



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR PRO NABÍJENÍ MOBILNÍCH ZAŘÍZENÍ

THERMOELECTRIC GENERATOR FOR CHARGING OF MOBIL DEVICES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Nguyen

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2016



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Michal Nguyen</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Termoelektrický generátor pro nabíjení mobilních zařízení**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Cílem je návrh termoelektrického generátoru, který bude využívat jako zdroj tepla vařící vodu nebo plamen svíčky apod.

### **Cíle bakalářské práce:**

literární průzkum  
Návrh TEG  
realizace TEG  
testování

### **Seznam literatury:**

M. Li : Thermoelectric-Generator-Based DCDCConversion Network for Automotive Applications, Master of Science Thesis. Stockholm, Sweden 2011

Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.

Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

Idelčik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**Abstrakt**

Táto práca sa zaoberá návrhom a testovaním termoelektrického generátoru pre nabíjanie mobilného zariadenia pomocou plameňa sviečky. .

**Summary**

This thesis deals with a problem of building and measuring the thermoelectric generator for charging a mobile device with use of a candle.

**Klíčová slova**

Termoelektrický generátor, bakalárska práca, VUT v Brně.

**Keywords**

Thermoelectric generator, bachelor's thesis, BUT Brno

NGUYEN, M. *Termoelektrický generátor pro nabíjení mobilních zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 31 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „ Termoelektrický generátor pro nabíjení mobilních zařízení“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a na základe konzultácii s vedúcim bakalárskej práce.

V Brne 25. 5. 2016

.....

Michal Nguyen

## **Pod'akovanie**

Veľmi rád by som poďakoval doc. Ing. Radkovi Vlachovi, PhD. za vedenie, cenné pripomienky a rady pri tvorbe tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať všetkým pracovníkom fakulty za znalosti a praktické rady ktoré mi predali.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>História</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Termoelektrické javy</b>	<b>4</b>
3.1	Seebeckov jav . . . . .	4
3.1.1	Seebeckov koeficient . . . . .	4
3.1.2	Indukované napätie . . . . .	5
3.2	Peltierov jav . . . . .	5
3.2.1	Peltierov koeficient . . . . .	5
3.3	Thompsonov jav . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Termoelektrické materiály</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Princíp a výroba termoelektrickej energie</b>	<b>9</b>
5.1	Základný princíp fungovania termoelektrického generátoru . . . . .	9
5.2	Výroba termoelektrickej energie . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Mikroskopický pohľad na styčné plochy</b>	<b>11</b>
6.1	Zaistenie prestupu tepla . . . . .	12
6.1.1	Vyrovnanie povrchov . . . . .	12
6.1.2	Aplikácia teplovodivého materiálu . . . . .	12
<b>7</b>	<b>DC/DC meniče</b>	<b>13</b>
7.1	Princíp DC/DC meničov . . . . .	13
7.2	Zvyšujúci DC/DC menič LMR61428 . . . . .	13
<b>8</b>	<b>Matematický model</b>	<b>16</b>
8.1	Sústava v ustálenom stave . . . . .	16
8.2	Sústava v priebehu zahrievania a generovania . . . . .	17
8.3	Zostavenie matematického modelu . . . . .	18
8.3.1	Tepelné rovnice . . . . .	18
8.3.2	Elektrická rovnica . . . . .	19
8.4	Riešenie rovníc v programe Mathcad . . . . .	19
<b>9</b>	<b>Realizácia TEG</b>	<b>22</b>
9.1	Montáž . . . . .	23
9.2	Merania . . . . .	24
9.3	Nastavenie DC/DC meniča . . . . .	25
9.4	Meranie so zapojeným DC/DC meničom . . . . .	25
9.5	Nabíjanie mobilného zariadenia . . . . .	26
9.5.1	Meranie počas nabíjania . . . . .	27
<b>10</b>	<b>Záver</b>	<b>29</b>
<b>11</b>	<b>Zoznam použitých skratiek a symbolov</b>	<b>31</b>



# 1. Úvod

Termoelektrické javy umožňujú priamu premenu tepla na elektrinu alebo transportovať teplo z nižšej teplotnej úrovne na vyššiu úroveň. Pretože javy prebiehajú v pevných látkach a „pracovnou tekutinou“ sú nosiče elektrického náboja, je pre termoelektrické zariadenia typická jednoduchosť a prevádzka bez chemických látok alebo pohyblivých častí. Pokiaľ sú korektne používané, potom aj spoľahlivosť a dlhá životnosť. Vzhľadom na nízku účinnosť termoelektrickej premeny pri výrobe elektrickej energie sú možnosti obmedzené. Samostatne pracujú tzv. termoelektrické generátory (TEG) ako zdroje elektrickej energie a spotrebúvajú na prevádzku ušľachtilé primárne palivá len v špecifických aplikáciách: v odľahlých, ťažko prístupných alebo nebezpečných oblastiach.

V súvislosti so vzrastajúcimi cenami palív a záujmom o technológiu šetrnú k životnému prostrediu sa objavujú snahy využívať termoelektrinu pre produkciu elektrickej energie z odpadného tepla. Vo svete je tento trend patrný od konca osemdesiatych rokov. V prípadoch, kedy zdrojom energie bude inak využiteľné odpadné teplo, môže byť použité termoelektrické zariadenie prínosným spôsobom, ako získať akostnú energiu, ktorej získanie konvenčnými spôsobmi premien mohlo byť obťažne realizovateľné [7]

## 2. História

TEG sú používané už cez 30 rokov pri rôznych aplikáciach ako pri diaľkovej technike, navigácii, meteorologických staniách alebo plynovodoch. Prvé praktické použitie TEG bolo v roku 1959 na získavanie energie vo vesmíre, kde ako zdroj tepla bolo použité polonium-210. V poslednej dobe majú termoelektrické články komerčný úspech pri použití v chladničkách. Vďaka tomu išla cena bežných termoelektrických materiálov dole a taktiež sa zlepšila aj ich kvalita [5].

Ako prvý objaviteľ termoelektrického javu sa označuje estónsko-nemecký fyzik Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831), ktorý roku 1823 dokázal, že vďaka ohrievaniu spoja dvoch vodičov rozdielnych materiálov dochádza k odkláňaniu strelky magnetického kompasu. Neskôr však bolo objavené, že vznikajúce magnetické pole je spôsobené indukovaným elektromotorickým napätím a prúdom prechádzajúcim týmito dvoma vodičmi. Po trinástich rokoch od objavenia Seebeckovho javu, tj. roku 1834, skúmal francúzsky fyzik menom Jean Charles Athanase Peltier (1785 - 1845) zmeny teploty koncov dvoch rozdielnych kovov, ktoré tvorili vodiče zapojené v sérii, pri prechode elektrického prúdu. Zistil, že styčná plocha jedného vodiča sa ochladzuje a druhého naopak ohrieva v závislosti na smere pretekajúceho elektrického prúdu. Tento jav dostal pomenovanie po svojom objaviteľovi a je dodnes popisovaný ako Peltierov jav [4].

Ako prvý, kto začal používať model pre odvodenie maximálnej účinnosti a výkonu termoelektrického článku, bol roku 1909 Edmund Altenkirch. Jeho výpočtové vzťahy sa v neskoršej dobe formulovali až do dnešnej podoby termoelektrickej účinnosti (tzv. Meritu)  $ZT$ , ktorá zhrňa vlastnosti termoelektrického materiálu, ktorý by mal mať vysoký Seebeckov koeficient, vysokú elektrickú vodivosť (pre minimalizovanie Joulovo teplo vznikajúceho prechodom elektrického prúdu vodičom) a nízkou tepelnou vodivosť (pre minimalizovanie tepelných strát). Následne po formuláciu týchto vzťahov sa ukázalo, že vývoj termoelektrických materiálov, ktorý sa výhradne sústredil iba na kovové materiály (dosahujúcich nízkych hodnôt Seebeckovho koeficientu), by sa mohol uberať smerom k nerastom s vlastnosťami polovodičov [4].

Koncom 30. rokov dvadsiateho storočia sa vyvíjali syntetické polovodiče, ktoré už dosahovali až desaťnásobnej hodnoty Seebeckovho koeficientu než materiály kovové a tak polovodičové materiály dodali impulz k novému záujmu o termoelektrické zariadenia. Okolo roku 1950 bol skonštruovaný prvý termoelektrický generátor s účinnosťou 5V tú chvíľu zavládlo nadšenie, že by v budúcnosti by bolo možné aplikovať termoelektrické zariadenia do mnohých priemyselných odvetví a mohli by tak nahradiť skoršie tepelné motory a chladničky, Do vývoja sa tak pustili korporácie ako Národné výskumné laboratórium v USA alebo univerzita Westinghouse. Bohužiaľ koncom roka 1960 vysoké nasadenie a tempo bolo značne spomalené a to po správach o limite pri dosahovaní termoelektrickej účinnosti, ktoré podľa vtedajších informácií nebolo možné prekročiť hornú hranicu  $ZT=1$ . Mnohé výskumy boli preto zrušené a predtým zostrojené zariadenia demontované [4].

# 3. Termoelektrické javy

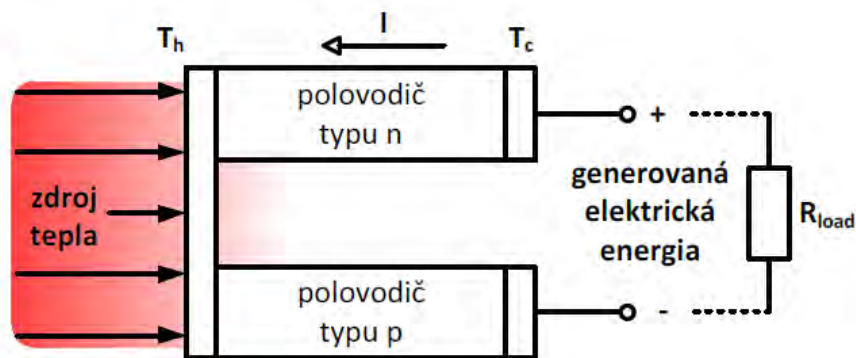
Existuje niekoľko termoelektrických javov ktoré nastávajú vo vodičoch. Vďaka týmto termoelektrickým javom môžu tieto vodiče generovať elektrické napätie, teplo alebo môžu chladiť. Tieto javy sú známe pod názvami ako Seebeckov jav, Peltierov jav a Thompsonov jav.

## 3.1. Seebeckov jav

Pre termoelektrické generovanie je pre nás najdôležitejší Seebeckov jav, ktorý sa odkazuje na napätie ktoré vzniká vo vnútri vodivého materiálu za prítomnosti teplotného gradientu. Na horúcej strane majú elektróny v priemere vyššiu energiu než na strane studenej. Tento systém chce zotrvať v čo najnižšom energetickom stave, takže vzniká potenciál ktorý sa snaží vytlačiť elektróny z horúcej strany na stranu studenú.

Najbežnejšou aplikáciou tohto fenoménu je termoelektrický článok. V takomto článku sú dva rôzne kovy spojené za prítomnosti tepla. Tým pádom má každý z materiálov teplotný gradient naprieč svojou dĺžkou ku studenému koncu. Keďže každý z materiálov má rozdielny Seebeckov koeficient každý produkuje rozdielne napätie. Toto napätie môže byť zmerané a vzťahované ku teplotám na oboch koncoch TEG. Bežnou mylnou predstavou je, že napätie je produkované z kontaktného potenciálu dvoch rôznych kovov, čo nie je správne tvrdenie [5].

Seebeckov jav je vznik napätia, ktoré nastáva pri teplotných rozdieloch medzi dvoma rozdielnymi kovy alebo polovodičmi. To spôsobuje nepretržité prúdenie elektrónov, pokiaľ vodiče vytvoria uzavretý obvod [8].



Obrázek 3.1: Seebeckov jav [8]

### 3.1.1. Seebeckov koeficient

Diferenčný Seebeckov koeficient je definovaný vzťahom

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \tag{3.1}$$

$\alpha$ [V.K<sup>-1</sup>]  
 $U$ [V]  
 $\Delta T$ [°C; K]

Seebeckov (taktiež termoelektrický)koeficient  
Napätie medzi koncami vodiča  
Rozdiel teplôt

### 3.1.2. Indukované napätie

Veľkosť indukovaného napätia pomocou Seebeckovho efektu sa určí nasledovne:

$$U_0 = \int_{T_h}^{T_c} (\alpha_n - \alpha_p) dT \quad (3.2)$$

Seebeckov koeficient je nelineárne závislý od teploty vodiča, použitom materiáli a jeho

$U_0$  elektromotorické napätie naprázdno  
 $\alpha_{n(p)}$  Seebeckov koeficient materiálu typu N(P)  
 $T_{h(c)}$  teplota teplej(studenej) strany

molekulárnej štruktúre. Ak je možné považovať Seebeckov koeficient v určitom teplotnom rozsahu za konštantný, vzťah 3.2 možno linearizovať nasledovne:

$$U_0 = (\alpha_n - \alpha_p) \cdot (T_h - T_c) = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

Týmto sa spätne dostávame ku vzťahu 3.1[8].

## 3.2. Peltierov jav

Peltierov jav je inverzný k javu Seebeckovu. Fyzikálna podstata tohto javu taktiež spočíva v difúziu elektrónov, avšak teraz je zdrojom kinetickej energie elektrónov privedené externé elektromotorické napätie, ktoré spôsobuje tok elektrického prúdu obvodom tvoreným termoelektrickou dvojicou. To má za následok absorbovanie alebo uvoľňovanie tepla na koncových spojoch vodičov v závislosti od smeru toku elektrického prúdu [4].

### 3.2.1. Peltierov koeficient

Vzniknuté teplo sa dá vyjadriť nasledujúcim vzťahom [8]

$$Q = \Pi_{pn} \cdot I \quad (3.4)$$

$\Pi_{pn}[V \cdot K^{-1}]$	Peltierov koeficient termočlánku
$Q[W]$	Teplo vznikajúce/zanikajúce na spoji vodičov
$I[A]$	Prúd pretekajúci spojom

## 3.3. Thomsonov jav

Thomsonov jav opisuje vratnú tepelnú zmenu, ktorú môžeme aplikovať na ľubovoľný vodič z homogénneho materiálu, ktorý je vystavený teplotnému rozdielu a zároveň ním prechádza elektrický prúd. Sám Thomson tento jav nazýval "špecifickým teplom elektriny" prejavujúcim sa zvýšením či znížením potenciálnej energie nosiča elektrického náboja vplyvom pohlcovania resp. emitovania tepla [4].

### 3.3. THOMPSONOV JAV

Pre vysvetlenie je možné uviesť príklad. Keď sa budú nosiče elektrického náboja pohybovať vplyvom elektrického prúdu proti smeru teplotného spádu, ich potenciálna energia bude narastať vplyvom pohlcovania tepla, ktoré je tiež formou energie. Naopak pri toku nosičov po smere teplotného gradientu bude dochádzať k uvoľňovaniu tepla, čo povedie k zníženiu ich potenciálnej energie. Tento jav nehraje zásadnú úlohu pri návrhu termoelektrického zariadenia, avšak pri detailnejších kalkuláciách by mal byť zahrnutý do výpočtov [4].

## 4. Termoelektrické materiály

V súčasnej dobe sú skúmané tucty materiálov pre aplikáciu v termoelektrickom generátore. Dá sa povedať, že v ktoromkoľvek vodivom materiále môže nastať Seebeckov jav 3.1 ktorý sa dá využiť na termoelektrické generovanie napätia. No niektoré materiály sú efektívnejšie než iné. Pri vyberaní termoelektrických materiálov je koeficient termoelektrickej účinnosti, taktiež nazývaný ako termoelektrický merit určujúcou hodnotou. Termoelektrický merit označovaný ako  $Z$  – indikátor efektívnosti materiálu pri generovaní napätia je definovaný ako [5].

$$Z = \frac{\alpha^2}{R_i \cdot \lambda} \quad (4.1)$$

$\alpha$	[V·K <sup>-1</sup> ]	Seebeckov koeficient
$Z$	[1]	Koeficient termoelektrické účinnosti – Merit
$\lambda$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivosť
$R_i$	[Ω]	Elektrický odpor

Táto veličina sa často mylne označuje ako účinnosť, avšak nejedná sa o žiadne percentuálne vyjadrenie[8]. Ďalej hodnota  $ZT$  je bezrozmerná hodnota ktorá sa taktiež používa ak teplotu považujeme za premennú.

$$Z \cdot T = \frac{\alpha^2}{R_i \cdot \lambda} \cdot T \quad (4.2)$$

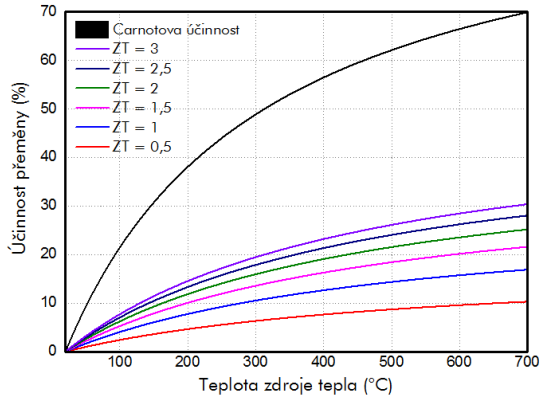
$T$  [K] Priemerná absolútna teplota na termočlánku

Pre maximálnu účinnosť chceme hodnotu  $ZT$  čo najvyššiu, respektíve najlepšie termoelektrické materiály majú:

- vysoký Seebeckov koeficient  $\alpha$
- nízky elektrický odpor  $R_i$
- nízku tepelnú vodivosť  $\lambda$ .

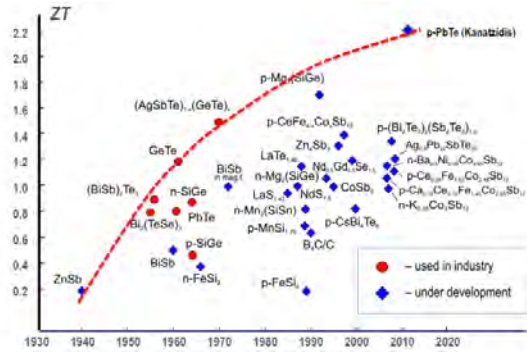
Taktiež je známe že kovy majú až príliš vysokú koncentráciu nosičov nábojov pre použitie v TEGu. Nevodiče na druhú stranu majú zase týchto nosičov príliš málo. Avšak polovodiče majú koncentráciu nosičov nábojov niekde medzi, pri optimálnej hodnote približne  $10^{19}/cm$  [5].

Na vývoj materiálov s optimálnou hodnotou  $Z$  pre rôzne tepelné rozpätia predchádzal rozsiahli výskum. Na obr.4.1 je znázornený priebeh účinnosti materiálov s daným  $ZT$  a účinnosti ideálneho tepelného stroja. Bežne dostupné termoelektrické materiály majú približne parameter  $ZT \leq 1$  a teda aj malú účinnosť. V nízkotepelných aplikáciách typicky okolo 5% . Zložitejšie segmentované moduly môžu dosahovať 10%. Laboratórne pripravené materiály majú vyššie koeficienty  $ZT$  a môžu dosahovať vyšších účinností.



Obrázek 4.1: Porovnanie termoelektrickej účinnosti a teoretickej maximálnej účinnosti [2]

Nízka účinnosť nediskvalifikuje termoelektrinu v nízkovýkonových aplikáciách. Je nevýhodou pri hromadnej výrobe elektrickej energie. Termoelektrické aplikácie využívajúce tepla s vyšším potenciálom sú prijateľné iba v prípadoch, keď neexistujú vhodnejšie spôsoby premien. Naopak, využívanie odpadového tepla o teplotách nižších ako 140 °C konkurencieschopnosť termoelektrickej premeny značne zvyšuje [2].

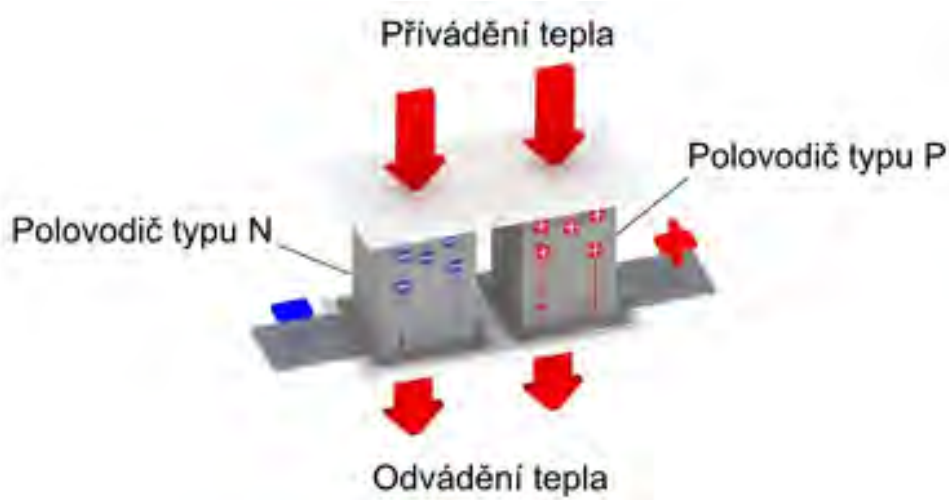


Obrázek 4.2: Účinnosť priemyslovo používaných a laborátorne vyvíjaných termoelektrických materiálov [2]

## 5. Princíp a výroba termoelektrickej energie

### 5.1. Základný princíp fungovania termoelektrického generátoru

Základným konštrukčným prvkom termoelektrických zariadení sú termoelektrické dvojice ako na obr. 5.1 tvorené polovodičovým p-n prechodom. V princípu sa dá ich funkcia popísať nasledovne: Pokiaľ je na p-n prechod privedené teplo, dochádza v polovodičoch k prerozdeleniu majoritných nosičov náboja. V polovodiču typu N dochádza k pohybu elektrónov, v polovodiču typu P k pohybu kladne nabitých dier. Tieto náboje sa nasledovne koncentrujú na chladnejších koncoch polovodičov, medzi ktorými vzniká rozdiel potenciálov. Ak sa uzavrie vytvorený obvod, dochádza k pohybu elektrónov cez prechod a prietoku elektrického prúdu, viď. odstavec 3.1[2].



Obrázek 5.1: Termoelektrická dvojica a vznik Peltierovho javu[2]

### 5.2. Výroba termoelektrickej energie

Pre dosiahnutie väčšieho napätia sú dvojice spojované elektricky do série, z hľadiska prestupu tepla paralelne a tvorí tzv. termoelektrický modul obr.5.2. Geometria modulov môže byť rôzna. Konštrukcia vyobrazená na obr.5.2 je najbežnejším typom priemyslovo dostupných termoelektrických modulov.

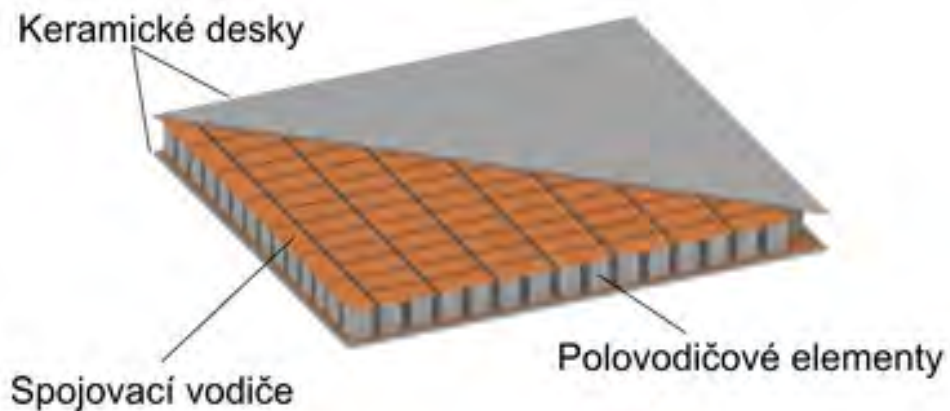
Moduly nemôžu pracovať samostatne. Prívod a odvod tepla zaisťujú výmenníky. V závislosti na typu aplikácie môže byť zdrojom tepla pevná látka, kvapalina alebo plyn. Dominantnou zložkou tepla je kondukcia, konvekcia alebo radiácia. Prechodom tepla skrz termoelektrický modul je generované napätie, po pripojení na záťaž termoelektrický výkon. Vzhľadom k účinnosti termoelektrickej premeny prechádza väčšia časť tepla skrz modul bez úžitku.

Použitie je výhodou hlavne v nízkovýkonových aplikáciách, v ktorých nie je k dispozícii zdroj elektrickej energie alebo je dodávka elektriny nestabilná. Uplatnenie získanej



## 5.2. VÝROBA TERMOELEKTRICKEJ ENERGIE

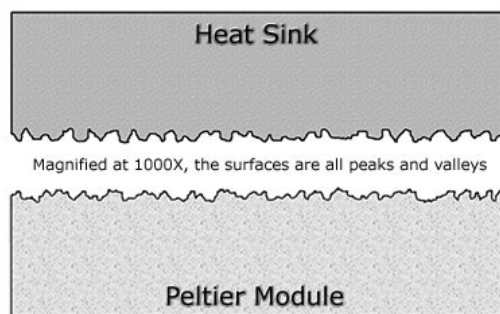
termoelektriny je široké. Výkony bežných termoelektrických generátorov sa pohybujú v rozmedzí miliwattov až desiatok kilowattov. Používajú sa ako miniatúrne zdroje v detektoroch, senzoroch ako prenosné zdroje alebo zdroje autonómnych systémov v priemyslových a vojenských aplikáciách. Zdrojom tepla môže byť napríklad ľudské telo, odpadné teplo chladiach vôd technologických zariadení, spaliny vzniknuté spaľovaním fosílnych palív alebo odpadu, teplo rozpadu rádioaktívnych izotopov alebo iné zdroje[2].



Obrázek 5.2: Termoelektrická dvojica a vznik Peltierovho javu [2]

## 6. Mikroskopický pohľad na styčné plochy

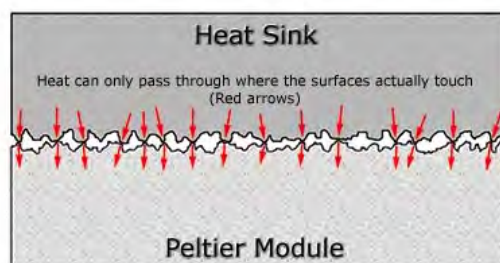
Termoelektrické generátory (TEG) budú produkovať elektrinu len v prípade že na module je dosiahnutý teplotný rozdiel. To znamená že na TEG budeme mať stranu chladnú a stranu teplú. Teplá strana je zvyčajne napojená ku zdroju tepla zatiaľ čo studená strana je pripojená k odvodu tepla, či už za pomoci vzduchu alebo vody. V našom prípade to bude práve pomocou vody za využitia vodného bloku. Je nesmierne dôležité aby sme teplo odvádzali efektívne a zaručili dostatočne nízku teplotu chladnej strany, respektíve dostatočný tepelný rozdiel [6].



### Flat and Smooth Surfaces?

Obrázek 6.1: 1000 násobné zväčšenie styčných plôch

Ako je vidieť na obr.6.1 dva povrchy sa môžu zdať rovné a hladké, no v skutočnosti, pri bližšom pohľade povrchy pozostávajú z malých jamiek a kopcov. Bolo spočítané, že v priemere je v kontakte takéhoto povrchu len 5%. Zvyšných 95% sú medzery, viď obr. 6.2[6].



### Contact without any TIM

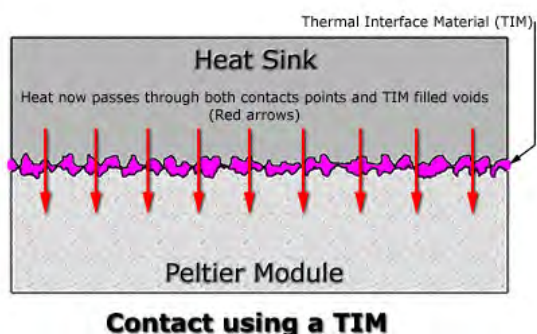
Obrázek 6.2: Kontakt bez materiálu zaisťujúci prestup tepla TIM (Thermal Interface Material)[6]

## 6.1. Zaistenie prestupu tepla

### 6.1.1. Vyrovnanie povrchov

Povrch ktorý chceme použiť ako teplotné rozhranie by mal byť rovný približne  $\pm 0,0025mm$  naprieč celou plochou a hladký  $0,81\mu m$  alebo menej. Na zbavenie sa týchto "jamiek" a "kopcov" je najlepšie leštenie povrchu. Rozhranie musí byť dôkladne očistené po tom čo sme hotový s úpravou povrchu. Taktiež musíme dbať na to, aby sme povrch nechytli holými rukami, kvôli možnému zamasteniu. Preto sa by malo záverečné čistenie urobiť tesne pred záverečnou montážou, a tým minimalizovať risk kontaminácie povrchu [6].

### 6.1.2. Aplikácia teplovodivého materiálu



Obrázek 6.3: Povrchy po aplikácii teplovodivej pasty [6]

Obr.6.3 ukazuje teplotné rozhranie na ktoré bola použitá teplovodivá pasta. Táto pasta (vyobrazená ružovou farbou) je bielej farby. Jej funkcia spočíva v zaplnení jamiek a malých kopcov stlačiteľným materiálom ktorý ma oveľa väčšiu tepelnú vodivosť ako medzera vzduchu. Tým pádom celé rozhranie teraz efektívne prepúšťa teplo, a nie len vrcholy ktoré sú v kontakte.

Ako teplovodivý materiál sa dá použiť taktiež grafitová fólia. Nevýhodou takejto fólie je jej krehkosť a náchylnosť k poškodeniu [6].

## 7. DC/DC meniče

Jednosmerný prúd (direct current - DC) nemožno na rozdiel od striedavého ( alternative current - AC ) transformovať, a tak je potrebné zmeniť veľkosť jeho napätia iným spôsobom . DC/DC meniče premieňajú jednosmerné napätie určitej hodnoty na napätie inej hodnoty . V moderných elektronických systémoch je potreba premieňať napájacie napätie zo zdroja elektrickej energie na napätie o veľkosti, ktorú požaduje cieľový spotrebič . DC/DC meniče tiež môžu regulovať výstupné napätie . Pre využitie TEG-ov v automobilovom priemysle sa väčšinou používajú DC/DC meniče pre zvýšenie napätia generovaného termoelektrickým článkom tak , aby sa dosiahla úroveň napätia , ktorá je vyžadovaná pre rôznu elektroniku automobilu [3].

### 7.1. Princíp DC/DC meničov

Pri návrhu DC/DC meniča sa berú do úvahy dve základné aspekty: účinnosť a regulácia. Problémom účinnosti je potrebné sa zaoberať, pretože každý elektrický okruh má buď priamo odporové zložky, alebo parazitné odpory, ktoré sú po stránke účinnosti náročné pre chod prevodníka. Návrhári týchto meničov potrebujú optimalizovať ich účinnosť, aj keď nemôžu nikdy dosiahnuť 100%. Problém regulácie je spôsobený tým, že žiadny elektrický zdroj nie je úplne konštantný, ale elektronika vyžaduje určitú úroveň stability napájania.

Všeobecným princípom DC/DC meničov je ukladanie elektrickej energie do súčiastok ako sú kondenzátory a induktormi a následné uvoľnenie energie do záťaže. Riadením času pre ukladanie a uvoľňovanie energie môže byť kontrolovaná priemerná úroveň napätia na záťaži. Táto hodnota tak môže byť vyššia alebo nižšia ako napätie elektrického zdroja.

Striedanie stavu ukladanie a uvoľňovanie energie je zabezpečené spínacími zariadeniami. V súčasnosti sa v DC/DC meničoch najčastejšie používa na spínanie tranzistor. Takmer všetky moderné jednosmerné konvertory používajú signál pulznej šírkovej modulácie (pulse-width-modulation - PWM) pre riadenie spínania. PWM má výhodu lineárneho riadenia napájania záťaže. Vypovedujúcim parametrom PWM riadenie je striedka[3].

$$s = \frac{t_{on}}{t} \quad (7.1)$$

$s[1]$	-striedka
$t_{on}[s]$	-doba zapnutia signálu („logická 1“)
$t[s]$	-perióda

### 7.2. Zvyšujúci DC/DC menič LMR61428

Predpokladáme, že pri našej aplikácii bude potrebné použiť zvyšujúci DC/DC menič. Tento predpoklad bude v ďalších kapitolách overený matematickým modelom a meraním.

DC/DC menič jednosmerného prúdu LMR61428 od výrobcu *Texas Instruments* bol nájdený podľa parametrov predovšetkým vstupných a výstupných napätí. Ďalším dôleži-

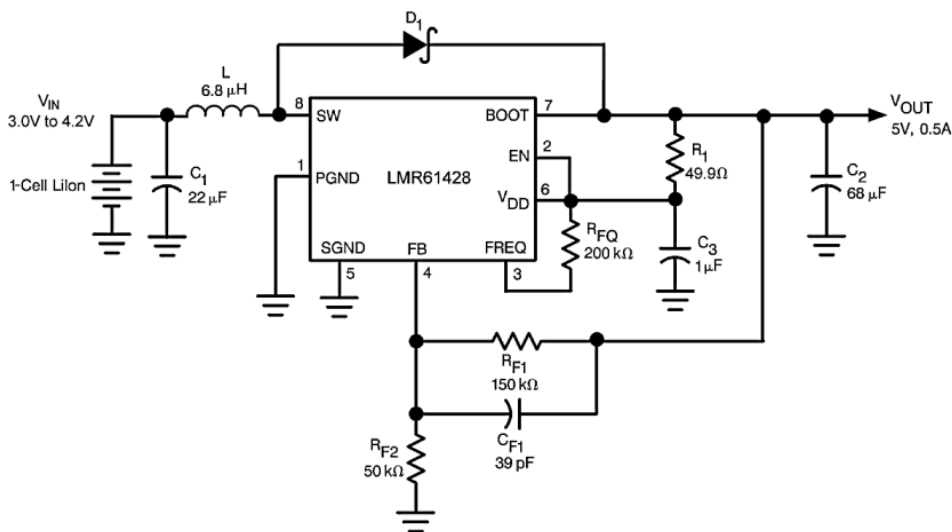
## 7.2. ZVYŠUJÚCI DC/DC MENIČ LMR61428

tým parametrom bol tiež maximálny spínací prúd, ktorý pri nízkom vstupnom napätí a vysokom požiadavku na výkon bude vysoký. Parameter čiže informácia, ktorá je pri tejto aplikácii veľmi dôležitá sa nazýva podľa výrobcu *Special Features : Enable*, tj. že tento zvyšujúci menič napätia obsahuje internú špeciálnu funkciu. Najdôležitejšie parametre tohto obvodu sú vypísané v tab.7.1, pričom zvyšné parametre vrátane rôznych závislostí účinnosti možno vypočítať z datasheetu[3].

Tabuľka 7.1: Parametry zvyšujúceho DC/DC meniča LMR61428 [3]

Parametry LMR61428		
Hodnota	Veličina	Jednotka
Vstupné napätie	1,2-14	V
Výstupné napätie (nastaviteľné) max.	14	V
Spínací prúd max.	2,5	A
Spínacia frekvencia tranzistoru max.	2	MHz
Účinnosť max.	90	%
Púzdro	8VSSOP	

Neoddeliteľnou súčasťou každého takéhoto obvodu jednosmerného meniča musí byť základná schéma zapojenia periférnych elektronických súčiastok. Preto nestačí zaobstarať samotný obvod ako taký, ale pre plnú funkčnosť je potrebné tieto periférne súčiastky vhodne spojiť s obvodom. Na obr.7.2 je znázornené typické zapojenie obvodu LMR61428. Toto zapojenie obsahuje štyri hlavné súčasti zvyšujúceho meniča. Jedná sa o vstupnú cievku, o diódu, o výstupný kondenzátor a poslednou časťou je spínací prvok, ktorý je v tomto prípade obsiahnutý priamo v integrovanom obvode [3].



Obrázek 7.1: Typické zapojenie LMR61428 [3]

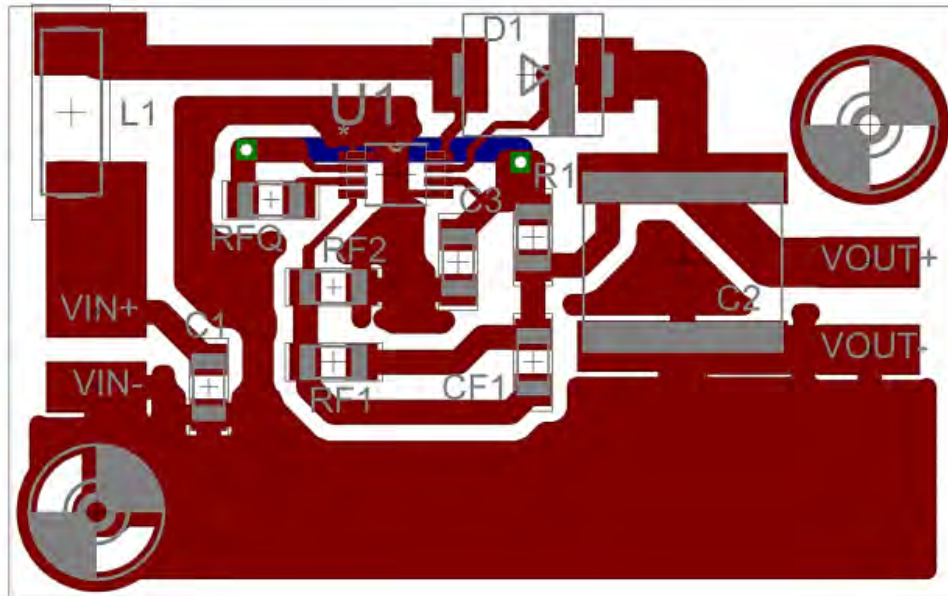
Výstupné napätie možno podľa tab.7.1 upraviť až na hodnotu 14V. Úprava spočíva v nastavení spätnoväzobných rezistorov  $R_{F1}$  a  $R_{F2}$ , respektíve v zmene týchto hodnôt. Odporúčaná hodnota pre rezistor  $R_{F1}$  je podľa technického listu výrobcu  $150k\Omega$ . Pre určenie rezistora  $R_{F2}$  treba dosadiť do vzťahu 7.2 hodnotu požadovaného výstupného napätia a hodnotu rezistora  $R_{F1}$ . Hodnota  $130k\Omega$  pre rezistor  $R_{F1}$  bola úmyselne zvolená tak, aby rezistor  $R_{F2}$  zapadal do odporové radu E24. Výpočet je teda daný vzťahom č.7.2 [3]:

$$R_{F2} = \frac{R_{F1}}{\frac{V_{OUT}}{1,24} - 1} = \frac{130000}{\frac{5}{1,24} - 1} = 42872\Omega \quad (7.2)$$

kde:

$R_{F1}$	$[\Omega]$	-spätnoväzobný rezistor
$R_{F2}$	$[\Omega]$	-spätnoväzobný rezistor
$V_{OUT}$	$[V]$	-žiadané výstupné napätie

Odpor  $42872\Omega$  nebol k dispozícii a bol použitý najbližší možný a to  $39k\Omega$ .



Obrázek 7.2: Pohľad zo strany súčiastok dosky plošného spoja [3]

# 8. Matematický model

## 8.1. Sústava v ustálenom stave

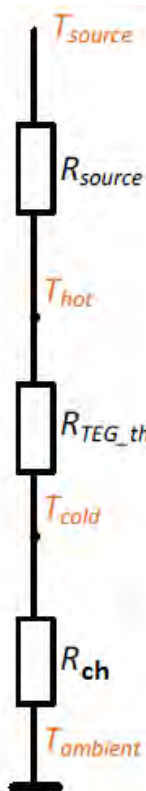
Túto sústavu je možné uvažovať ako sústavu sériovo radených tepelných odporov a k nim paralelne radených tepelnej kapacity, ktoré sa vo výpočte v rovnovážnom stave neuvažujú. U spomínaného merania preto budú rozlišované tieto tepelné odpory[8]:

$R_{SO}$  (source) [ $K \cdot W^{-1}$ ] - tepelný odpor zdroja zložený z tepelného odporu keramikkej dosky TEG článku (prípadne v súčte s odporom inej dosky - napr. medená, ktorá je priložená, aby zabezpečila rovnomerné rozloženie tepla na horúcej strane článku) a tepelného odporu zapríčineného konvekciou pri zahrievaní (teplota na horúcej strane termodyjic nie je rovnaká ako teplota nastavená a vychádzajúca zo zdroja tepla)

$R_{ch}$  [ $K \cdot W^{-1}$ ] - tepelný odpor chladiča

$R_{TEG\_th}$  (thermal) [ $K \cdot W^{-1}$ ] - tepelný odpor TEG článku

Vzhľadom na to, že bude použitá teplovodivá pasta bude v tomto modeli kontaktný tepelný odpor zanedbaný. Na základe tohto rozboru je možné uvažovať usporiadanie na obr.8.1, z ktorého sa bude vychádzať pri zostavovaní matematického modelu.



Obrázek 8.1: Usporiadanie sústavy v počiatočnom (kludovom) stave [8]

Ďalej budeme rozlišovať tieto teploty:

$T_{so}(source)$	[°C; K]	– teplota zdroja
$T_h(hot)$	[°C; K]	– teplota horúcej strany
$T_c(cold)$	[°C; K]	– teplota studenej strany
$T_a(ambient)$	[°C; K]	– teplota okolia

## 8.2. Sústava v priebehu zahrievania a generovania

Ako zdroj tepla je možné uvažovať zdroj konštantného tepelného toku o hodnote  $Q_{so}[W]$  (v analógii s elektronikou : zdroj prúdu) alebo zdroj konštantnej teploty o hodnote  $T_{so}$  (v analógii: zdroj konštantného napätia). Viac bude zmieňovaný zdroj konštantnej teploty, pretože teplota je laickému chápaniu prívetivejšia. ”Ohrievanie alebo chladenie Peltierova článku je fenoménom tepelnej absorpcie/disipácie spojením dvoch rozdielnych materiálov, kedy elektrický prúd preteká naprieč spojením. Absorbované/emitované teplo všetkých termodvojíc článku v miestach  $T_h$  a  $T_c$  určíme [8]:

$$q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I \quad (8.1)$$

$$q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (8.2)$$

kde:

$\alpha[V \cdot K^{-1}]$	Seebeckov koeficient
$I[A]$	generovaný elektrický prúd pretekajúci termodvojicami
$q_c[W]$	teplo absorbované na studenej strane termodvojíc
$q_h[W]$	teplo emitované na teplej strane termodvojíc

Vďaka Seebeckovu javu a vzťahu 3.3 je možné určiť smery týchto tepelných tokov. Pri generovaní elektrickej energie z tepla je na horúcej strane tepelný tok o hodnote  $q_h$  odvádzaný a na studenej strane je tok  $q_c$  privádzaný. V TEG článku sa začne tokom elektrického prúdu generovať tiež stratové Joulovo teplo, ozn.  $q_j [W]$ , ktorého hodnotu určíme pomocou vzťahu[8]:

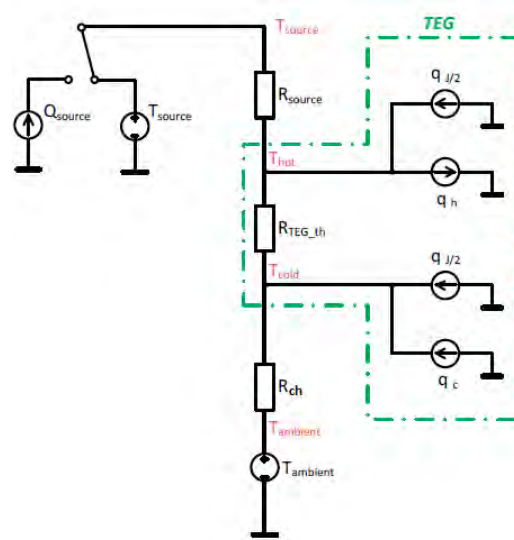
$$q_j = R_{TEG-e} \cdot I^2 \quad (8.3)$$

Ak tento zdroj tepelného toku vystupuje uprostred článku TEG, je potrebné do modelu uvažovať, že má rovnomerný vplyv na horúcu aj studenú stranu, a tak bude zapracovaný rozdelený na dve polovice. Potom do uzla  $T_h$  a  $T_c$  sa pripojí zdroj tepelného toku hodnoty[8]:

$$q_{J/2} = \frac{q_j}{2} = \frac{1}{2} \cdot R_{TEG-e} \cdot I^2 \quad (8.4)$$



### 8.3. ZOSTAVENIE MATEMATICKÉHO MODELU



Obrázek 8.2: Tepelná sústava pri generovaní v ustálenom stave [8]

## 8.3. Zostavenie matematického modelu

### 8.3.1. Tepelné rovnice

Analógiu z ohmovho zákona a Kirchhoffových zákonov je možné využiť aj v tepelnej sústave.

Ohmov zákon

$$U = R \cdot I \quad (8.5)$$

kde

$U$	[W]	elektické napätia
$R$	[ $\Omega$ ]	elektrický odpor
$I$	[A]	elektrický prúd

Ohmov zákon sa dá previesť do tepelnej sústavy nasledovne

$$\Delta T = R_{\vartheta} \cdot q \quad (8.6)$$

$\Delta T$	[ $^{\circ}\text{C}$ ; K]	rozdiel teplôt
$R_{\vartheta}$	[ $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]	tepelný odpor
$q$	[W]	tepelný tok

Z tohto vzťahu sa určí hodnota  $q_{so}$

$$q_{so} = \frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} \quad (8.7)$$

Kirchhoffove zákony možno previesť do tepelnej sústavy nasledujúcim spôsobom:

1. súčet tepelných tokov (prúdové veličiny) vstupujúcich do uzla sa rovná súčtu tepelných tokov z uzla vystupujúcich

2. algebraický súčet rozdielov teplôt (rozdielové veličiny) pri priechode ľubovoľnou uzavretou slučkou je nulový

Prakticky bude využitý iba prvý zákon na zostavenie nasledujúcich prietokových rovníc v jednotlivých uzloch podľa obr.8.2[8]:

$$\frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} + \frac{1}{2} \cdot R_{TEG\_th} \cdot I^2 - \alpha \cdot T_h \cdot I = 0 \quad (8.8)$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} + \frac{1}{2} \cdot R_{TEG\_th} \cdot I^2 + \alpha \cdot T_h \cdot I = 0 \quad (8.9)$$

### 8.3.2. Elektrická rovnica

Na výpočet prúdu pretekajúcim obvodom pri záťaži  $R_{load}$  sa zavedie rovnica 8.10 [8]:

$$\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) = (R_{TEG\_th} + R_{load}) \cdot I^2 \quad (8.10)$$

## 8.4. Riešenie rovníc v programe Mathcad

Tepelný tok  $Q_{so}$  závisí na počtu použitých sviečok. V našom matematickom modeli budeme predpokladať, že sa nám podarí sviečkami vyprodukovať tepelný tok  $Q_{so} = 72W$ . Ďalej teplota  $T_a = 20^\circ C$  a zvyšné parametre sú uvedené v datasheete pre nami zvolený termoelektrický článok TEG 127-230-32 od výrobcu *thermalforce.de*.

Na riešenie nelineárnych rovníc č.8.8; 8.9;8.10 za neznáme  $T_h$ ,  $T_c$ ,  $I$ , bude potrebné si výpočet mierne zjednodušiť. Keďže ešte nepoznáme hodnotu prúdu, rovnice zjednodušíme o tepelné toky  $q_{J/2}$ ,  $q_h$ ,  $q_c$

Do už zjednodušenej rovnice 8.8 dosadíme rovnicu 8.7 a získame:

$$Q_{so} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} = 0 \quad (8.11)$$

Ďalej zjednodušená rovnica 8.9 bude mať tvar:

$$\frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} = 0 \quad (8.12)$$

Takže máme jednoduchšiu sústavu troch rovníc o troch neznámych:

$$Q_{so} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} = 0$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} = 0$$

$$\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) = (R_{TEG\_th} + R_{load}) \cdot I^2$$

## 8.4. RIEŠENIE ROVNÍC V PROGRAME MATHCAD

Riešením tejto sústavy dostávame hrubý odhad teplôt  $T_h$ ,  $T_c$  a prúdu  $I$ .

Táto chyba hrubého odhadu sa odstráni iteračnom výpočtom, tzn. opakovaním výpočtu, kým rozdiel stávajúcej a novo vypočítanej hodnoty elektrického prúdu nebude dostatočne zanedbateľný. Jedna z možností iteračného riešenia je metóda pólenia intervalov. Pri tomto spôsobe sa za elektrický prúd vstupujúci do výpočtu volí vždy aritmetický priemer elektrických prúdov vypočítaných z elektrického a tepelného rozboru. Výpočet je potreba opakovať až kým sa nedosiahne požadovanej presnosti.[8]

Keďže už máme počiatočný odhad, ďalej sa bude používať sústava rovníc 8.8; 8.9;8.10:

$$\begin{aligned} \frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG.th}} + \frac{1}{2} \cdot R_{TEG.th} \cdot I^2 - \alpha \cdot T_h \cdot I &= 0 \\ \frac{T_h - T_c}{R_{TEG.th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} + \frac{1}{2} \cdot R_{TEG.th} \cdot I^2 + \alpha \cdot T_h \cdot I &= 0 \\ \alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) &= (R_{TEG.th} + R_{load}) \cdot I^2 \end{aligned}$$

Z týchto rovníc (po dosadení odhadnutej hodnoty prúdu z predchodej sústavy) dostaneme nové hodnoty teplôt  $T_{h2}$ ,  $T_{c2}$  a prúdu  $I_2$ . Pri ďalšej iterácii do výpočtu namiesto  $I_2$  vstupuje aritmetický priemer tejto hodnoty a predchádzajúcej a to:

$$I_{12} = \frac{I + I_2}{2} \quad (8.13)$$

- $I$  [A] – prvotný odhad elektrického prúdu
- $I_2$  [A] – elektrický prúd získaný iteračným výpočtom
- $I_{12}$  [A] – aritmetický priemer stávajúcej a novej hodnoty prúdu

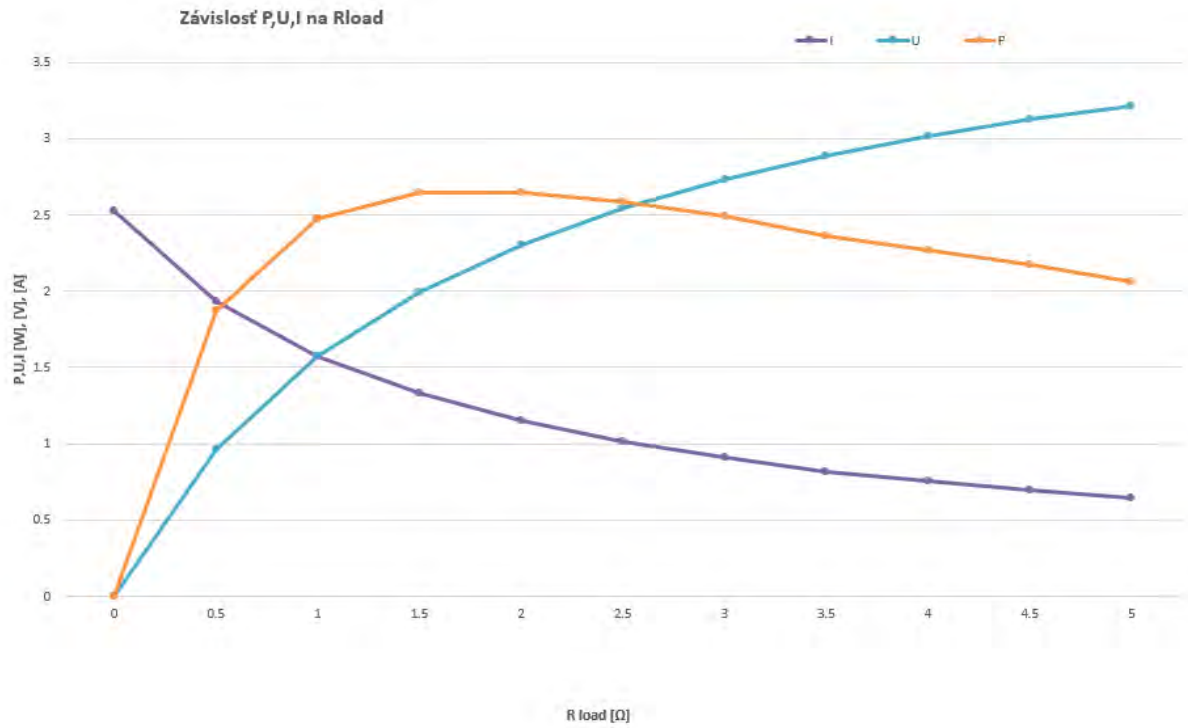
Výpočet sa opakuje až po dosiahnutí požadovanej presnosti. Algoritmus v programe Mathcad je priložený v prílohe č.1. Tento výpočet je počítaný pre  $Q_{so} = 72W$  a  $R_{load} = 1.5\Omega$  čiže záťaž pri ktorej je výkon maximálny ako ukazuje obr.8.3. V tomto modeli je zahrnutý taktiež výpočet výstupného napätia TEG-u. Následne je vypočítaný elektrický výkon:

$$P = U \cdot I \quad (8.14)$$

kde

- P [W] elektrický výkon
- U [V] elektrické napätie
- I [A] elektrický prúd

Z matematického modelu je vykreslený nasledujúci graf:



Obrázek 8.3: Graf závislosti výkonu P, napätia U a prúdu I na odporu záťaže  $R_{load}$

Z grafu je vidieť, že maximálny výkon dostávame pri hodnote  $R_{load} = 1.5\Omega$  čo je zároveň hodnota elektrického odporu  $R_{TEG-e}$  nami zvoleného TEG-u 127-230-32 od výrobcu *thermalforce.de*.

## 9. Realizácia TEG

Ako vyplýva z matematického modelu, čím väčší tepelný tok vyprodukuje naša sviečka, tým väčšieho tepelného rozdielu sa nám podarí dosiahnuť, a z toho vyplýva vyšší výkon. Samozrejme musíme dbať na to, aby sme nepresiahli maximálnu dovolenú teplotu, ktorá predstavuje  $230^{\circ}\text{C}$  pre náš zvolený termoelektrický článok TEG 127-230-32 od výrobcu *thermalforce.de*. Ďalej je potrebné zaistiť dostatočné chladenie, v našom matematickom modeli účinnosť chladenia predstavuje člen  $R_{ch}$ , ktorý je funkciou prietoku vody chladičom, respektíve čím vyšší je prietok vody chladičom tým má menší tepelný odpor.

Ďalej táto hodnota závisí od materiálu a geometrii chladiča. Tieto chladiče sa často vyrábajú z kovov ako hliník a meď, ktoré majú nízky tepelný odpor. Meď má na rozdiel od hliníku lepšiu tepelnú vodivosť, no nevýhodou je vyššia hmotnosť. Pri našom návrhu sú rozmery relatívne malé, takže hmotnosť nebude hrať veľkú rolu. Preto sme sa rozhodli pre medený chladič CL-W0083 od výrobcu *Thermaltake*.

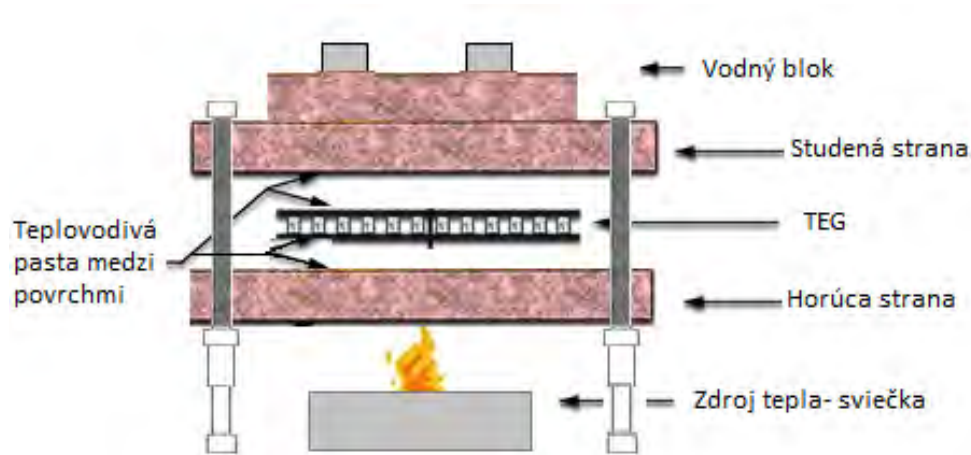


Obrázek 9.1: Medený vodný chladič Thermaltake CL-W0083



Obrázek 9.2: Chladič spájaný s medeným kvádom

Vzhľadom na to že tento chladič má rozmery 37mm (dĺžka) x 37 mm (šírka) x 20mm (výška) a náš termoelektrický článok rozmery 40x40 mm musíme ku chladičku pripojiť medenú dosku širokú a dlhú 40 mm.

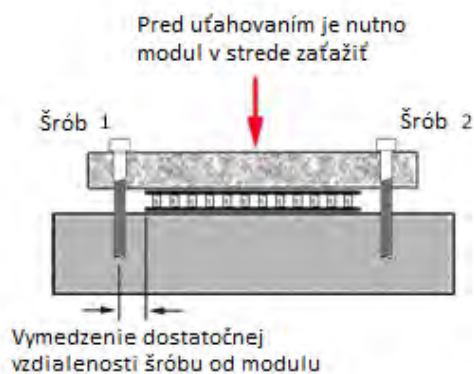


Obrázek 9.3: Návrh termoelektrického generátoru

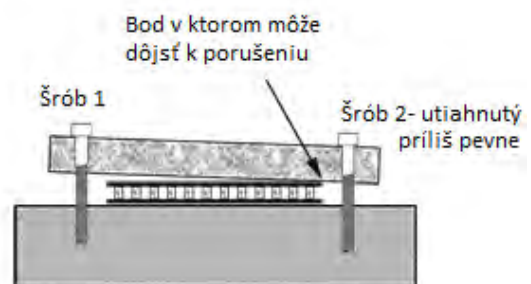
Tento návrh vznikol s úmyslom zostrojiť toto zariadenie čo možno najmenšie a najkompaktnejšie, s relatívne nízkou hmotnosťou a dobrou prenosnosťou.

## 9.1. Montáž

Povrchy styčných plôch medených kvádrov sú relatívne hladké a rovné takže ďalšie brúsenie a leštenie nebude potrebné. Na termoelektrický článok je nanosená termálna pasta, vid'(zaistenie prestupu tepla) a následne je stlačený medzi medený kváder s chladičom a ďalší medený kváder za použitia štyroch šróbov ktoré boli rovnomerne dotiahnuté. Je dôležité si dať pozor na to, aby bol tlak rovnomerne rozložený inak hrozí poškodenie článku.



Obrázek 9.4: Správny spôsob uťahovania šróbov [6]



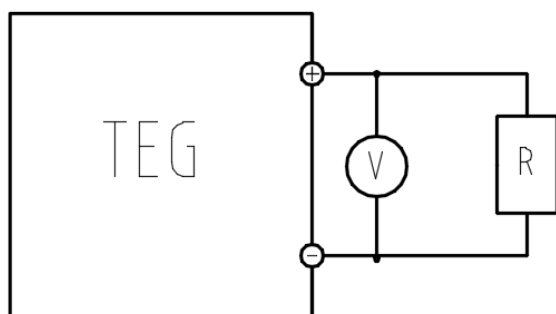
Obrázek 9.5: Nebezpečie poškodenia pri uťahovaní [6]



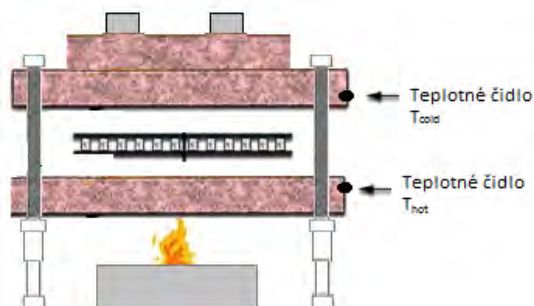
Obrázek 9.6: Termoelektrický generátor po montáži

## 9.2. Merania

Vzhľadom na to, že náš termoelektrický článok má maximálny výkon pre  $R_{load} = R_{tege} = 1,54\Omega$ , bol použitý resistor s odporom  $1\Omega$  čiže hodnota relatívne blízka  $R_{tege}$ .



Obrázek 9.7: Schéma zapojenia



Obrázek 9.8: Umiestnenie tepelných čidiel

Tentokrát je použitá sviečka s tromi knôtmi pre vyšší tepelný tok. Prehriatie nehrozilo keďže vodné chladienie bolo dostatočne účinné a teplota horúcej strany nepresahovala  $65^{\circ}\text{C}$ . Po ustálení teplôt boli namerané nasledovné hodnoty:

$$T_{hot} = 62^{\circ}\text{C} \quad T_{cold} = 37^{\circ}\text{C} \quad U = 1.6\text{V} \quad \Delta T = 25^{\circ}\text{C}$$

Z matematického modelu sa dá spočítať, že pri tomto rozdieli teplôt nedosiahneme hodnotu napätia  $1,6\text{V}$ . Vzhľadom na to, že teplotné čidlá boli pripevnené zo strany TEG-u ako je znázornené na obrázku 9.8, boli skutočné teploty rozdielne. Z rovníc matematického modelu sa dá spočítať, že pri hodnote  $U = 1,6\text{V}$  musí byť skutočný rozdiel teplôt okolo  $45^{\circ}\text{C}$ .

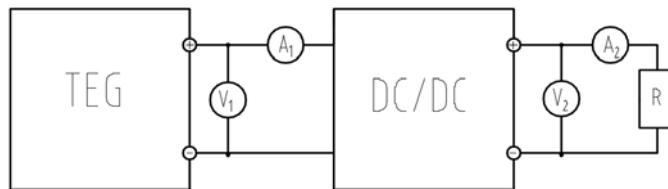
### 9.3. Nastavenie DC/DC meniča

Na nabíjanie mobilného telefónu potrebujeme stálu hodnotu výstupného napätia, a to približne 5V. Nameraná hodnota 1,6V potvrdzuje že je potrebný zvyšujúci menič. DC/DC menič LMR61428 ktorý už bol spomínaný v odstavci.7.2, je potrebné nastaviť zmenou odporu  $R_{F2}$  podľa rovnice 7.2 [3].

Vzhľadom na to, že rezistor s hodnotou odporu  $42872k\Omega$  nebol k dispozícii, bol zvolený najbližší možný, a to  $39k\Omega$ . Po výmene odporu  $R_{F2}$  a následného zapojenia meniča do obvodu s TEG-om, bolo na výstupe namerané napätie (bez záťaže) 5,34V

### 9.4. Meranie so zapojeným DC/DC meničom

Meranie bolo zrealizované podľa zapojenia na obr.9.5.1. Odpor R budeme meniť za odpor  $R_1, R_2, R_3$ .



Obrázek 9.9: Schéma zapojenia s DC/DC meničom

Namerané hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabulke.

Tabulka 9.1: Meranie so zapojeným DC/DC meničom

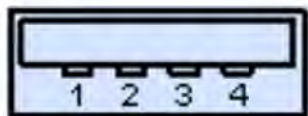
č.merania	U1 [V]	A1 [A]	U2 [V]	A2 [A]	t [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	R1=6.3
1	1.1	0.63	1.75	0.23	1	68	50	
2	1.24	0.75	1.93	0.3	2.5	80	58	
3	1.3	0.8	2.06	0.314	4	85	60	
4	1.3	0.8	2.09	0.31	6	87	62	
č.merania	U1 [V]	A1 [A]	U2 [V]	A2 [A]	t [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	R2=15
1	1	0.35	2.1	0.13	0.5	60	45	
2	1.2	0.43	2.4	0.16	3	63	46	
3	1.3	0.55	2.85	0.186	4	75	51	
4	1.4	0.57	3	0.19	5.5	79	55	
č.merania	U1 [V]	A1 [A]	U2 [V]	A2 [A]	t [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	R3=10
1	1	0.36	1.7	0.15	2	62	47	
2	1.07	0.4	1.85	0.15	3.5	65	47	
3	1.1	0.42	1.92	0.186	5	65	48	
4	1.15	0.47	2.06	0.19	8	64	46	



## 9.5. NABÍJANIE MOBILNÉHO ZARIADENIA

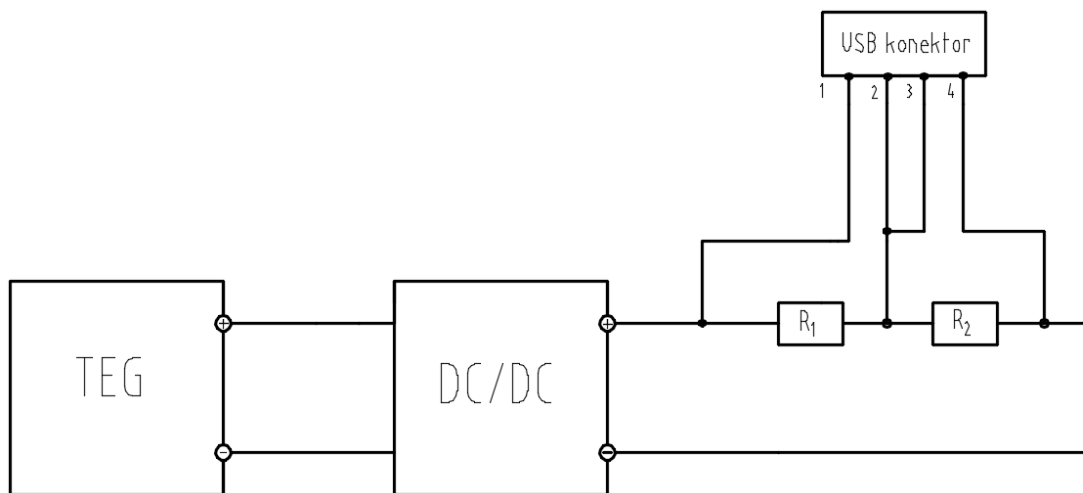
Z merania vyplýva, že pre nami zvolené hodnoty  $R_{load}$  dostávame veľmi nízke hodnoty napätia. Aby sme dosiahli napätia aspoň  $5V$  bude potreba vyššieho odporu záťaže.

### 9.5. Nabíjanie mobilného zariadenia



Obrázek 9.10: USB konektor typu A[1]

Aby bolo možné nabíjať telefón pomocou USB konektoru, je potrebné do obvodu pridať napäťový rozvádzač podľa schémy na obr.9.11. Tento rozvádzač slúži k tomu, aby sme na dátových linkách - linky č.2 a č.3, dosiahli napätia  $2V$  a na linkách č.1 a č.4 napätia  $5V$ .



Obrázek 9.11: Schéma zapojenia USB konektoru

Ak označíme napätie na výstupe DC/DC meniča  $U_1$  a napätie na rezistore  $R_2$  označíme ako  $U_2$  tak potom podľa Ohmovho zákona platí

$$U_1 = (R_1 + R_2) \cdot I \quad (9.1)$$

$$U_2 = R_2 \cdot I \quad (9.2)$$

Z toho plynie:

$$I = \frac{U_2}{R_2} \quad (9.3)$$

$$U_1 = (R_1 + R_2) \cdot \frac{U_2}{R_2} \quad (9.4)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (9.5)$$

Pretože  $U_2$  je napätie na datových linkách a  $U_1$  napätie na výstupe DC/DC meniča dosadíme :

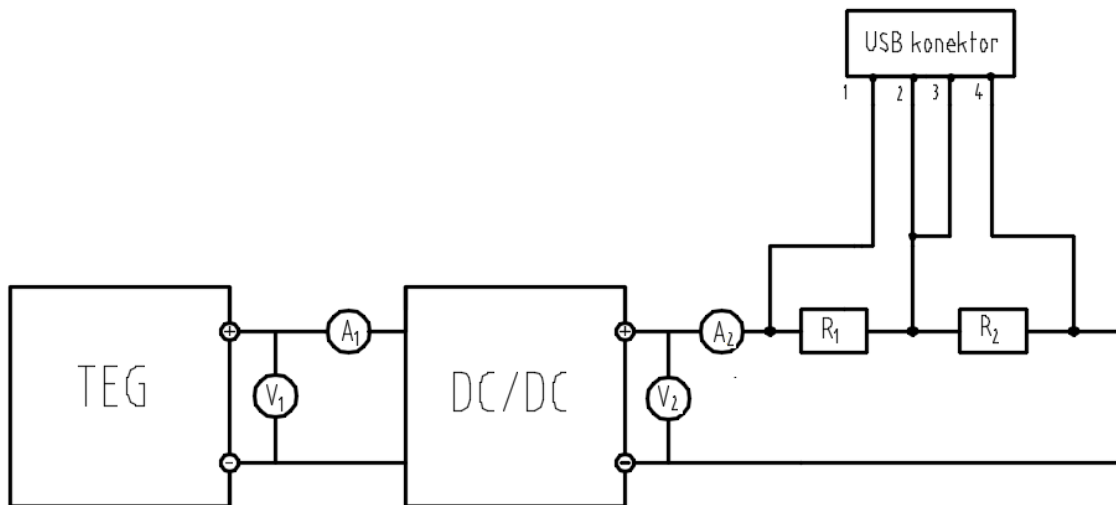
$$\frac{5}{2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (9.6)$$

$$1,5 \cdot R_2 = R_1 \quad (9.7)$$

Táto rovnica približne platí pre  $R_1 = 3,54k\Omega$  a  $R_2 = 2,16k\Omega$ . Odpor  $R_1$  bol dosiahnutý sériovým zapojením niekoľkých menších odporov. Po zapojení tohto obvodu bolo dosiahnuté požadovaných napätí a úspešne podarilo nabíjať mobilný telefón.

### 9.5.1. Meranie počas nabíjania

Nasledujúce meranie bolo zrealizované počas nabíjania mobilného telefónu iPhone 6. Teplota okolitého vzduchu bola  $23^\circ\text{C}$  a TEG bol chladený studenou vodou z vodovodného kohútika.



Obrázek 9.12: Schéma zapojenia USB konektoru

Namerané hodnoty:

Tabulka 9.2:

číslo merania	U1 [V]	A1 [A]	U2 [V]	A2 [A]	P[W]
1	1.6	0.086	4.4	1.2	5.28
2	1.7	0.093	4.7	1.2	5.64
3	2	0.1	5	0.02	0.1
4	1.72	0.085	4	0.023	0.092

Pri meraní číslo 3 bola dosiahnutá účinnosť meniča 50% a u merania č.4 63%. Tieto účinnosti sú veľmi nízke a podľa tab.7.1 by sa mali pohybovať okolo 90%. Táto hodnota sa ale nepodarila namerať. Pri meraní 1 a 2 pravdepodobne nastala chyba na ampérmetru  $A_2$  keďže dosiahnutá účinnosť meniča by bola vyššia než 100%. Meranie prebiehalo za

## 9.5. NABÍJANIE MOBILNÉHO ZARIADENIA

použitia troch knotov sviečky, ktorých plameň sa nedotýkal spodku TEG-u a horel slabo, čo by mohla byť jedna z príčin namerania nízkych hodnôt. Každopádne aj v tomto prípade sa podarilo mobilný telefón nabíjať no pomalšie než by bolo žiadané. Pri použití silnejších sviečok alebo kahanu by sa dali hodnoty prúdu zlepšiť.



Obrázek 9.13: Ukážka pracoviska počas testovania

## 10. Záver

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť a postaviť termoelektrický generátor pre nabíjanie mobilného zariadenia.

Časť práce pojednávala predovšetkým o teórii termoelektrických javov, materiáloch termoelektrických modulov, zaistení prestupu tepla a princípe DC/DC meničov.

Ďalej bol vytvorený matematický model, na základe ktorého sa dal vyvodiť predpoklad výkonu generátoru.

Posledná časť sa zaoberá samotnou realizáciou tohto zariadenia a následným testovaním. Stavba zariadenia ako aj jeho testovanie dopadlo v poriadku. Vďaka DC/DC meniču bolo regulované napätie na maximálnu hodnotu 5V. Dosiahnuť túto hodnotu sa dalo relatívne ľahko za použitia výkonnejších sviec, respektíve viacerými knôtmi – a to aspoň troma a viac. Testovanie trvalo približne 30 minút a počas celej doby sa telefón nabíjal, čo svedčí o tom, že sa podarilo dosiahnuť dostatočného výkonu aj po prehriatí celej sústavy. Rýchlosť nabíjania činila u mobilného telefónu iPhone 6 približne 1% batérie za 15 až 20 minút.

Všetky ciele tejto práce boli splnené. Zariadenie by bolo možné ešte ďalej zdokonaľiť a to napríklad vyriešením problému s častým dolievaním vody do zásobníku a to približne jedno doplnenie každé 3 až 5 minút a taktiež zaistením spoľahlivejšieho zdroja tepla. Zdroj tepla by sa dal nahradiť napríklad liehovým kahanom.

# Literatura

- [1] Connectors. Beyond Logic. [online]. 17.9.2010 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.beyondlogic.org/usbnutshell/usb2.shtml>
- [2] Kogenerace. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla . [online]. 12.8.2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickyh-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [3] LAGA, O. Využití termoelektrického generátoru pro zvýšení využití odpadního tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..
- [4] LOKAJ, J. Termoelektrický generátor malého výkonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.
- [5] MASTBERGEN, Dan. Development and optimization of a stove-powered thermoelectric generator. Colorado State Universty: UMI Dissertation Publishing, 2008.
- [6] Power Generator (Seebeck) Module Installation. Custom Thermoelectric [online]. 2009 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.customthermoelectric.com/TEG\\_install.html](http://www.customthermoelectric.com/TEG_install.html)
- [7] ROWE, David Michael. CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton, FL: CRC Press, c1995. ISBN 0849301467.
- [8] ŠTETINA, J. Termoelektrický generátor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

# 11. Zoznam použitých skratiek a symbolov

$\alpha$	$[V \cdot K^{-1}]$	– Seebeckov koeficient
$\alpha_p$	$[V \cdot K^{-1}]$	– Seebeckov koeficient materiálu typu P
$\alpha_n$	$[V \cdot K^{-1}]$	– Seebeckov koeficient materiálu typu N
$I$	$[A]$	– elektrický prúd
$I_2$	$[A]$	– elektrický prúd získaný iteračným výpočtom
$I_{12}$	$[W]$	– aritmetický priemer stávajúcej a novej hodnoty prúdu
$\lambda$	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	– tepelná vodivosť
$q_c$	$[W]$	– teplo absorbované na studenej strane termodvojíc
$q_h$	$[W]$	– teplo emitované na teplej strane termodvojíc
$q_J$	$[W]$	– Joulovo teplo
$q_{J/2}$	$[W]$	– Joulovo teplo rozdelené na každú stranu TEG článku
$Q$	$[W]$	– teplo vznikajúce/zanikajúce na spoji vodičov
$q$	$[W]$	– tepelný tok
$Q_{so}(source)$	$[W]$	– tepelný tok zdroja
$P$	$[W]$	– elektrický výkon
$\Pi_{pn}$	$[V \cdot K^{-1}]$	– Peltierov koeficient termočlánku
$R; R_i$	$[\Omega]$	– elektrický odpor
$R_{F1}$	$[\Omega]$	– spätnoväzobný rezistor
$R_{F2}$	$[\Omega]$	– spätnoväzobný rezistor
$R_{load}$	$[\Omega]$	– elektrický odpor záťaže
$R_{TEG_e}$	$[\Omega]$	– elektrický odpor TEG článku
$R_{TEG_{th}}$	$[K \cdot W^{-1}]$	– tepelý odpor článku
$R_{ch}$	$[K \cdot W^{-1}]$	– tepelý odpor chladiča
$R_{\theta}$	$[K \cdot W^{-1}]$	– tepelý odpor
$s$	$[1]$	– striedka
$t$	$[s]$	– perióda
$t_{on}$	$[s]$	– doba zapnutia signálu („logická 1“)
$T_{so}(source)$	$[^{\circ}C; K]$	– teplota zdroja
$T_h(hot)$	$[^{\circ}C; K]$	– teplota horúcej strany
$T_c(cold)$	$[^{\circ}C; K]$	– teplota studenej strany
$T_a(ambient)$	$[^{\circ}C; K]$	– teplota okolia
$\Delta T$	$[^{\circ}C; K]$	– rozdiel teplôt
$U_0$	$[V]$	– elektromotorické napätie naprázdno
$Z$	$[1]$	– koeficient termoelektrické účinnosti – merit

# PRÍLOHA č.1

## Vstupné parametry

$$R_{\text{teg}_e} := 1.54$$

$$R_{\text{ch}} := 0.067$$

$$R_{\text{teg}_{th}} := 1.176$$

$$Q_{\text{so}} := 72$$

$$\alpha := 0.052$$

$$R_{\text{load}} := 1.54$$

$$T_a := 20$$

Given

$$Q_{\text{so}} - \frac{T_h - T_c}{R_{\text{teg}_{th}}} = 0$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{\text{teg}_{th}}} - \frac{T_c - T_a}{R_{\text{ch}}} = 0$$

$$\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) = (R_{\text{teg}_e} + R_{\text{load}}) \cdot I^2$$

$$\text{ans} := \text{Find}(T_h, T_c, I) \rightarrow \begin{pmatrix} 109.496 & 109.496 \\ 24.824 & 24.824 \\ 0 & 1.42952727272727273 \end{pmatrix}$$

$$\text{ans} = \begin{pmatrix} 109.496 & 109.496 \\ 24.824 & 24.824 \\ 0 & 1.43 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T_h \\ T_c \\ I \end{pmatrix} := \text{ans}^{(1)} = \begin{pmatrix} 109.496 \\ 24.824 \\ 1.43 \end{pmatrix}$$

$$T_h = 109.496 \quad T_c = 24.824$$

$$\Delta T_1 := T_h - T_c = 84.672$$

$$I = 1.43$$

Given

$$Q_{so} - \frac{T_h - T_c}{R_{teg\_th}} + \frac{1}{2} \cdot R_{teg\_e} \cdot I^2 - \alpha \cdot T_h \cdot I = 0$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{teg\_th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} + \frac{1}{2} \cdot R_{teg\_e} \cdot I^2 + \alpha \cdot T_c \cdot I = 0$$

$$\begin{pmatrix} T_{h2} \\ T_{c2} \end{pmatrix} := \text{Find}(T_h, T_c) \rightarrow \begin{pmatrix} 102.23379523329114556 \\ 24.648441545047354041 \end{pmatrix}$$

$$\Delta T_2 := T_{h2} - T_{c2} = 77.585$$

Given

$$\alpha \cdot I_2 \cdot (\Delta T_2) = (R_{teg\_e} + R_{load}) \cdot I_2^2$$

$$\text{ans}_2 := \text{Find}(I_2) \rightarrow (0 \ 1.3098825947365836364) = (0 \ 1.31)$$

$$I_2 := \text{ans}_2^{(1)} = (1.31)$$

$$I = 1.43$$

$$I_2 = (1.31)$$

$$I_{12} := \frac{I + I_2}{2} = (1.37)$$

Given

$$Q_{so} - \frac{T_h - T_c}{R_{teg\_th}} + \frac{1}{2} \cdot R_{teg\_e} \cdot I_{12}^2 - \alpha \cdot T_h \cdot I_{12} = 0$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{teg\_th}} - \frac{T_c - T_a}{R_{ch}} + \frac{1}{2} \cdot R_{teg\_e} \cdot I_{12}^2 + \alpha \cdot T_c \cdot I_{12} = 0$$

$$\begin{pmatrix} T_{h3} \\ T_{c3} \end{pmatrix} := \text{Find}(T_h, T_c) = \begin{pmatrix} 102.437 \\ 24.646 \end{pmatrix}$$



$$\Delta T_3 := T_{h3} - T_{c3} = 77.791$$

Given

$$\alpha \cdot I_3 \cdot (\Delta T_3) = (R_{\text{teg}_e} + R_{\text{load}}) \cdot I_3^2$$

$$\text{ans}_3 := \text{Find}(I_3) \rightarrow (0 \ 1.313349336367316013) = (0 \ 1.313)$$

$$I_3 := \text{ans}_3^{(1)} = (1.313)$$

$$I_2 = (1.31)$$

$$I_3 = (1.313)$$

$$T_{h3} = 102.437$$

$$U_{0c} := \alpha \cdot (T_{h3} - T_{c3}) = 4.045$$

$$T_{c3} = 24.646$$

$$U := U_{0c} - R_{\text{teg}_e} \cdot I_3 = (2.023)$$

$$\Delta T_3 = 77.791$$

$$P_e := U \cdot I_3 = 2.656$$

$$\frac{P_e}{Q_{so}} \cdot 100 = 3.689$$