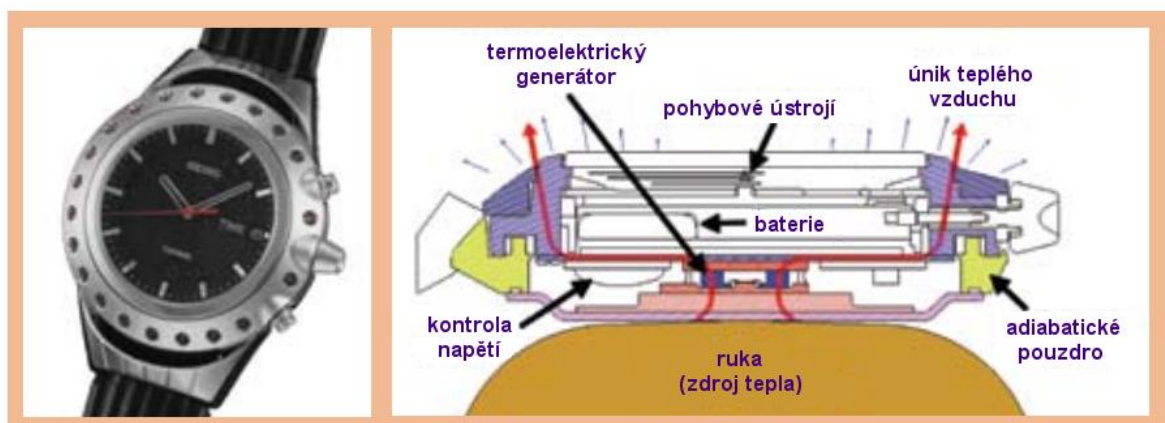
Obrázek 25 Teploty na výfukovém traktu BMW - (zdroj [33])



6.2.3 Hodinky využívající teplo z ruky

Výbornou ukázkou možností termoelektrické energie jsou termoelektrické hodinky. Hodinky jsou napájeny přeměnou tepelné energie z lidského těla na elektrickou energii. Byly vyrobeny minimálně dva modely těchto hodinek. Jeden (na obrázku) byl od firmy Seiko a druhý od firmy Citizen. Hodinky Seiko během běžného nošení vyrobí 22 μW elektrické energie s teplotním rozdílem pouze 1,5 °C. V otevřeném obvodu lze naměřit 300 mV a účinnost článku se pohybuje kolem 0,1 % [34].

Obrázek 26 Termoelektrické hodinky - (zdroj [34])



6.2.4 Historická ruská lampa

Poslední, v praxi ověřenou a velice používanou ukázkou využití zbytkového tepla je tzv. Ruská lampa. Byla vyrobena v roce 1959 v bývalém Sovětském svazu. V podstatě šlo o petrolejovou lampu, která se užívala ke svícení, doplněnou o komín a věnec s Peltierovými články [35].

Obrázek 27 Dobový obrázek petrolejové lampy - (zdroj [35])



Tyto články využívaly zbytkové teplo a vyráběly napětí 1,5 V a 90 V sloužící k napájení malého rádia. Napětí 90 V bylo potřebné pro provoz tehdejších elektronek. Proud odebíraný radiem byl při 1,5 V 125 mA nebo 250 mA a při 90 V 12 mA. Jak můžeme vidět na obrázku vlevo, tak lampě chybí železný „komín“ sloužící k rovnoměrnému rozvodu tepla. Lampa vpravo jej obsahuje, ale chybí jí skleněná baňka [35].

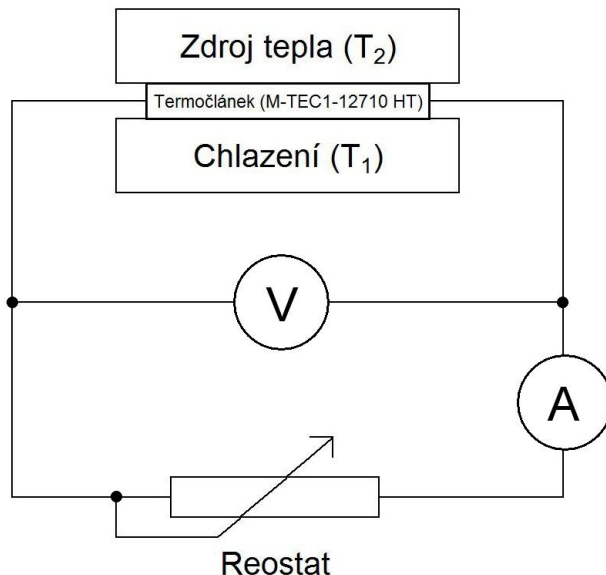
Obrázek 28 Částečně rozebrané petrolejové lampy - (zdroj [35])



7 Praktická část - měření Peltierova článku

Pro praktické měření článku jsem si nejprve připravil chladicí soupravu. Příprava spočívala v ponoření hliníkového chladiče do misky s vodou a zamrazení v mrazáku přes noc. Druhý den jsem obvod zapojil dle následujícího schématu.

Obrázek 29 Schéma zapojení pro měření Peltierova článku (foto - autor)



7.1 Potřebné vybavení a postup měření

K měření jsem jako voltmetr a ampérmetr použil měřicí přístroje firmy METEX, konkrétně METEX M3890D, pro měření teploty jsem užil přístroj HAOYUE M890G. Jako zatěžovací odpor jsem použil reostat 4,6 A / 30 Ω a pro zdroj tepla starou žehličku. Peltierův článek, konkrétně M-TEC1-12710 HT jsem „studenou“ stranou položil na hliníkový chladič a styčné plochy jsem pro jistotu spojil teplovodivou pastou Arctic Cooling MX2. Připravené chlazení se mi velice osvědčilo, protože dokázalo udržet téměř konstantní teploty během celého měření, které trvalo téměř 4 hodiny.

Postup měření byl následující. Žehličku jsem vždy předeřhál na teplotu T_2 . Poté jsem ji přiložil na článek a odečetl hodnoty z měřících přístrojů. Ihned po odečtení teplot jsem musel žehličku z článku sundat, a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem bylo ochlazení žehličky v místě styku s Peltierovým článkem (bylo jí tedy třeba nechat opět prohřát) a druhým důvodem bylo prohřívání článku a s tím spojené ohřívání chladiče a tedy nežádoucí zanášení chyby do měření. Tento postup jsem opakoval pro změření každé hodnoty článku. Tímto způsobem bylo možno dosáhnout teplotního rozdílu uvedeného v tabulce a měření tak mohlo být co nejpřesnější.

7.2 Tabulky s naměřenými hodnotami

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky hodnot pro rozdíly teplot ΔT od 25 °C do 143 °C vždy s cca 25 °C nárůstem. Rozdíl ΔT se odvíjel od nastavené teploty na žehličce (T_2) a momentální teploty chladiče (T_1). $P_{\text{výstupní}}$ je vypočítán dle vzorce $P_{\text{výstupní}} = U \cdot I$, obdobně tak zátěž je vypočítána dle vzorce $R = U / I$. Teplota okolí se pohybovala okolo 23 °C.

Tabulka 2 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 25 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	33,3333	5	30	25	0,700	0,021	0,0147
2	29,1304	5	30	25	0,670	0,023	0,0154
3	26,4000	5	30	25	0,660	0,025	0,0165
4	24,1111	5	30	25	0,651	0,027	0,0176
5	20,0625	5	30	25	0,642	0,032	0,0205
6	17,0270	5	30	25	0,630	0,037	0,0233
7	14,5238	5	30	25	0,610	0,042	0,0256
8	11,8235	5	30	25	0,603	0,051	0,0308
9	4,9029	5	30	25	0,505	0,103	0,0520
10	2,4242	5	30	25	0,400	0,165	0,0660

Tabulka 3 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 45 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	33,0000	5	50	45	1,320	0,040	0,0528
2	23,9623	5	50	45	1,270	0,053	0,0673
3	20,6667	5	50	45	1,240	0,060	0,0744
4	18,7692	5	50	45	1,220	0,065	0,0793
5	15,7532	5	50	45	1,213	0,077	0,0934
6	12,0918	5	50	45	1,185	0,098	0,1161
7	8,1429	5	50	45	1,140	0,140	0,1596
8	6,4294	5	50	45	1,093	0,170	0,1858
9	4,8045	5	50	45	1,057	0,220	0,2325
10	2,7054	5	50	45	1,001	0,370	0,3704

Tabulka 4 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 68 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	32,7528	7	75	68	2,915	0,089	0,2594
2	24,6261	7	75	68	2,832	0,115	0,3257
3	22,0240	7	75	68	2,753	0,125	0,3441
4	19,2929	7	75	68	2,701	0,140	0,3781
5	17,8867	7	75	68	2,683	0,150	0,4025
6	12,1474	7	75	68	2,308	0,190	0,4385
7	7,1821	7	75	68	2,011	0,280	0,5631
8	5,0429	7	75	68	1,765	0,350	0,6178
9	3,9775	7	75	68	1,591	0,400	0,6364
10	2,7598	7	75	68	1,551	0,562	0,8717

Tabulka 5 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 92 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	33,9273	8	100	92	3,732	0,110	0,4105
2	29,6880	8	100	92	3,711	0,125	0,4639
3	26,3214	8	100	92	3,685	0,140	0,5159
4	20,1833	8	100	92	3,633	0,180	0,6539
5	17,1667	8	100	92	3,605	0,210	0,7571
6	12,7385	8	100	92	3,312	0,260	0,8611
7	9,0240	8	100	92	3,005	0,333	1,0007
8	7,5499	8	100	92	2,801	0,371	1,0392
9	5,3649	8	100	92	2,602	0,485	1,2620
10	2,7059	8	100	92	2,457	0,908	2,2310

Tabulka 6 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 119 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	33,4067	6	125	119	5,011	0,150	0,7517
2	26,7500	6	125	119	4,815	0,180	0,8667
3	22,9502	6	125	119	4,613	0,201	0,9272
4	20,1636	6	125	119	4,436	0,220	0,9759
5	17,7583	6	125	119	4,262	0,240	1,0229
6	16,8360	6	125	119	4,209	0,250	1,0523
7	11,1757	6	125	119	4,135	0,370	1,5300
8	7,7135	6	125	119	4,011	0,520	2,0857
9	5,0707	6	125	119	3,803	0,750	2,8523
10	3,1870	6	125	119	3,391	1,064	3,6080

Tabulka 7 Hodnoty Peltierova článku pro rozdíl teploty 143 °C

Měření č.	Zátěž [Ω]	T_1	T_2	ΔT	U [V]	I [A]	$P_{\text{výstupní}}$ [W]
1	32,8371	7	150	143	5,845	0,178	1,0404
2	25,4756	7	150	143	5,732	0,225	1,2897
3	23,0700	7	150	143	5,606	0,243	1,3623
4	20,3206	7	150	143	5,324	0,262	1,3949
5	18,5055	7	150	143	5,015	0,271	1,3591
6	15,7076	7	150	143	4,728	0,301	1,4231
7	13,6879	7	150	143	4,517	0,330	1,4906
8	7,6141	7	150	143	4,203	0,552	2,3201
9	4,1063	7	150	143	3,901	0,950	3,7060
10	2,5495	7	150	143	3,628	1,423	5,1626

Měření jsem úmyslně ukončil u rozdílu teplot cca 150 °C. V praxi totiž studená strana článku nebude mít tak nízké teploty jako v tomto demonstračním případě. Dosažení vyššího rozdílu teplot (například 200 °C) je u modelu téměř nemožné z důvodu omezení maximální teploty na „teplé“ straně, která nesmí přesáhnout 225 °C. Avšak měření jsem musel opakovat, protože zvolený voltmetr byl vadný a velmi podměřoval. Při rozdílu teplot 143 °C jsem s novým voltmetrem naměřil 5,845 V, kdežto se starým pouze 3,520 V. Bylo tedy nutné všechny tabulky opět přeměřit. Nicméně jsem si druhým pokusem alespoň ověřil správnost postupu měření, protože nové hodnoty byly vyšší o zanášenou chybu původního voltmetru.

7.3 Výsledné grafy

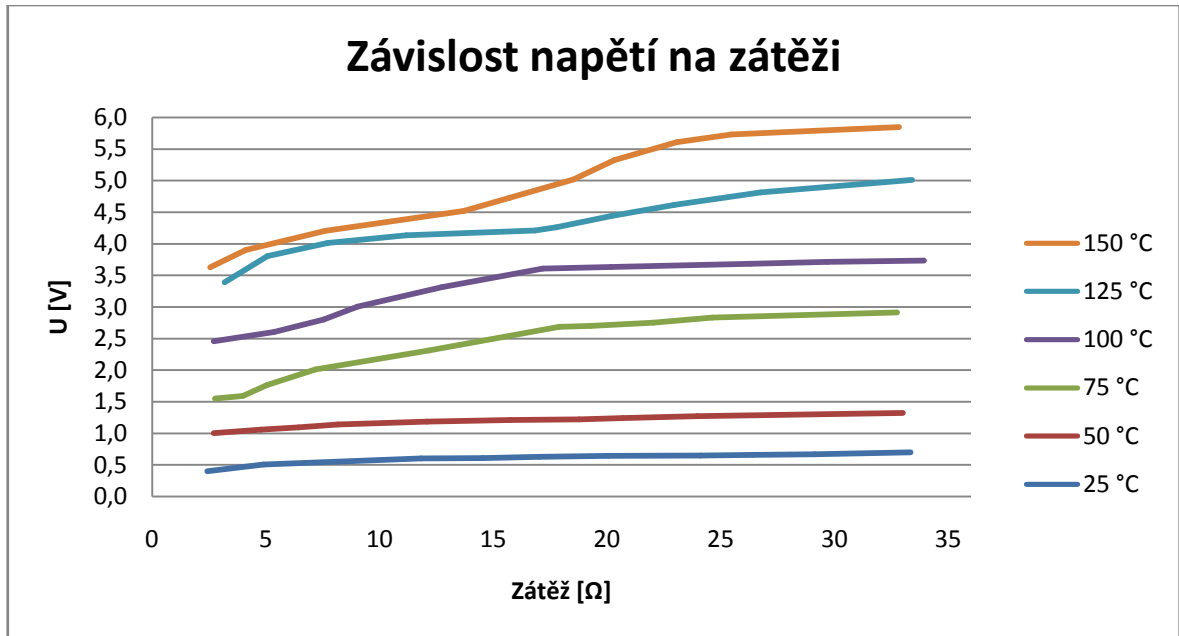
U výsledných grafů jsem se pro názornost rozhodl vložit jednotlivé zástupce hodnot (U, I, P) pro všechny teplotní rozdíly do jednotlivých grafů. Díky tomuto kroku lze z grafů pohodlně vyčíst přírůstky výkonu při dané zátěži v závislosti na teplotě. V grafu závislosti napětí na zátěži je vidět, že se napětí v případě nižšího teplotního rozdílu téměř nemění, v případě vyššího teplotního rozdílu se zátěží vzroste přibližně dvojnásobně.

Naopak je tomu u proudových křivek, kde proud se zátěží klesne až o 800 %. Peltierův článek můžeme tedy označit za velmi měkký zdroj, což v praxi znamená, že jeho charakteristika se zátěží prudce klesá.

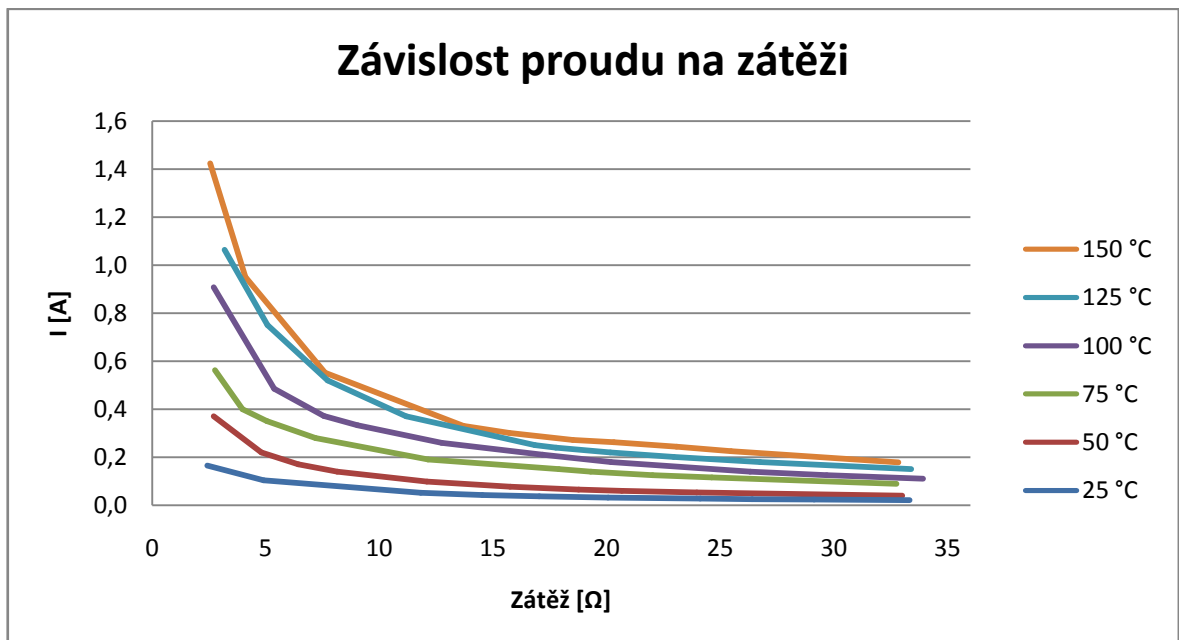
U výkonových křivek si můžeme všimnout poměrně vysokého výkonu při nízké zátěži. Tohoto lze velmi dobře využít ve spojení s LED technologií. Můžeme tak osvětlit menší prostory nebo vytvořit malou čtecí lampičku, kde by byl článek ohříván například čajovou svíčkou. Článek by také bylo možno využít k nabíjení mobilní baterie (obecně můžeme říci k nabíjení jakékoliv baterie s nižším

napětím a kapacitou). Termočlánek je tedy v tomto ohledu výborným pomocníkem v oblastech, kde je dodávka elektrické energie velký problém. Na internetu lze dohledat mnoho nejrůznějších projektů využívající články k výrobě elektrické energie v rozvojových zemích.

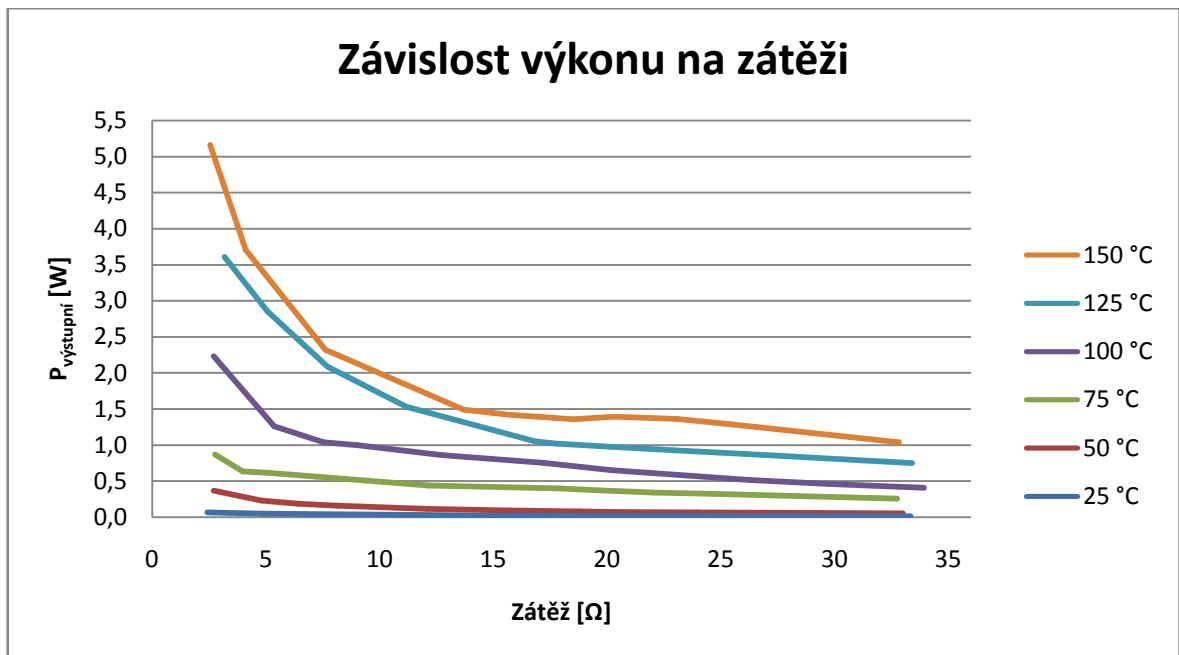
Obrázek 30 Graf závislosti napětí na zátěži



Obrázek 31 Graf závislosti proudu na zátěži



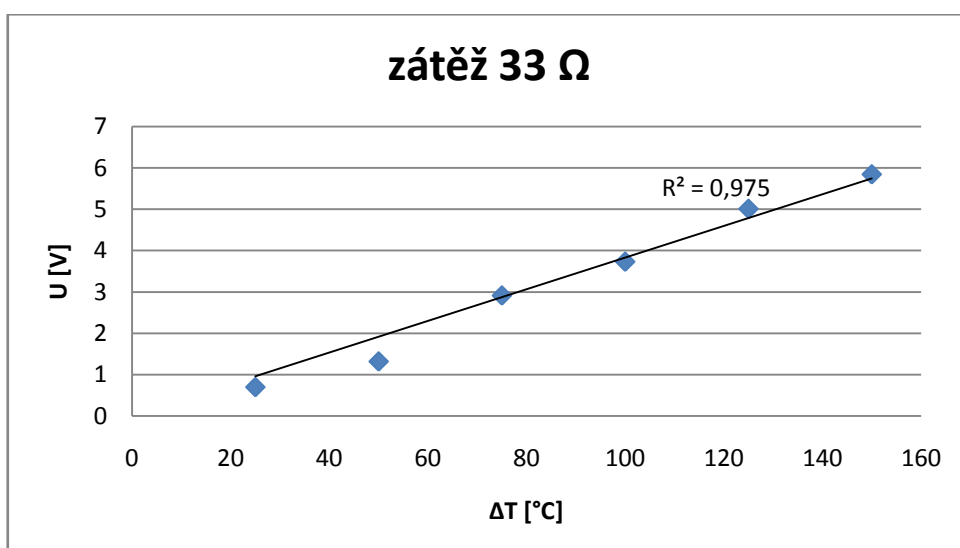
Obrázek 32 Graf závislosti výkonu na zátěži

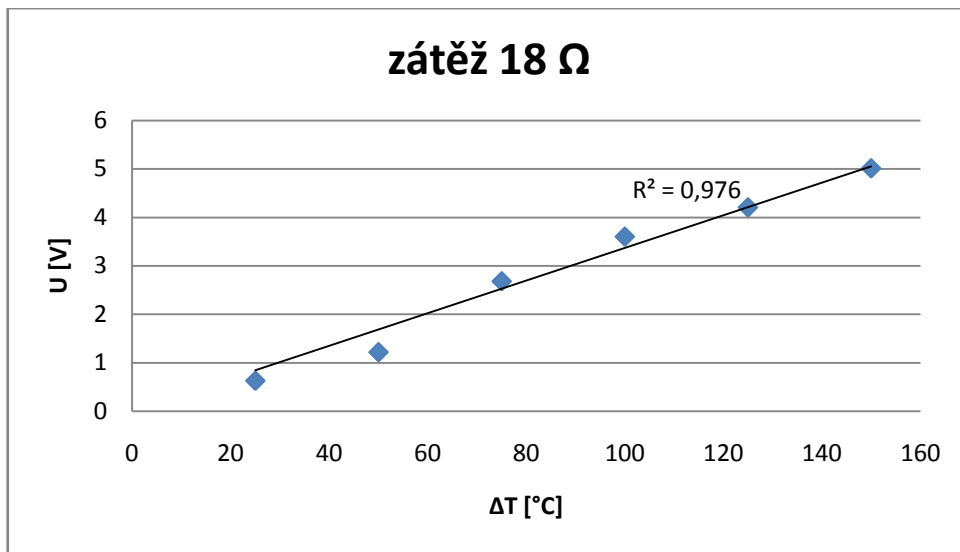
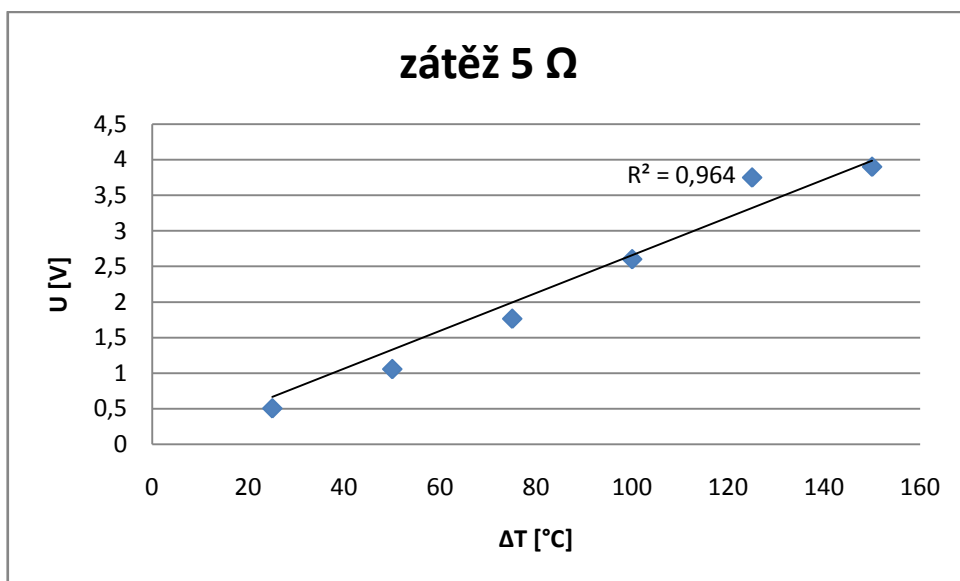


Na následujících třech grafech je možno porovnat napěťové přírůstky v závislosti na teplotě při dané zátěži. Jak tyto grafy ukazují, jak napětí roste lineárně úměrně s teplotou. Například u grafu pro zátěž 33 Ω si můžeme všimnout, že s každým cca 25 °C přírůstkem vstoupne napětí o cca 1 V. Lze tedy odhadnout maximální napětí při rozdílu teplot 225 °C, které by se v daném případě mohlo pohybovat kolem 9 V. Obdobně tak u zátěže 5 Ω by se napětí pohybovalo okolo 6 V.

Do grafu jsem taktéž přidal hodnotu spolehlivosti R^2 , která může dosáhnout maximální hodnoty 1. V mém případě dosahuje hodnota R^2 pro zátěž 33 Ω 0,975 a pro zátěž 5 Ω hodnoty 0,964. Tyto hodnoty jsou důkazem poměrně velmi přesného měření.

Obrázek 33 Graf průběhu napětí v závislosti na teplotě pro zátěž 33 Ω



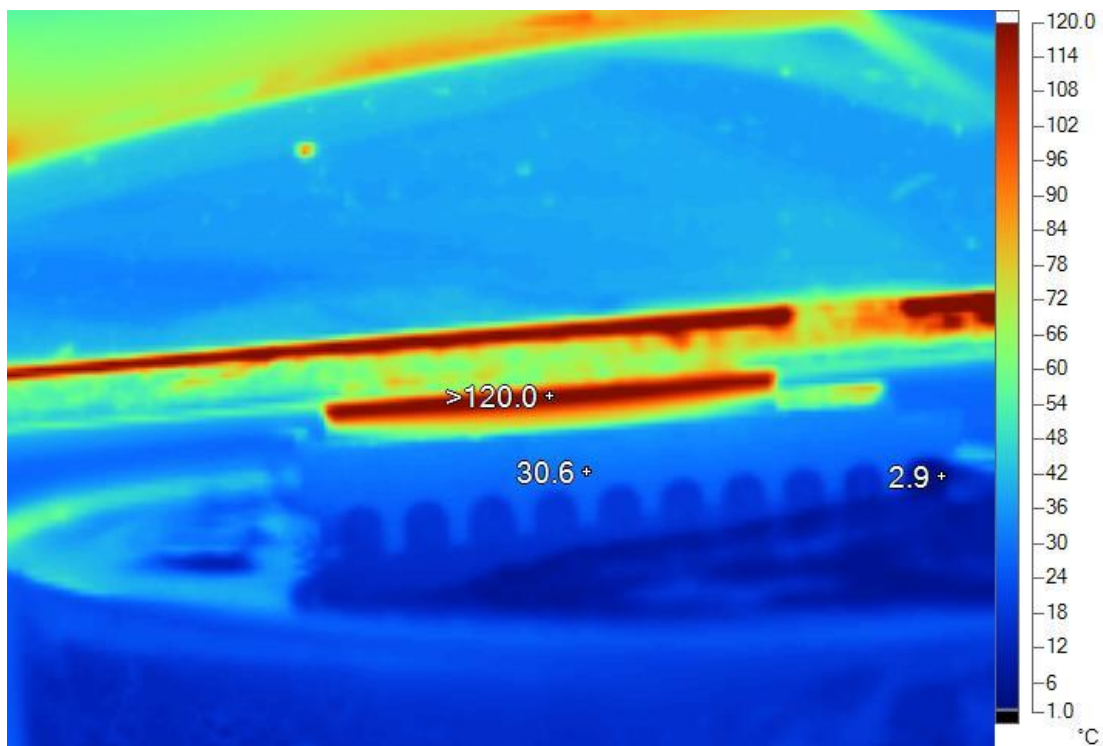
Obrázek 34 Graf průběhu napětí v závislosti na teplotě pro zátěž 18 Ω Obrázek 35 Graf průběhu napětí v závislosti na teplotě pro zátěž 5 Ω 

7.4 Ukázka z termokamery při měření Peltierova článku

Na následujícím obrázku je snímek pořízený termokamerou, který vznikl při měření Peltierova článku za účelem ukázky teplotních rozdílů. Tento snímek byl pořízen při posledním měření, tedy při teplotě 150 °C. Na snímku je teplota bohužel zobrazena jako >120 °C, protože termokamera neměla větší měřicí rozsah. Nicméně je jasně vidět topné těleso žehličky, ohřátý článek a v neposlední řadě také chladič ponořený do roztoku vody a ledu. Jak je patrné, žebra dále od článku mají pouze 2,9 °C, kdežto chladič těsně pod článkem je ohřátý na teplotu 30,6 °C. Na tomto snímku je tedy výborně demonstrována chyba zanášená do měření, tedy prohřívání

člátku a tím pádem zmenšení teplotního rozdílu mezi „teplou“ a „studenou“ stranou. Při měření jako takovém však teplota na chladiči nedosahovala takto vysokých hodnot. Mezi každým měřením jsem vždy nechal článek řádně vychladit a poté provedl měření pouze přiložením žehličky na krátkou dobu. Článek se tedy nestihl prohřát na tak vysokou teplotu jako v tomto případě, kdy bylo třeba žehličku nechat na článku poměrně dlouho dobou za účelem pořízení snímku. Samotné měření nebylo tedy zatíženo tak velkou chybou jako na tomto demonstračním obrázku, nicméně je s ní třeba počítat.

Obrázek 36 Ukázka z termokamery při měření Peltierova článku (foto - autor)



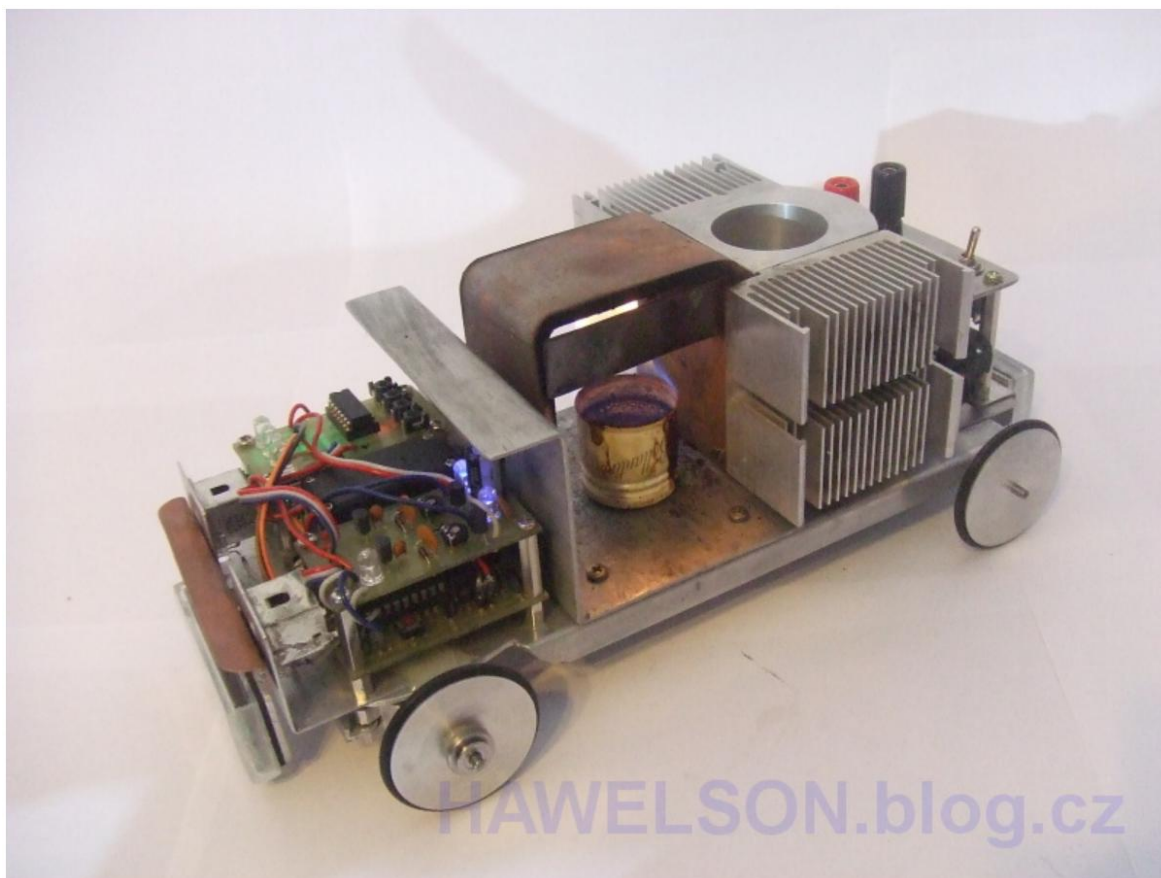
8 Praktická část - Vlastní řešení práce

8.1 Inspirace

Pro výběr tématu mé práce a následné řešení mi byl velkou inspirací internetový blog - Hawelson.ic.cz. Tento blog založil nynější student VŠB-TU Ostrava Petr Hawliczek. Mezi jeho záliby patří stavba beambotů, kvantová fyzika, přeměna energie (ať již elektrické nebo neelektrické) a elektronika jako taková.

Na jeho stránkách jsem narazil na projekt nesoucí název „Spalovák 2“. Jedná se o model vozidla, které přeměňuje tepelnou energii pomocí Peltierova článku na elektrickou. Tato energie je spotřebovávána vlastním provozem vozidla. Autor osadil vozidlo čidly, která mu pomáhají při orientaci v prostoru a umožňují mu vyhýbat se překážkám. Protože se mi toto vozítko velice zalíbilo, ale chtěl jsem, abych jej mohl ovládat já, zakoupil jsem tedy model auta na dálkové ovládání a pustil jsem se do přestavby.

Obrázek 37 Hotový „Spalovák 2“ (zdroj [36])



8.2 Zakoupení modelu a Peltierova článku

Jako základ pro moje vozidlo na Peltierův pohon mi výborně posloužil model jeepu v měřítku 1:14 a byl tedy dostatečně velký a schopný uvést celkovou topnou soustavu, kterou jsem předem odhadoval na cca 1 kg. Po otestování všech vlastností jsem začal model rozebírat a zbavovat nepotřebných částí za účelem snížení váhy a také získání prostoru navíc. Další úprava spočívala v přesunu integrované destičky s ovládáním z vršku auta do prostoru baterií. Dále jsem také přepájel všechny kabely tak, aby odpovídaly jejich délky a barevné označení. Těmito úpravami jsem snížil výšku auta o cca 5-6 cm, což se mi velice hodilo v konečné fázi, kdy jsem na model přiděloval kompletní topnou sestavu.

Peltierův článek jsem zakoupil z velkoobchodu s elektronikou www.gme.cz. Vybral jsem jediný dostupný pro vysoké teploty, M-TEC1-12710 HT. Termočlánek má maximální teplotu 225 °C; rozměry 40 x 40 x 3,5 mm; $I_{max} = 10,5$ A; $U_{max} = 15,4$ V; $\Delta T_{max} = 67$ °C; $Q_{max} (\Delta T = 0$ °C) = 100 W; 127 článků [37; 38]. Víím, že při výběru článku, který má sloužit jako generátor bych měl vybrat TEG namísto TEC. Bohužel TEG článek není na českém trhu dostupný, a pokud jej chci objednat (většinou z Číny), nejlevnější jsem našel za cenu přesahující 1000 Kč, což je v porovnání s tímto cca 5x více. Zvolil jsem tedy levnější variantu s nižší účinností.

Obrázek 38 Rozebraný model auta (foto - autor)

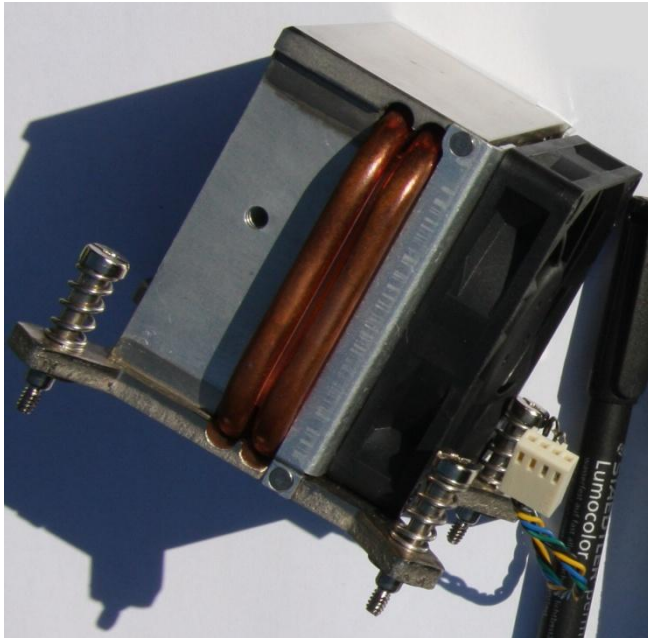


8.3 Chlazení Peltierova článku

Pokud chceme z Peltierova článku získat energii, musíme dosáhnout v ideálním případě co největšího rozdílu teplot na jeho „teplé“ a „studené“ straně. Čím větší tento rozdíl bude, tím více energie z článku získáme. Chlazení článku je tedy jedna z nejdůležitějších částí. Několik dní jsem přemýšlel, jak tento problém vyřešit, protože jsem nemohl najít vhodný chladič, který by měl kompaktní rozměry a přitom vysoký výkon. Nakonec jsem ideální chladič našel v jednom starším

PC. Chladič má 44 žeber o dostatečné ploše, ventilátor o rozměrech 80 x 80 x 15 mm a také dvě heatpipe trubice, které mu pomáhají k efektivnějšímu chlazení.

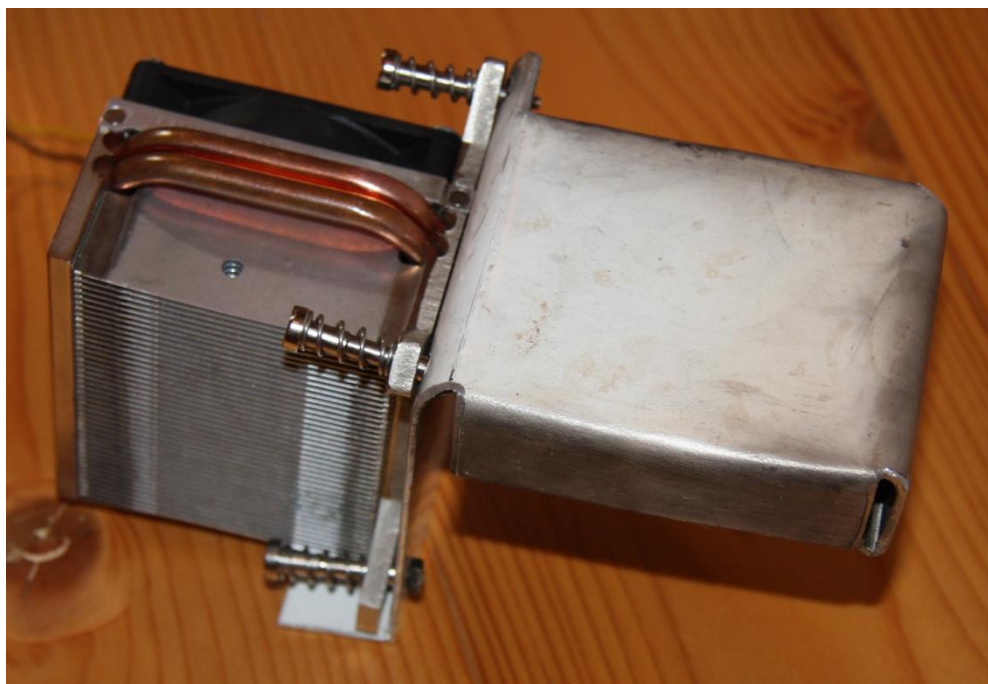
Obrázek 39 Použitý chladič (foto - autor)



8.4 První kroky

Jak jsem si myslel již zpočátku, největší problém bylo vyřešení nejen rozvaděče tepla, ale také zdroje tepla. Jako první zdroj tepla jsem použil klasický pevný podpalovač „PePo“, které se později ukázalo jako nevhodné. Nejenže oheň z tohoto podpalovače hoří dost velkým plamenem a do všech stran, ale v ohni je obrovské množství sazí, a tak jsem po první testu (5 minut hoření) měl na rozvaděči tepla cca 3 mm vysokou vrstvu sazí, které fungovaly jako dokonalý tepelný izolant. Naštěstí první verze rozvaděče tepla byla také velmi špatná. Musel jsem ji tedy celou vyměnit. Jednalo se totiž o zohýbaný hliníkový plech o tloušťce 2 mm. Bohužel tento plech vyzařoval do okolí příliš mnoho tepelné energie a výsledkem bylo, že jsem dosáhl teploty 110 °C nad plamenem (na článku cca polovinu) a chladič měl kolem 30 °C. Získané napětí na článku bylo pouhý 1 V.

Obrázek 40 Chladič včetně první verze heatspreaderu (foto - autor)



8.5 Druhý pokus

Jako nový rozvaděč tepla jsem se rozhodl použít také starý chladič z PC, který jsem měl doma pro různé účely. Měl masivní základnu, která zaručovala dostatečnou tepelnou kapacitu. Navíc měl uprostřed sponu, původně sloužící pro přichycení k bracketu desky. Tuto sponu jsem následně využil. Vybrousil jsem si na ni držáky, které jsem přišrouboval k chladiči. Nyní stačilo najít vhodnější zdroj tepla, než bylo původní „PePo“. Sálh jsem tedy po tekutém lihu, nalil jej do šroubovacího uzávěru z lahve a zapálil. Plamen byl koncentrovaný a nekouřil.

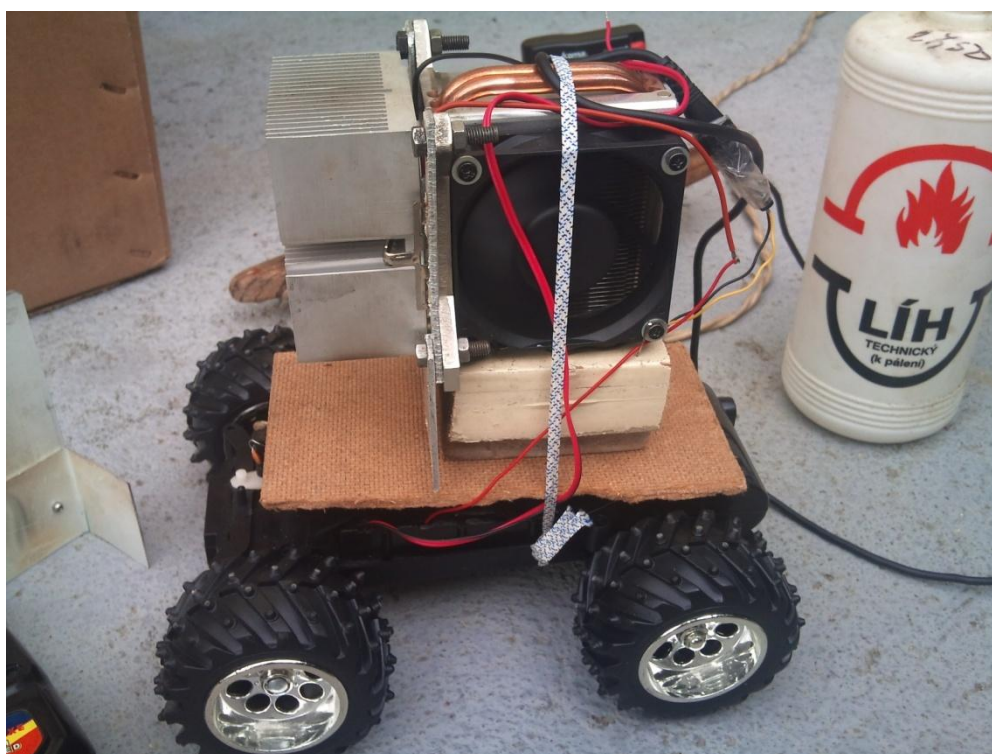
Když jsem měl vše připraveno, mohl jsem opět začít zkoušet. V první řadě jsem článek zkoušel bez auta. Potřeboval jsem zjistit, jakých výkonových hodnot jsem schopen dosáhnout. Zapálil jsem tedy kahan a začal měřit teplotu. Po cca 2 minutách jsem dosáhl 150 °C na článku, což bylo velké zlepšení oproti minulému pokusu. Maximální dosažená teplota v této variantě provedení byla na hranici 190 °C na rozvaděči tepla a na chladiči kolem 55 °C. Z měření teploty jsem tedy přešel na měření napětí. Článek dodával napětí kolem 3 - 5 V. Napětí skutečně dost kolísalo a nemohl jsem přijít na důvod tohoto kolísání. Po delším měření jsem si všiml, že tento výkyv nastane vždy, když je jakkoli vychýlen plamen závanem větru.

Opatřil jsem tedy rozvaděč tepla komínem, abych zamezil nežádoucímu ochlazování. Při dalším měření jsem dosáhl teploty 220 °C, což je téměř maximální teplota udávaná výrobcem článku pro jeho použití. Chladič měl kolem 60 °C a to při okolní teplotě kolem 30 °C (horký letní den).

Při těchto hodnotách jsem ze článku získával napětí kolem 6 V, což by na provoz 9 V auta mělo stačit. Proto jsem nechal kahan dohořet a provizorně jsem na auto přidělal celou sestavu. Po opětovném nahřání článku jsem zkusil s autem popojet a také naměřit potřebná napětí pro správnou funkci modelu. Kolem 3 - 4 V se autu roztočí kola, pokud nejsou nijak zatížena, při 4 - 5 V se dokáže auto pomalinku rozjet a při 5 - 6 V lze s autem již téměř bez problémů jezdit a zatáčet.

Na následujícím obrázku můžete vidět první funkční testovací verzi. Vzhledově nebyla příliš přitažlivá a vozidlo také nedosahovalo takových výkonů, jaké jsem požadoval. Přistoupil jsem tedy na finální, v řadě již třetí úpravu topné soustavy.

Obrázek 41 První funkční verze modelu (foto - autor)



8.6 Téměř finální model

Finální úprava spočívala v pootočení chlazení o 90° a tím pádem i pootočení rozvaděče tepla o 90°. Musel jsem tedy zakoupit nový chladič na procesor, který jsem si nechal následně seříznout a ofrézovat. Dále jsem řešil, jak celou sestavu pevně připevnit k podvozku auta. Vyřezal jsem si sololitovou desku, do které jsem udělal několik děr pro přišroubování k podvozku, a na tuto desku jsem celou sestavu opět přišrouboval. Pouhým pootočením topné soustavy se výška snížila téměř o 10 cm a mohl jsem zachovat i kastli auta, která také prošla mnohými úpravami.

Poslední úprava týkající se „pohonu“ spočívala v přidání ještě jednoho Peltierova článku. Základny chladičů měly rozměry 8 x 6 cm a Peltierův článek má rozměry 4 x 4 cm. Bezproblémově se tedy

vešly dva články vedle sebe. Teploty se mírně změnily, díky většímu převodu tepla byla výsledná teplota na rozvaděči tepla kolem 180 °C a na chladiči kolem 60 °C. Výsledné napětí na 1 článek se mírně snížilo, ale díky sériovém zapojení dvou článků je celkové napětí mírně přes 9 V, což je ideální hodnota, na kterou je auto koncipováno přímo od výrobce.

Obrázek 42 Téměř kompletní model (foto - autor)



8.7 Dokončení modelu

K dokončovací fázi patřily drobné úpravy v topném systému. Došlo také ještě ke změně paliva na pevný líh, používaný do vařičů při campingu. Tekutý líh sloužil dobře, bohužel při jízdě se okamžitě všude rozlil a model několikrát hořel. Jako poslední prošla úpravami kapota. Celou dobu jsem se snažil o to, aby se topná sestava vešla pod kapotu, a to se nakonec povedlo. Vyřizl jsem tedy zadní část, upravil držáky a kapotu lze na model jednoduše nasadit. Navíc jsem do kapoty přidal několik LED diod, které jsou napájeny přímo z řídicího tištěného spoje modelu. Tyto diody slouží jako klasické osvětlení automobilu, tedy hlavní světlomety, brzdová světla, zpátečková světla a zbylo místo i na směrová světla.

Obrázek 43 Kompletně sestavený model (foto - autor)



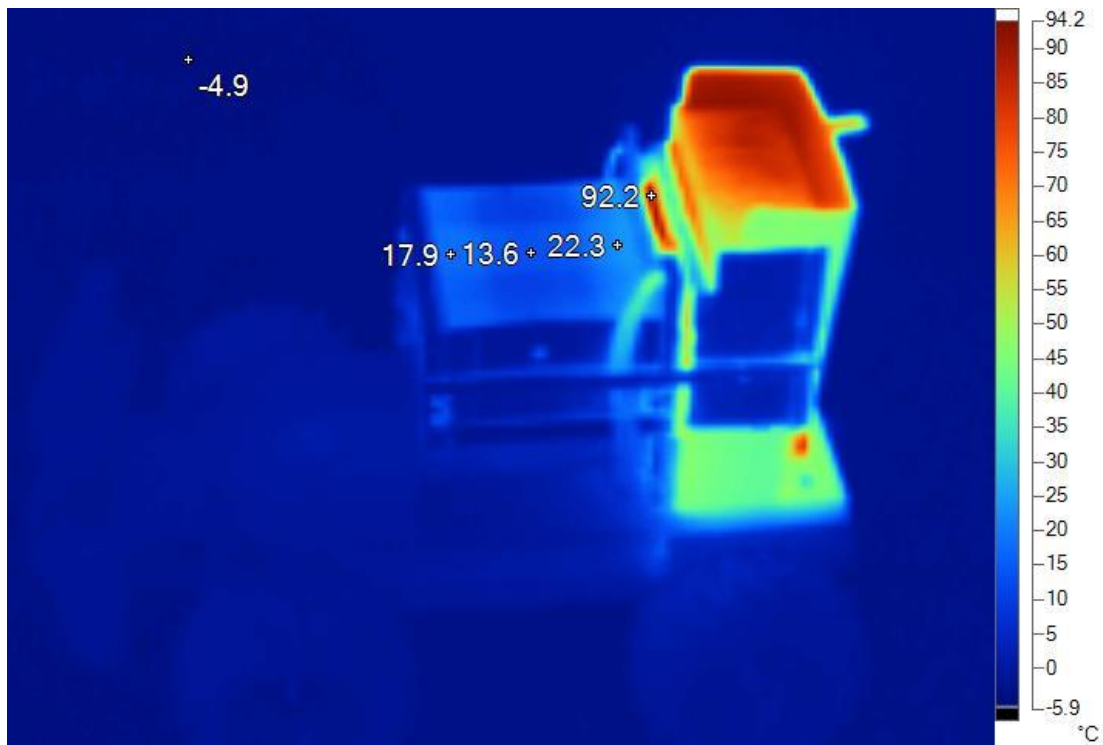
8.8 Zobrazení provozních teplot pomocí termokamery

Protože jsem měl možnost kdykoliv si zapůjčit termokameru, dovezl jsem model auta do školy a po dohodě s vedoucím práce jsem byl puštěn na střechu fakulty, kde jsem mohl model rozehrát a změřit. Noc před měřením napadl sníh, teplota ovzduší se v dobu měření pohybovala kolem $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a foukal nárazový vítr, což nebyly pro model příliš ideální podmínky. Důležitým poznatkem je fakt, že jsem i v takto extrémních podmínkách dosáhl teplot, které umožnily bezproblémový provoz modelu.

Snímek z termokamery byl pořízen ve chvíli, kdy se model dokázal bez problémů rozjet a zatáčet. Jak je vidět ze snímku, tak „teplá“ strana článku má $92,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a „studená“ $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl teplot je tedy cca $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud nahlédneme zpět do tabulky číslo 4 zjistíme, že při reálně vysokém zatížení (za což lze považovat modelářské motorky a elektroniku auta) lze z jednoho článku získat cca 2.9 V . V modelu jsou užity dva články zapojené do série. Napětí dodávané těmito články bylo v tomto případě tedy téměř 6 V . Dosažený teplotní rozdíl nebyl zdaleka nejvyšší. Během testování jsem dosáhl rozdílu přes $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ což stačilo k získání napětí většího než 8 V . Toto napětí je naprosto

dostačující pro bezproblémový provoz modelu. Díky testování nejen v horkém letním dni ale i ve velmi chladném zimním dni jsem ověřil funkčnost modelu v jakýchkoliv teplotních podmínkách.

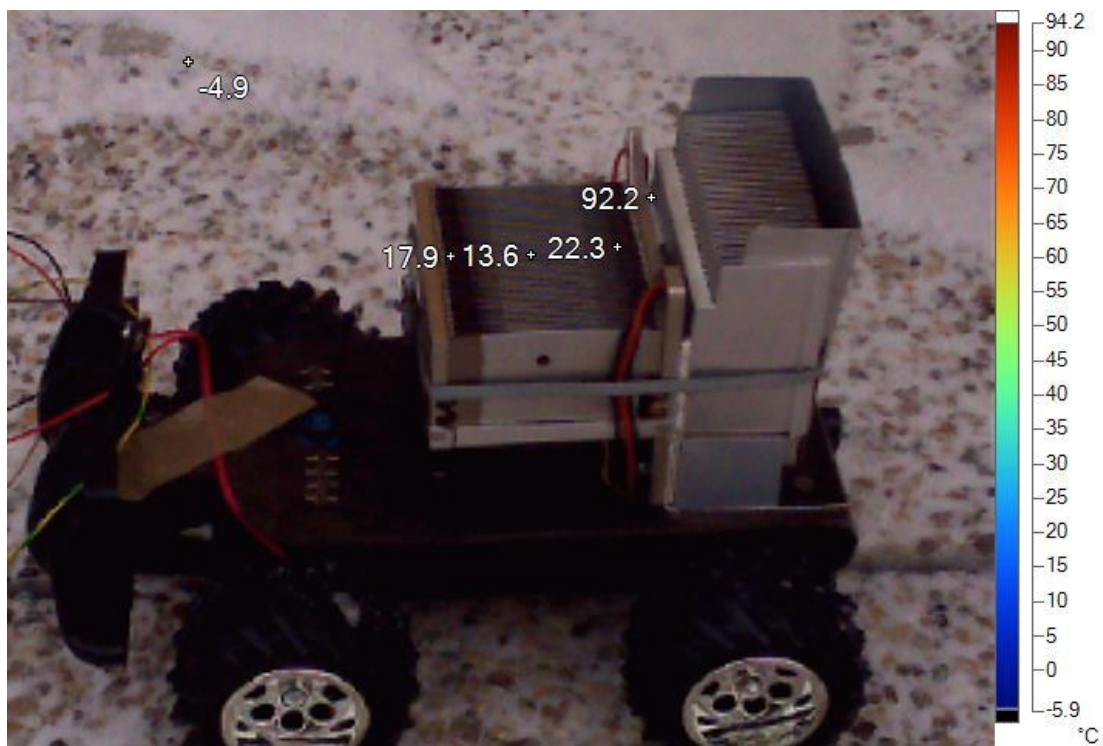
Obrázek 44 Ukázka z termokamery při měření modelu auta zahřátého na provozní teplotu (foto - autor)



Na snímku si lze všimnout výborné účinnosti heatpipe trubic. U klasického chladiče by byl chladič nejteplejší v místě styku s článkem a s přibývajícím vzdáleností by byl čím dál tím chladnější. Můj chladič má trubice ve tvaru „U“ a jak je vidět na snímku v infra spektru, kraj je teplejší než střed chladiče. Díky tomuto systému dochází k mnohem efektivnějšímu chlazení a tím pádem k dosažení větších rozdílů teplot.

Pro lepší představu přikládám snímek z termokamery převedený z infra spektra do běžného RGB spektra. Jak je vidět na snímku, nejvyšší dosažená teplota je na článku (okraj chladiče je chladnější díky ochlazení od vzduchu). Na snímku si také lze všimnout heatpipe trubice (dvě „díry“ na krajích chladiče těsně pod ocelovou sponou).

Obrázek 45 Ukázka z termokamery při měření modelu auta zahřátého na provozní teplotu (foto - autor)



8.9 Závěrem k modelu

Na závěr bych rád sepsal pár poznatků, které se objevily během stavění (testování). Také se vyskytlo několik problémů, které jsem nemohl ovlivnit. První ne zcela ideální volbou byla koupě auta. Jednalo se o model 1:14. Zprvu jsem si myslel, že bude dostatečně velký. Časem se ale ukázalo, že je poměrně malý. Vhodnější model by byl 1:10 nebo 1:8. Další ne nejlepší volbou byla čínská levná verze auta, protože tento model nemá možnost změny rychlosti na převodovce. Převod je volen poměrně těžký. Poslední věcí je volba Peltierova článku. Z důvodu špatné dostupnosti a vysoké ceny článku TEG (Thermoelectric Generator) na českém trhu jsem zvolil článek TEC (Thermoelectric Cooler). Cena článku TEG je přibližně 5x - 10x větší než cena TEC článku. Nespornou výhodou článku TEG je vyšší účinnost a také větší maximální teplota.

Úplným závěrem příkládám tabulku orientačních cen za jednotlivé komponenty (tabulka je platná k listopadu roku 2012).

Tabulka 8 orientační náklady na stavbu

Typ součástky	Cena
2 x Termočlánek M-TEC1-12710 HT 225 °C (gme.cz)	438 Kč
Model auta (aukro.cz)	400 Kč
Chladič (vymontován z PC)	Cca 400 Kč
Rozvaděč tepla (1. a 2. verze)	Cca 500 Kč
Rozvaděč tepla (3. verze, alza.cz)	250 Kč
Teplovodivá pasta (Arctic Cooling MX2, alza.cz)	200 Kč
Palivo (tekutý líh)	Korunová položka
Palivo (pevný líh) 60 ks	110 Kč
Celkem	Cca 2350 Kč

Potřebné vybavení bylo: multimetr, pilka, šroubky, vrtačka, barva, plechy, baterky, pájka, cín, sololit, trafo (na prvotní napájení ventilátoru)

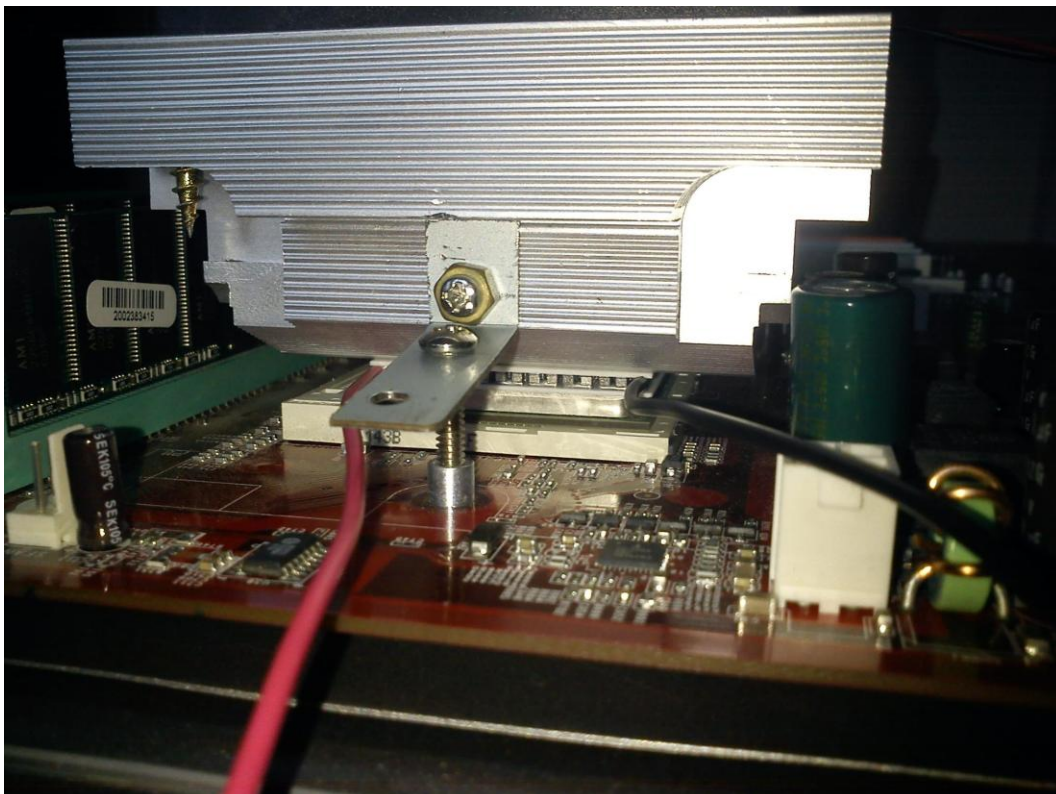
9 Praktická část - Chlazení PC

Protože jsem se vždy zajímal o počítače a o jejich zvyšování výkonu pomocí OverClocking (OC), tedy přetaktování stávajících komponent, vyzkoušel jsem chladit PC Peltierovým článkem. Přetaktování je velmi efektivní cesta k dosažení většího výkonu PC, avšak na úkor zvýšení vyzářeného tepla, které je potřeba nějakým způsobem odvádět pryč. Jako nejlehčí řešení se nabízí použití kvalitního vzduchového chlazení, další volba, ale poněkud dražší a náročnější na provoz, je užití vodního chlazení. Nejlepších výsledků se dá dosáhnout při chlazení tekutým dusíkem, nebo v poslední době stále používanějším héliem. Poslední zmiňované metody jsou vhodné pro krátkodobý provoz a jsou velice nákladné.

9.1 Sestava a testy

Pro test chlazení PC jsem si pořídil Peltierův článek M-TEC1-12710. Tentokrát se nejedná o verzi s přízviskem HT. Termočlánek tedy není pro teplotu 225 °C, ale pouze pro teplotu 138 °C. Parametry článku byly následující: rozměry 40 x 40 x 3,5 mm, $I_{max} = 10,5$ A, $U_{max} = 15,4$ V, $\Delta T_{max} = 68$ °C, $Q_{max} (\Delta T = 0$ °C) = 100 W, 127 článků [37; 38]. Testovací sestava byla následující: AMD Sempron 3000+ 1,8 GHz (9 x 200 Mhz); 1GB DDR; SATA II HDD 80 GB; zdroj 450 W + zdroj 200 W na napájení Peltierova článku; Windows7 32bit.

Obrázek 46 Peltierův článek mezi CPU a chladičem (foto - autor)



CPU má dle specifikace výrobce maximální vyzářený výkon 62 W v zátěži, bez zátěže 7,9 W [39]. Zkusil jsem tedy prvně Peltierův článek napájet trafem 15 V / 4 A (60 W), avšak chladicí výkon nebyl dostatečný. Použil jsem tedy PC zdroj o výkonu 200 W a Peltierův článek zapojil na jeho větev 12 V / 10 A (120 W). S tímto napájením bylo možno CPU podchladiť až na - 10 °C. Výsledné teploty a výkony jsou zapsány v následující tabulce.

Tabulka 9 Dosažené OC hodnoty

	Standardní takt	OC vzduchové chlazení	OC Peltierův článek
Takt	9 * 200 Mhz	9 * 285 Mhz (+42,5 %)	9 * 310 Mhz (+55 %)
Napětí	1,45 V	1,65 V (+13.8 %)	1,55 V (+6,9 %)
Teplota Idle	25-30 °C	30-35 °C (+20 %)	7-9 °C (-68 %)
Teplota Burn	45-55 °C	60-70 °C (+33,5 %)	65-75 °C (+35 %)
Výkon Everest (Queen)	3100 bodů	4380 bodů (+41,3 %)	4866 bodů (+57 %)

9.2 Zhodnocení výsledků

Díky Peltierovu článku lze dosáhnout výborných OC výsledků při sníženém napětí na CPU. Bohužel každý klad s sebou nese i zápor. Hlavní nevýhodou je vyzářené odpadní teplo z Peltierova článku. V mém případě to bylo 120 W, což je přibližně dvojnásobné teplo, než vyzáří samotné CPU. Toto teplo je potřeba odvádět. Protože jsem na Peltierův článek přidělal původní chladič z CPU, musel jsem zvýšit průtok vzduchu. Jeden 80 mm ventilátor tak vystřídaly dva 120 mm ventilátory řazené do kaskády. Chladicí účinek byl výborný, ovšem na úkor velmi zvýšené hladiny hluku. Tento problém lze vyřešit kvalitní chladicí věží s Heat Pipe systémem. Další vážný problém je kondenzace vody v okolí CPU a Peltierova článku. Pokud budeme chladit na teploty nižší, než má okolní vzduch, začne na podchlazených částech kondenzovat (případně namrznat) vzdušná vlhkost. Následně může dojít ke zkratování desky a dalších součástí. Tomuto problému se dá celkem snadno předcházet. Stačí, když CPU nebudeme podchlazovat na teplotu nižší, než je okolní teplota.

10 Závěr

Jak jsme se mohli dočíst v úvodu práce, historie termočlánků je téměř 200 let stará. I přes tuto poměrně dlouhou dobu však nejsou termočlánky širší veřejnosti známé a mnoho lidí vlastně vůbec neví, co si pod pojmem termobaterie, termočlánek nebo Peltierův článek představit. Přesto s ním již téměř každý přišel do styku, byť možná nevědomky.

Termočlánky mají řadu výhod, mezi které lze počítat naprosto tichý provoz, velkou životnost, stálost a odolnost. Existují nejrůznější typy provedení samotných článků - od velmi malých až po velké, dále kaskádové články, kruhové články a články speciální. Další výhodou je také fakt, že termočlánky mohou pracovat střídavě v obou režimech - jednou jako tak zvaná „tepelná pumpa“ a podruhé jako „tepelný generátor“. Díky všem těmto výše uvedeným výhodám se termočlánky využívají například v malých přenosných chladničkách do automobilů, k chlazení microprocesorů nebo čipů u elektronových mikroskopů či kamer. Také je můžeme nalézt například v bankách nebo každé větší firmě ve výdejnicích pramenité vody, kde jedna strana článku ochlazuje vodu a druhá strana článku ji ohřívá.

Mezi nevýhody lze počítat poměrně velmi nízkou účinnost, kterou výrobci udávají kolem 3 - 5 % pro Bi_2TE_3 materiály [40], v praxi je tato účinnost ale mnohdy na hranici 1 %. Další nevýhodou může být poměrně vysoká cena (zvláště u TEG článků), ovšem tento pojem je relativní. Za poslední nevýhodu můžeme označit fakt, že termočlánky mají vrstvy překrývající samotné NP přechody vytvořeny z keramické destičky, která při přitisknutí na nerovný povrch velmi lehce praskne a tím pádem může dojít k nenávratnému poškození vnitřní struktury článku.

Při měření článku a sestavování modelu jsem došel k několika postřehům a poznatkům. Z měření článku vyplývá, že energie dodávaná článkem je přímo úměrná rozdílu teplot (teplotnímu spádu) a roste lineárně s tímto rozdílem. To může být velká výhoda v případě, že potřebujeme získat na článku jiné napětí. Pokud bude potřeba zvýšit napětí ze 3 V na 5 V, z grafu je patrné, že musíme teplotní rozdíl zvýšit z původních 75 °C na 125 °C (v případě 33 Ω zátěže). Tento příklad samozřejmě neplatí u každého článku, záleží na daném typu a podmínkách.

Stavbou modelu jsem si ověřil, že z článku lze při správně navržené topné a chladicí soustavě získávat poměrně vysoké výkony. Abych v modelu nemusel dosahovat tak vysokých teplot, zapojil jsem dva články do série. Tímto způsobem jsem získal pro model dostatečné napětí pro jeho provoz. Dodávaný výkon článkem je několikanásobně vyšší, než dokáže model spotřebovat pro svůj provoz. Proto by bylo možno soustavu doplnit o jednoduchý stabilizátor napětí, například na 5 V, což by v praxi bylo možno využít pro nabíjení mobilního telefonu nebo jiného zařízení

(napětí můžeme transformovat i na vyšší hodnoty, musíme ale počítat s nižším proudem). Má topná soustava má tu výhodu, že ji lze z modelu jednoduše odmontovat a použít například jako samostatný generátor elektrické energie či ji přendat na jiný model.

Při užití článku k chlazení PC jsem dosáhl velmi dobrých výsledků. Díky nízkým teplotám procesoru (zejména bez zátěže) bylo možno snížit napětí, čímž bylo dosaženo větší stability celého systému. Avšak takt procesoru bylo možné nadále zvyšovat. Konečné navýšení výkonu oproti původnímu bylo v daném případě 57 %. Pokud bychom užili výkonnější článek, mohl by být výkon větší. Je ale třeba počítat s limitami, které jsou dány zejména možnostmi základní desky a také konkrétním typem procesoru.

11 Citovaná literatura

1. **ČEZ.** Polovodiče. *ČEZ.* [Online] [Citace: 1. 1 2013.] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>.
2. **Yacobi, B. G.** *Semiconductor Materials - An Introduction to Basic Principles.* New York : Springer, 2003. ISBN - 03-064-7361-5.
3. **Sedlák, B a Štoll, I.** *Elektřina a magnetismus.* Praha : Praha Academia, 2002. ISBN 80-22-1004-1.
4. **Frank, H a Šnejdar, V.** *Principy a vlastnosti polovodičových součástek.* Praha : SNTL, 1976.
5. *Scribd.* [Online] [Citace: 11. 12 2012.] <http://cs.scribd.com/doc/25145109/3-Polovodi%C4%8De>.
6. **Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.** *Fyzika.* VUTIUM Brno : PROMETHEUS Praha, 2000.
7. Fyzikální podstata přechodu PN. *Encyklopedie fyziky.* [Online] [Citace: 3. 12 2012.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>.
8. Thermoelectric effect. *Wikipedia.* [Online] 24. 11 2012. [Citace: 13. 12 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect.
9. Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky.* [Online] [Citace: 13. 12 2012.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>.
10. Thomas Johann Seebeck. *Wikipedia.* [Online] 27. 11 2012. [Citace: 13. 12 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck.
11. **Brown, DR, a další.** *The Prospects of Alternatives Vapor Compression Technology for Space Cooling and Food Refrigeration Applications.* Washington 99352 : Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
12. History of Thermoelectrics. *Custom Thermoelectric.* [Online] [Citace: 14. 12 2012.] <http://www.customthermoelectric.com/History.html>.
13. Termoelektrický jev. *Wikipedia.* [Online] 10. 2 2012. [Citace: 13. 12 2012.] http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev.
14. Simple Demonstration of Seebeck Effect. *Science Education Review.* [Online] The Petroleum Institute, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9. 3 2010. [Citace: 16. 12 2012.] The Petroleum Institute.

-
15. The Seebeck Coefficient. *Electronic Cooling*. [Online] 1. 11 2006. [Citace: 16. 12 2012.] <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>.
16. Nichrome. *Wikipedia*. [Online] 10. 12 2012. [Citace: 15. 12 2012.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome>.
17. Peltier Modules. *etutorials.org*. [Online] [Citace: 5. 12 2012.] <http://etutorials.org/Misc/pc+hardware+tuning+acceleration/Chapter+11+Problems+with+using+Thermoelectric+Elements/Peltier+Modules/>.
18. Heinrich Leinz. *Wikipedia*. [Online] 5. 12 2012. [Citace: 26. 12 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Lenz.
19. Thomsonův jev. *Wikipedia*. [Online] 18. 7 2011. [Citace: 15. 12 2012.] http://cs.wikipedia.org/wiki/Thomson%C5%AFv_jev.
20. **Jaroslav Reichl, Martin Všeticka**. Thomsonův jev. *Encyklopedie fyziky*. [Online] [Citace: 25. 12 2012.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>.
21. William Thomson. *Wikipedia*. [Online] 3. 12 2012. [Citace: 25. 12 2012.] http://cs.wikipedia.org/wiki/William_Thomson.
22. **E, Henry**. Thomson effect. *The Encyklopedia of Science*. [Online] [Citace: 29. 12 2012.] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/Thomson_effect.html.
23. **Jiří Bureš**. William Thomson lord Kelvin. *conVERTER*. [Online] 2002. [Citace: 28. 12 2012.] <http://www.converter.cz/fyzici/kelvin.htm>.
24. **Javad Abolfazli Esfahani, Nader Rahbar, Mehdi Lavvaf**. Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still — An experimental study on winter days. *ScienceDirect*. [Online] Islamic Azad University, Mechanical Engineering Department, 15. 3 2011. [Citace: 23. 12 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410007897>.
25. **Jiří Navrátil**. Termoelektrické materiály. *Univerzita Pardubice*. [Online] 8. 9 2010. [Citace: 29. 12 2012.] <http://www.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>.
26. Micro-Thermoelectric Cooling Module. *Hui Mao*. [Online] 4. 3 2011. [Citace: 2. 1 2013.] <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=22&lang=en###>.
27. Standard Common Thermoelectric Cooling Module. *Hui Mao*. [Online] 15. 3 2011. [Citace: 2. 1 2013.] <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=20&lang=en>.

28. Multi-stage thermoelectric cooling module. *Hui Mao*. [Online] 10. 5 2011. [Citace: 5. 1 2013.] <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=27&lang=en>.
29. Multi Cascade Series. *Made in china*. [Online] [Citace: 5. 1 2012.] <http://image.made-in-china.com/2f0j00qvBasWRrHLoh/Multistage-Cascade-Series-TEC51-.jpg>.
30. Center Hole & Round Thermoelectric Cooling Module. *Hui Mao*. [Online] 4. 3 2011. [Citace: 5. 1 2013.] <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=26&lang=en>.
31. thermoelectric cooling module. *Alibaba*. [Online] [Citace: 5. 1 2013.] http://www.alibaba.com/product-gs/294583865/thermoelectric_cooling_module.html.
32. Home Power station. *TEG Power*. [Online] [Citace: 10. 1 2013.] <http://tegpowers.com/>.
33. Thermoelectrics. *California Institute of Technology*. [Online] [Citace: 15. 1 2013.] <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/sustainability.html>.
34. **Snyder, G. Jeffrey**. Small Thermoelectric Generators. *electrochem*. [Online] 2008. [Citace: 20. 1 2013.] http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf.
35. *Thermo-Electric Generators*. [Online] 13. 6 2008. [Citace: 25. 1 2013.] <http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/POWER/thermoelectric/thermoelectric.htm#stone>.
36. **Hawliczek, Petr**. Hawelson.ic.cz. *Hawelson*. [Online] 22. 2 2009. [Citace: 30. 12 2012.] http://hawelson.ic.cz/tepelny_generator/SPALOVAK_2.php.
37. **HB Electronic**. HB Electronic components form China. [Online] [Citace: 1. 1 2013.] <http://www.hebeiltd.com.cn/?p=peltier.module>.
38. **GM Electronic**. GM Electronic. [Online] [Citace: 1. 1 2013.] <http://www.gme.cz/cz/m-tec1-12710-225-c-p601-019/>.
39. **CPU World**. CPU World. *CPU World*. [Online] 28. 10 2012. [Citace: 30. 12 2012.] <http://www.cpu-world.com/CPUs/K7/AMD-Sempron%203000+%20-%20SDA3000DUT4D%20%28SDA3000BOX%29.html>.
40. Thermoelectric modules for power generating . *Power generating modules*. [Online] SCTB NORD. [Citace: 1. 3 2013.] http://sctbnord.com/article_158.html.
41. High-power Thermoelectric Cooling Module. *Hui Mao*. [Online] 15. 3 2011. [Citace: 23. 12 2012.] <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=24&lang=en>.