

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY A JEJICH VYUŽITÍ VE SPOJENÍ S
OBNOVITELNÝMI ZDROJI ENERGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BAJGL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Tomáš Bajgl

ID: 154672

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Termoelektrické generátory a jejich využití ve spojení s obnovitelnými zdroji energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Práce je zaměřena na možnosti přeměny tepelné energie na elektrickou pomocí termoelektrických generátorů. Jelikož se na trhu již tyto systémy hojně vyskytují, student by měl provést rešerši aktuální nabídky a zhodnotit potenciál těchto zdrojů. Dále by se měl zaměřit na možnosti propojení s obnovitelnými zdroji energie.

- princip termoelektrického generátoru a popis konstrukcí
- parametry současně nabízených systémů
- návrh malého termoelektrického generátoru
- realizace generátoru využívajícího obnovitelný zdroj energie

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

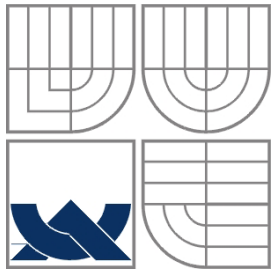
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

BAJGL, T. *Termoelektrické generátory a jejich využití ve spojení s obnovitelnými zdroji energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Termoelektrické generátory a jejich využití ve spojení s obnovitelnými zdroji energie

Tomáš Bajgl

vedoucí: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering



Bachelor's Thesis

Thermoelectric generators and their use with renewable energy sources

by

Tomáš Bajgl

Supervisor: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D

Brno University of Technology, 2015

Brno

Abstrakt

Tato práce se zabývá principem přeměny tepelné energie na elektrickou pomocí termoelektrického generátoru. Práce je členěna na teoretickou a praktickou část a experimentální měření. V teoretické části jsou popsány jednotlivé termoelektrické jevy, vlastnosti jednotlivých materiálů používaných pro výrobu, jejich elektrické vlastnosti a konstrukce. Dále je zde pozornost věnována v současnosti nabízeným systémům. V praktické části je pak obsažen návrh zařízení pro nabíjení mobilního telefonu pomocí termoelektrických generátorů a následuje zpracování naměřených hodnot.

Klíčová slova: Termoelektrický generátor; Zdroj elektrické energie; Seebeckův efekt; Peltierův článek; TEG;

Abstract

This work revolves around the principle of thermoenergy transforming into electrical energy by using a thermoelectrical generator. It is divided into these sections – theoretical, practical and experimental measurement. In the theoretical section, each thermoelectrical phenomenon is described, the properties of various materials used for production are listed, including their electrical properties and constructions. Then the attention switches to the currently available systems. The practical section includes a design for a device, which purpose is to recharge a mobile phone by using thermoelectric generators, and that section is followed by the elaboration of the measured values.

Keywords: Thermoelectric generátor, power source, Seebeck effect, Peltier, TEG

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1. ÚVOD.....	14
2. TERMOELEKTRICKÉ JEVY	15
2.1 TERMOELEKTRICKÝ ČLÁNEK	15
2.2 SEEBECKŮV JEV	15
2.3 PELTIERŮV JEV	16
2.4 THOMSONŮV JEV.....	17
2.5 KELVINOVY VZTAHY	17
3. TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	18
3.1 TEPELNÁ VODIVOST POLOVODIČŮ	20
3.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST POLOVODIČŮ.....	20
3.3 SEEBECKŮV KOEFICIENT.....	22
3.4 MERIT	22
4. PELTIEROVY ČLÁNKY	24
4.1 KONSTRUKCE	24
4.1.1 KASKÁDOVÉ ČLÁNKY	25
4.2 PARAMETRY	26
4.2.1 CHLADÍCÍ FAKTOR	26
4.3 VÝKON	28
4.4 ÚČINNOST	30
4.5 POUŽITÍ.....	31
4.5.1 KOTLE MALÝCH VÝKONŮ	32
4.5.2 CHLAZENÍ	32
4.5.3 SENZORY.....	33
4.5.4 ENERGY HARVESTING	33
4.5.5 BIOMEDICÍNSKÁ ZAŘÍZENÍ.....	35
4.5.6 GENERÁTORY V AUTOMOBILECH	36
4.6 ZPŮSOBY MONTÁŽE	36
4.7 ŽIVOTNOST	37
4.8 VÝROBCI.....	37
5. DC/DC MĚNIČE.....	38
6. NÁVRH ZAŘÍZENÍ	40
6.1 VÝBĚR TEG ČLÁNKU.....	40
6.2 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	41
6.3 MĚNIČ NAPĚTÍ.....	42

6.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	42
7. MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	44
7.1 GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	45
7.1.1 NAPĚTÍ NA PRÁZDNO	45
7.1.2 VÝKON	46
7.1.3 ÚČINNOST	47
8. ZÁVĚR.....	51
POUŽITÁ LITERATURA	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Schéma Seebeckova obvodu [2]</i>	15
<i>Obrázek 2 Schéma Peltierova obvodu [2]</i>	16
<i>Obrázek 3 Závislost elektrických vlastností na koncentraci volných nosičů [1]</i>	18
<i>Obrázek 4 Termoelektrické materiály a jejich účinnost [7]</i>	19
<i>Obrázek 5 Termoelektrická účinnost materiálů v závislosti na teplotě [13]</i>	23
<i>Obrázek 6 Termoelektrické dvojice [14]</i>	24
<i>Obrázek 7 Konstrukce Peltierova článku [15]</i>	25
<i>Obrázek 8 Kaskádní zapojení termoelektrických elementů [15]</i>	25
<i>Obrázek 9 Schéma jednotlivých elementů [18]</i>	28
<i>Obrázek 10 Generátor v aplikaci s kotlem na tuhá paliva [20]</i>	32
<i>Obrázek 11 Chlazení procesorů PC [21]</i>	33
<i>Obrázek 12 Předpokládaný vývoj systémů Energyharvesting [22]</i>	34
<i>Obrázek 13 Energyharvesting systémy využívající vnější zdroje energie [22]</i>	34
<i>Obrázek 14 Biomedicínská zařízení [19]</i>	36
<i>Obrázek 15 Využití tepla ve výfukovém potrubí [23]</i>	36
<i>Obrázek 16 Schéma zapojení měniče zvyšující napětí [26]</i>	38
<i>Obrázek 17 Schéma zapojení měniče napětí [25]</i>	39
<i>Obrázek 18 Návrh zařízení v programu SolidWorks</i>	41
<i>Obrázek 19 Schéma zapojení obvodu s DC/DC měničem</i>	42
<i>Obrázek 20 Předloha desky plošného spoje s DC/DC měničem</i>	43
<i>Obrázek 21 Výsledné zařízení</i>	44
<i>Obrázek 22 Schéma zapojení měření elektrických veličin</i>	44
<i>Obrázek 23 Napětí na prázdko</i>	45
<i>Obrázek 24 Výkon článků</i>	46
<i>Obrázek 25 Účinnost vařič – hrnek</i>	48
<i>Obrázek 26 Účinnost vařič – zařízení – hrnek</i>	48
<i>Obrázek 27 Pohled na zařízení pomocí termokamery</i>	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Termoelektrické materiály [27]</i>	19
<i>Tabulka 2 Absolutní Seebeckovy koeficienty [1]</i>	22
<i>Tabulka 3 Parametry modulu</i>	40
<i>Tabulka 4 Parametry měniče</i>	42
<i>Tabulka 5 Seznam použitých přístrojů</i>	45
<i>Tabulka 6 Naměřené a vypočtené hodnoty</i>	49

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	plocha příčného řezu termoelementu	m^2
c	měrné teplo vody	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_s	skupenské teplo vody	$kJ \cdot kg^{-1}$
E_F	Fermiho energie	eV
I	proud	A
k	Boltzmannova konstanta	$J \cdot K^{-1}$
K	tepelná vodivost článku	$W \cdot ^\circ C^{-1}$
l	délka termoelementu	m
l_c	tloušťka kontaktní vrstvy	m
m	hmotnost	kg
n	pořadí článku	-
n_e	koncentrace elektronů	-
n_n	elektrický parametr modulu	-
N	počet termoelektrických dvojic	-
p_h	koncentrace děr	-
P	příkon	W
P_2	výkon modulu	W
q	náboj částice	C
Q	teplo	W
Q_{ch}	chladicí výkon	W
r	tepelný parametr modulu	-
R	elektrický odpor	Ω
s	střída	-
t	čas	s
T	teplota	K
U	napětí	V
Z	termoelektrický merit	K^{-1}
α	Seebeckův koeficient	$V \cdot K^{-1}$
β	Thomsonův koeficient	$V \cdot K^{-1}$
η	účinnost	-
λ	tepelná vodivost	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$

μ_n	pohyblivost elektronů	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_p	pohyblivost děr	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
σ	elektrická vodivost	$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
π	Peltierův koeficient	V
ρ	měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot \text{m}$

1. ÚVOD

V době snižujících se zásob fosilních paliv, kdy se snaží nejen Evropská komise a celý svět o snížení emisí skleníkových plynů, narůstá celkový potenciál obnovitelných zdrojů. Na jedné straně je oblast klimatu nepochybně důležitá pro budoucnost naší planety, ale na druhé straně je energetická politika Evropy zcela zásadní pro naši konkurenceschopnost.

Energie z větrných či fotovoltaických elektráren, popřípadě biomasy, je dnes běžnou součástí energetického mixu. Termoelektrické generátory se však nehodí pro masovou výrobu elektrické energie, a to hlavně z důvodu poměrně malé účinnosti přeměny tepla na elektrickou energii a náročnosti výroby. Jejich potenciál se nachází v napájení malých zařízení, jako jsou různá čidla či senzory. U termoelektrického generátoru se využívají objevy z první poloviny 19. století založených na gradientu teplot - například ve výfukovém potrubí automobilu. Zařízení je poměrně jednoduché a spolehlivé bez nutnosti pravidelné údržby. Praktické využití se zkoumá v posledních letech s vývojem nových materiálů s vysokou termoelektrickou účinností.

2. TERMOELEKTRICKÉ JEVY

2.1 Termoelektrický článek

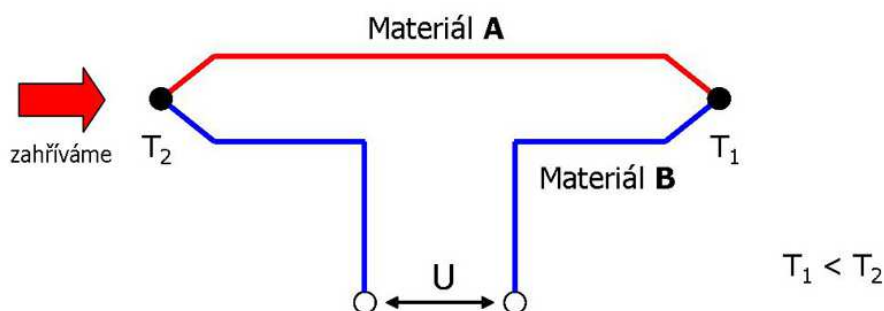
Termoelektrický článek umožňuje přeměnu tepelné energie na elektrickou a naopak. Je složen ze dvou částí, většinou drátu z různých materiálů, obvykle kovu nebo polovodiče. Obě tyto části jsou na koncích vodivě spojeny. Zařízení většinou obsahují několik takovýchto termočlánků zapojených do série. V celé problematice termoelektrických článků se využívá tří typů termoelektrických jevů a to Seebeckova jevu, Peltierova jevu a Thomsonova jevu.

Podle použití se termočlánky dělí na:

- články k přeměně energie
 - a) k výrobě elektrické energie
 - b) k chlazení
- články k měření teploty

2.2 Seebeckův jev

Poprvé byl tento jev pozorován roku 1821 T. J. Seebeckem, který odhalil, že pokud je zahříván spoj mezi dvěma různými vodiči a vzniká zde teplotní gradient, elektrony difundují od teplého konce vodiče k chladnějšímu. Vzniká zde tzv. elektromotorické napětí, které je přímo úměrné teplotnímu rozdílu mezi oběma konci. Takto spojené dva vodiče z různých materiálů nazýváme termodvojicí. Seebeckův jev tak spočívá v přeměně tepelné energie v elektrickou a mnohdy se s ním setkáváme při měření teploty [1].



Obrázek 1 Schéma Seebeckova obvodu [2]

Seebeckův koeficient udává velikost napětí, závisí na vlastnostech materiálu, jako je jeho struktura či teplota. Velikost napětí je pak vyjádřena vztahem 2.1:

$$U = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

U	[V]	napětí mezi konci vodiče
α	[V·K ⁻¹]	Seebeckův koeficient
T	[K]	teplota konců studené (T_1) a teplé (T_2) strany

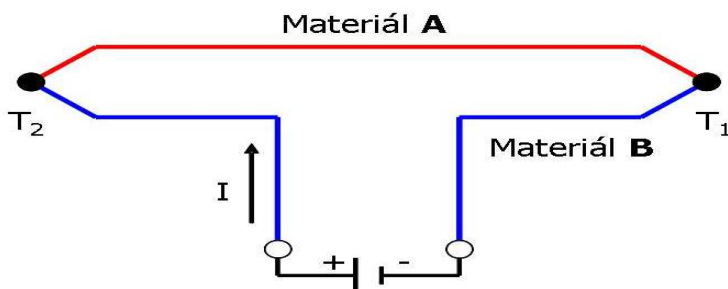
V praxi se často spojují dva vodiče s různými koeficienty. Proto je zaveden takzvaný relativní koeficient, který je rozdílem jednotlivých koeficientů.

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (2.2)$$

Koeficient je považován za kladný, když vzniklé elektromotorické napětí způsobí průchod proudu od teplejšího konce k chladnějšímu [3]. Základní jednotkou pro Seebeckovy koeficienty je $V \cdot K^{-1}$, pro své nízké hodnoty však bývá častěji používána jednotka $\mu V \cdot K^{-1}$. Pro získání co nejvyšší hodnoty relativního koeficientu je dobré spojovat materiály s vysokým kladným a záporným koeficientem. Seebeckův jev je možné pozorovat i v samostatném vodiči což bývá označované jako absolutní Seebeckův jev.

2.3 Peltierův jev

Po dvanácti letech od prvního objevu pozoroval Ch. A. Peltier změny teploty v blízkosti spojů dvou vodičů při procházejícím proudu. Teplo je absorbováno nebo uvolňováno v závislosti na směru proudu, čehož je hojně využíváno k chlazení. Principem je přechod elektronů z materiálu s větší výstupní prací do materiálu s výstupní prací menší. V místě styku je menší odpor, elektrony mají přebytek kinetické energie, a ten uvolňují v podobě tepla. Peltierův jev je inverzním jevem vůči Seebeckovu jevu, tepelný tok je přímo úměrný protékajícímu proudu.



Obrázek 2 Schéma Peltierova obvodu [2]

Relativní Peltierův koeficient je popsán poměrem absorbovaného tepla a elektrického proudu [3].

$$\pi = \frac{Q}{I} \quad (2.3)$$

π	[V]	Peltierův koeficient
Q	[W]	tepelný výkon
I	[A]	proud

Stejně tak jako u Seebeckova jevu je i zde relativní koeficient rozdílem dvou koeficientů

$$\pi = \pi_1 - \pi_2 \quad (2.4)$$

2.4 Thomsonův jev

Vyjadřuje vratnou tepelnou změnu, kterou můžeme uplatňovat na libovolný homogenní vodič, na jehož koncích je teplotní rozdíl a zároveň skrze něj prochází elektrický proud. Jev se projevuje snížením či zvýšením potenciální energie nosiče elektrického náboje v důsledku emitování nebo pohlcování tepla. Při toku nosičů po směru teplotního gradientu vlivem elektrického proudu, bude docházet k uvolňování tepla, což povede ke snížení jejich potenciální energie. Pakliže se budou nosiče elektrického náboje pohybovat proti směru teplotnímu spádu, jejich potenciální energie bude narůstat vlivem pohlcování tepla [4].

Thomsonův jev nezpůsobuje vznik napětí mezi konci vodiče, ale vytváří tepelný tok, který je vyjádřen vztahem:

$$Q = \beta \cdot I \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Q	[W]	teplo prostupující skrze vodič
β	[V·K ⁻¹]	Thomsonův koeficient
I	[A]	elektrický proud
ΔT	[K]	rozdíl teplot

2.5 Kelvinovy vztahy

Kelvinovými vztahy můžeme vyjádřit souvislost mezi výše uvedenými koeficienty. Snáze se měří Seebeckův koeficient než Peltierův. Hodnotu Peltierova koeficientu je však možno snadno vyjádřit pomocí Kelvinova vztahu.

Mezi Peltierovým koeficientem a Seebeckovým koeficientem platí vztah:

$$\pi_{ab} = \alpha_{ab} \cdot T \quad (2.6)$$

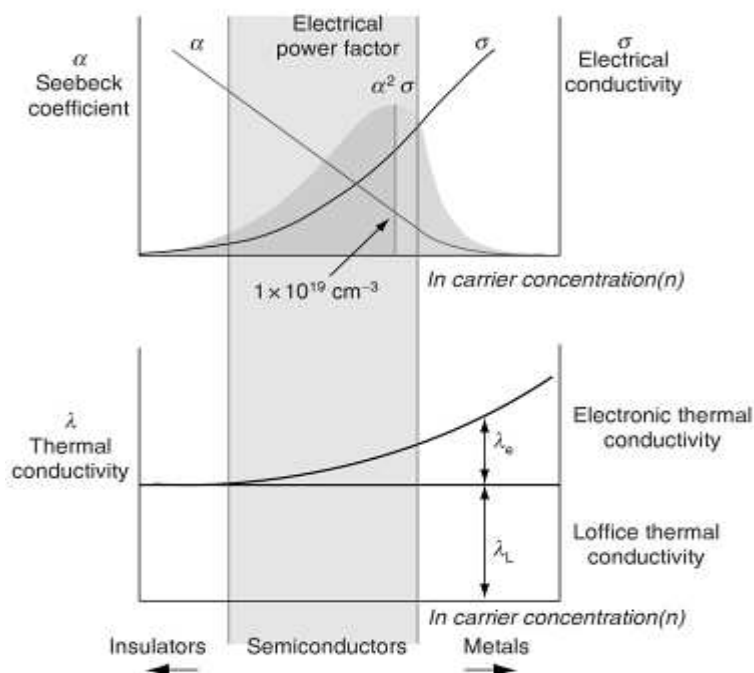
π	[V]	Peltierův koeficient
α	[V·K ⁻¹]	Seebeckův koeficient
T	[K]	teplota

Druhý Kelvinův vztah vyjadřuje souvislost mezi Seebeckovým a Thomsonovým koeficientem

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dt} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad (2.7)$$

3. TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY

Důležitým parametrem pro výběr materiálu k výrobě termoelektrického článku je jeho elektrická vodivost. Kovy mají velmi dobrou elektrickou vodivost σ , avšak jejich Seebeckův koeficient α a generované napětí dosahují poměrně nízkých hodnot. Se zvyšujícím se počtem nosičů elektrického náboje stoupá tepelná vodivost λ . Ta je však při návrhu termoelektrického článku nežádoucí, protože snižuje jeho termoelektrickou účinnost. Při výrobě termoelektrických článků se proto volí polovodičové materiály, které mají lepší parametry [1].



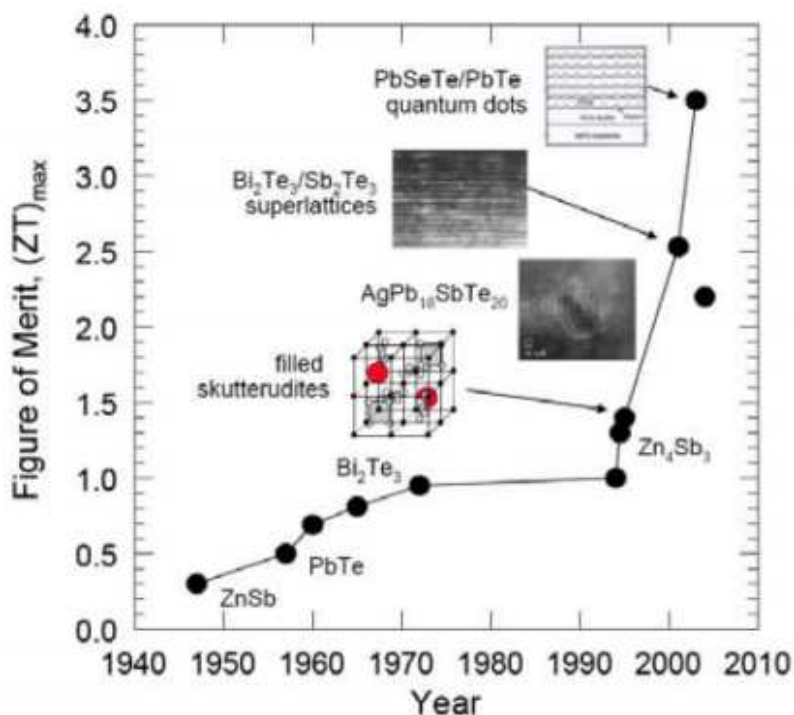
Obrázek 3 Závislost elektrických vlastností na koncentraci volných nosičů [1]

Použité materiály mají zásadní vliv na interval pracovních teplot, ve kterém se bude termočlánek pohybovat. Základní materiály vhodné pro výrobu proto můžeme rozdělit podle rozsahu pracovních teplot [4],[5].

- Tellurid bismutitý a jeho nejrůznější slitiny. Mají nejvyšší koeficient Z , maximální provozní teplota je zhruba 450 K
- Slitiny telluru, antimonu, germania a stříbra. Termoelektrická účinnost $Z \cdot T \sim 1,4$. Rozsah teplot 400-550 K.
- Telurid olovnatý a jeho nejrůznější slitiny, mají druhou nejvyšší účinnost. Maximální provozní teplota je zhruba 1000 K
- Slitiny křemíku a germania. Mají nejhorší účinnost, ale mohou pracovat až při teplotách 1300 K.

V posledních zhruba šedesáti letech dochází k postupnému objevování nových materiálů a zvyšování jejich účinnosti. Na začátku tohoto vývoje dosahoval koeficient termoelektrické účinnosti zhruba hodnoty $Z = 0,5$, v roce 2003 to již byla hodnota $Z = 3,5$. V 90. letech byly vyvinuty tzv. skutterudity a jsou popisovány jako materiály na bázi kobaltu či arsenu. Jejich rozsah pracovních teplot se pohybuje v rozmezí 230 °C až 670 °C. Výkonnost materiálu je možné zvýšit implementováním nanostruktur, jako jsou nanovlákná nebo nanozrna [1].

Pokračující vývoj se soustředí hlavně na práci s materiály s tzv. supermřížkou a materiály s kvantovými body. Což by mělo celkovou účinnost nadále zvyšovat [2],[5]



Obrázek 4 Termoelektrické materiály a jejich účinnost [7]

Tabulka 1 Termoelektrické materiály [27]

materiál	složení	elektrická vodivost	ZT [-]	Pracovní teplota [°C]
sloučeniny křemíku	Mn-Si	P	0,8	300-600
	Mg-Si	N	1,07	380-600
slitiny Si-Ge	SiGe	N	1	730
	SiGe	P	0,7	730
oxidy	NaCoO	P	1,2	30-500
	(ZnO)(InY)O	N	0,031	430-800
	ZnAlO	N	0,42	730-700
slitiny TAGS	(GeTe)(AgSbTe)	P	1,4	430
LaTe	LaTe	N	1,17-1,43	730
Skutterudity	YbCO(ptPb)Sb	N	1,12	330-630
	CeFrCoSb	P	0,93	330-630
Bi-Sb-Te-Se	Bi-Sb-Te-Se	N,P	0,3-1,01	180-250
Slitiny ZnSb	Zn(Sb0Sn)	P	1	230-480

3.1 Tepelná vodivost polovodičů

Tepelná vodivost materiálu vyjadřuje schopnost dané látky vést teplo. Je to množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času [7].

Tepelná vodivost polovodičů je tvořena elektrickou a mřížkovou vodivostí. Celková tepelná vodivost je definována jako součet tepelné vodivosti pohybujících se nosičů náboje a tepelné vodivosti krystalové mřížky [8].

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_l \quad (3.1)$$

λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	celková tepelná vodivost
λ_e	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost nosičů elektrického náboje
λ_l	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost krystalové mřížky

Celková tepelná vodivost polovodičů stoupá s množstvím nosičů elektrického náboje. Velký vliv však má tepelná vodivost krystalové mřížky, ta je zprostředkována tzv. fonony [8], kvazičásticemi, které se šíří materiálem formou kmitání kolem svých rovnovážných poloh [9].

Pro dosažení největší termoelektrické účinnosti je dobré vybírat materiály, jejichž součinitel tepelné vodivosti udržuje alespoň konstantní hodnotu či se zvyšující teplotou klesá.

3.2 Elektrická vodivost polovodičů

Polovodič je látka, jenž zprostředkovává vedení elektrického proudu pomocí elektronů nebo děr. Elektrická vodivost σ je závislá na teplotě a lze ji poměrně snadno regulovat pomocí vnějších faktorů. Tím může být například světlo, teplo, elektrické či magnetické pole apod. [10].

Polovodiče se rozdělují podle jejich vodivostí na vlastní a nevlastní. Vlastní vodivost se vyskytuje u všech polovodičů. Nevlastní vodivost existuje jen u polovodičů s příměsí cizího atomu. Ty pak dělíme na polovodiče typu N a P.

Pro ukázkou elektrické vodivosti jsou používány pásové diagramy dovolených hodnot energií elektronů.

1. Vnitřní pás – elektrony jsou pevně vázány k jádru atomu a nepodílejí se na přenosu elektrického náboje
2. Valenční pás – množina energetických stavů elektronů
3. Zakázaný pás – odděluje od sebe pásy valenční a vodivostní
4. Vodivostní pás – množina všech volných elektronů pohybujících se v meziatomovém prostoru.

Z pohledu elektrické vodivosti je důležitá šířka zakázaného pásu. Izolanty mají zakázaný pás nejširší, vodivostní pás je prázdný, a proto izolanty nevedou elektrický proud. U vodičů, naopak od izolantů, je zakázaný pás velmi malý a proto vedou dobře elektrický proud. Polovodiče se svou šířkou zakázaného pásu jsou mezi izolanty a vodiči. Při teplotě klesající k 0 K nejsou ve vodivostním pásu polovodiče žádné volné elektrony a polovodič se chová jako izolant. Při zvyšující se teplotě mohou přecházet jednotlivé elektrony do vodivostního pásu a vést tak elektrický proud [12].

- Polovodič typu N vznikne nahrazením atomu krystalové mřížky čtyřmocného prvku, který tvoří základ polovodiče, prvkem pětimocným tzv. donorem. Čtyři elektrony z valenčního pásu jsou vázány s okolními atomy a pátý elektron je vázán jen velmi slabou energií. Po dodání větší energie než je tato slabá vazebná energie se může elektron uvolnit a stát se nosičem elektrického náboje. Pak hovoříme o takzvané elektronové vodivosti [11].
- Polovodič typu P vznikne nahrazením atomu krystalové mřížky čtyřmocného prvku, prvkem třímocným tzv. akceptorem. Tři elektrony z valenčního pásu jsou vázány s okolními atomy, přičemž jedna vazba zůstává neúplná. Po dodání vnější energie stačí, aby některý sousední elektron zaplnil tuto vazbu, a tím po uvolněním elektronu vznikne díra. Tato se může pohybovat v krystalové mřížce a stát se nosičem elektrického náboje. Pak hovoříme o takzvané děrové vodivosti [12].

Elektrická vodivost polovodiče se vyjádří vztahem [11]:

$$\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot n_e + \mu_p \cdot p_h) \quad (3.2)$$

σ	$[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	měrná elektrická vodivost
q	[C]	náboj částice
μ_n	$[\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	pohyblivost elektronů
μ_p	$[\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	pohyblivost děr
n_e	[-]	koncentrace elektronů
p_h	[-]	koncentrace děr

Pohyblivost nosiče náboje μ definuje působení elektrického pole na pohyb nosičů náboje. Je závislá na typu polovodiče (N nebo P) a na koncentraci příměsí. Se vzrůstající koncentrací příměsí pohyblivost klesá. Vodivost materiálu je přímo úměrná koncentraci příměsí [11].

3.3 Seebeckův koeficient

Polovodičové materiály tvořené polokovy, z nichž se po přidání příměsi stávají polovodiče, jsou dnes důležitými materiály pro výrobu termoelektrických článků. Jejich Seebeckův koeficient dosahuje oproti kovům mnohem vyšších hodnot, a to v řádech i stovek $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$. Koeficient pro polovodičové materiály můžeme vypočítat podle vztahu:

$$\alpha = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e} \cdot T \cdot \left(\frac{d \ln \sigma \cdot (E_F)}{dE_F} \right) \quad (3.3)$$

α	[V·K ⁻¹]	Seebeckův koeficient
k	[J·K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
T	[K]	teplota
σ	[$\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$]	měrná elektrická vodivost
E_F	[eV]	Fermiho energie

Tabulka 2 Absolutní Seebeckovy koeficienty [1]

materiál	$\alpha[\mu\text{VK}^{-1}]$	materiál	$\alpha[\mu\text{VK}^{-1}]$
Železo	19	Hliník	3,5
Molybden	10	Uhlík	3
Kadmium	7,5	Rtuť	0,6
Wolfram	7,5	Platina	0
Zlato	6,5	Sodík	-2
Stříbro	6,5	Draslík	-9
Měď	6,5	Nikl	-15
Rhodium	6	Konstantan	-35
Tantal	4,5	Bismut	-72
Olovo	4		

3.4 Merit

Z hlediska praktického využití jakéhokoliv zařízení je vždy důležitá jeho účinnost. V tomto případě je to účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou, ovlivněnou Seebeckovým koeficientem α , elektrickou vodivostí (konduktivitou) σ a tepelnou vodivostí λ . Čímž se dostáváme k veličině zvané merit, veličině reprezentující vzájemnou kvalitativní míru přeměny těchto dvou energií.

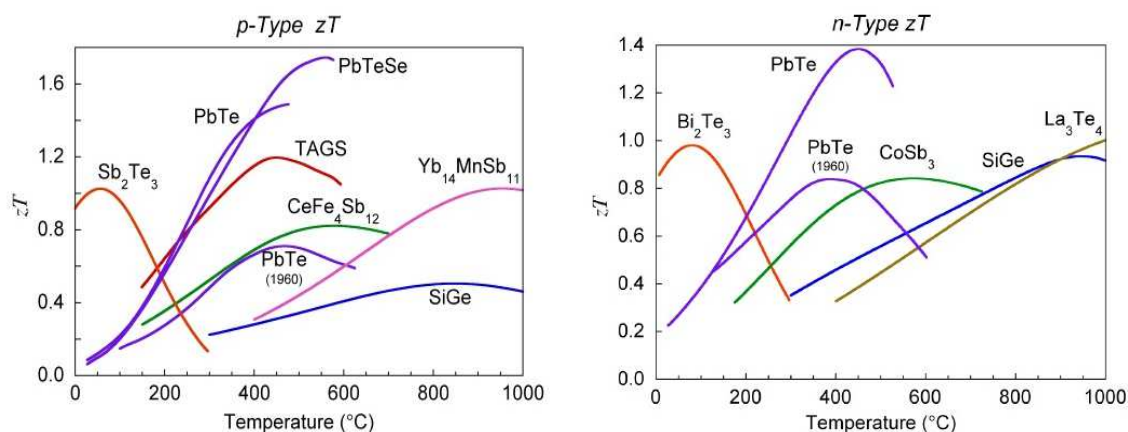
$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \quad (2.8)$$

Z	$[\text{K}^{-1}]$	termoelektrický merit
α	$[\text{V} \cdot \text{K}^{-1}]$	Seebeckův koeficient
σ	$[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	elektrická vodivost
λ	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	tepelná vodivost

Dobrý materiál pro realizaci Seebeckova jevu by měl mít vysokou hodnotu koeficientu α , vysokou hodnotu elektrické vodivosti σ a malou hodnotu tepelné vodivosti λ . Toto ve své podstatě vyřazuje téměř všechny kovy, protože mají konstantní poměr mezi tepelnou a elektrickou vodivostí. Naopak toto neplatí o polovodičích, u nichž zvětšování koeficientu elektrické vodivosti σ neovlivňuje velikost tepelné vodivosti λ . Proto jsou dnes také hojně využívány. Následující vztah bere v potaz všechny důležité veličiny.

$$Z = \frac{(\alpha_a - \alpha_b)^2}{\left[\left(\frac{\lambda_a}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda_b}{\sigma_b} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (3.4)$$

Z	$[\text{K}^{-1}]$	merit
α	$[\text{V} \cdot \text{K}^{-1}]$	Seebeckův koeficient
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost
σ	$[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	elektrická vodivost

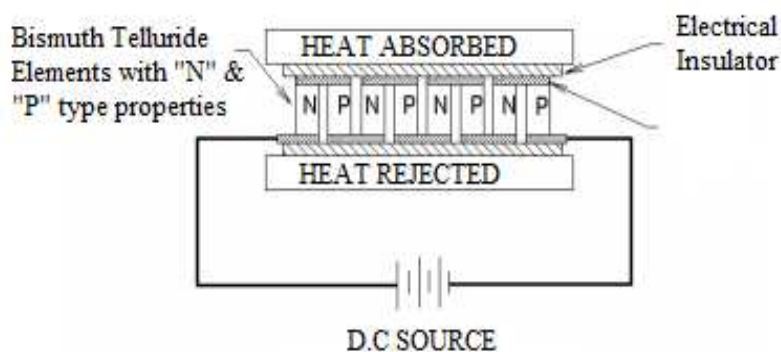


Obrázek 5 Termoelektrická účinnost materiálů v závislosti na teplotě [13]

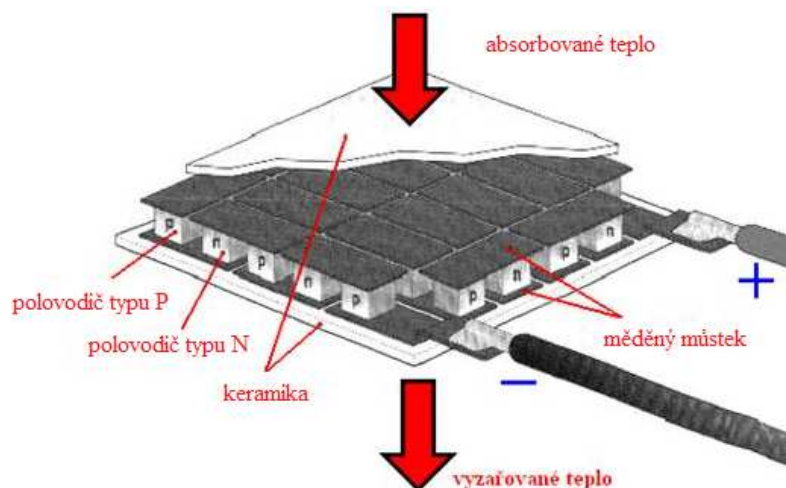
4. PELTIEROVY ČLÁNKY

4.1 Konstrukce

Peltierovy články jsou zařízení, která pracují na základě Seebeckova a Peltierova jevu. Jsou určeny k termoelektrickému ohřevu, chlazení, nebo výrobě elektrické energie. Jsou to zařízení malých rozměrů. Jsou složeny z několika termoelektrických dvojic, jenž jsou tvořeny polovodičovými oblastmi typu p a n , které jsou umístěny mezi dvěma keramickými destičkami. Jelikož napětí jednoho termočlánku je poměrně malé, spojujeme několik takovýchto termoelektrických dvojic sériově pomocí měděných můstků do termoelektrické baterie. Protékající proud je ve všech článcích stejný. Výsledné napětí je součtem napětí jednotlivých termočlánků. Je třeba, aby vzdálenosti mezi jednotlivými články byly konstantní a tepelný tok tak byl rovnoměrný. Přívod tepla a elektrická izolace je zajištěna pomocí keramických desek, ke kterým jsou polovodičové termoelementy připájeny. Při špatném výrobním procesu může mezi polovodiči a můstkem vznikat tzv. přechodný odpor, který snižuje výkon celého článku. Napájení zajišťují dvě elektrody. Rozměry se volí tak, aby Seebeckův koeficient byl v řádech stovek $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ [1]. Keramické destičky jsou obvykle vyrobeny z oxidu hlinitého Al_2O_3 . Ten je výhodný zvláště kvůli své nízké ceně, mechanickým vlastnostem a schopnostem připájet měděné můstky přímo na keramickou destičku. Důležitá je jeho tepelná vodivost, která je však u tohoto materiálu poměrně malá, což zhoršuje přestup tepla od termočlánku do okolí. Lepších hodnot této důležité vlastnosti obecně dosahuje např. nitrid hlinitý AlN , což je však kompenzováno vyšší cenou. Destičky se vyrábí v různých provedeních a tvarech, podle požadavků Peltierova článku. Nejpoužívanějším rozměrem je destička o rozměrech 30 x 30 mm [14].



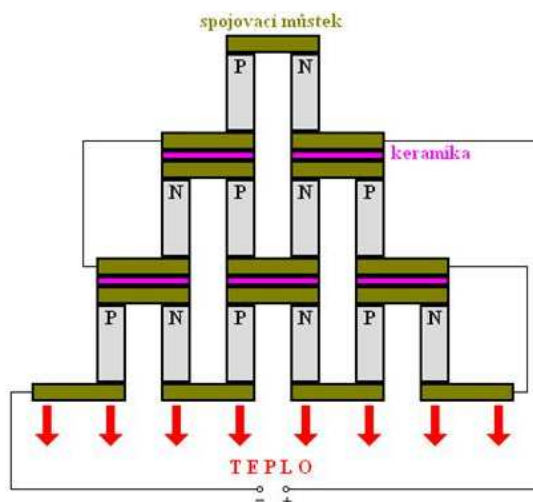
Obrázek 6 Termoelektrické dvojice [14]



Obrázek 7 Konstrukce Peltierova článku [15]

4.1.1 Kaskádové články

Jestliže teplotní rozdíl jednoho článku nepostačuje, seskupí se Peltierovy články do kaskády. Vytvoří se tak jejich sériové spojení. Spodní článek je vždy o něco větší než vrchní článek, takže se vytvoří pyramida a to kvůli zajištění minimálního chlazení. K chlazení článku s vyšší úrovní je potřeba vyšší výkon než u článku nižší úrovně. Pro potřeby chlazení se využívá pouze plocha článku nejvyšší úrovně. Takto řadit lze hned několik stupňů pro vytvoření požadovaného teplotního rozdílu. Nejčastěji bývají vyráběné články o dvou až pěti stupních, takovýmto článkem lze dosáhnout rozdílu teplot až 120 K. S tím jak klesá účinná plocha chladnější strany, zmenšuje se teplo odebírané z této plochy a snižuje se chladicí faktor. Lze tedy říci, že se zvyšujícím se teplotním rozdílem se chladicí faktor zmenšuje, a to jak u kaskádovitěho článku, tak i u toho jednostupňovitého. Do kaskádního zapojení lze sestavit i jednotlivé termoelementy, v takovémto případě se musí zajistit elektrická izolace mezi jednotlivými vrstvami.



Obrázek 8 Kaskádní zapojení termoelektrických elementů [15]

4.2 Parametry

U Peltierových článků potřebujeme znát jeho vlastnosti. Ty můžeme rozdělit následovně:

a) **geometrické parametry** indikují rozměry konkrétních termočlánků a jejich celkový počet v článku:

- počet termočlánků
- průřez jednoho prvku polovodiče
- délka jednoho prvku polovodiče

Počet termočlánků indikuje množství seriově zapojených termočlánků tvořící jeden celek v podobě Peltierova článku. Každý jeden termočlánek obsahuje dva polovodičové prvky, tudíž celkový počet jednotlivých prvků je dvakrát větší.

b) **materiálové parametry** indikují termodynamické, termoelektrické a samozřejmě i elektrické vlastnosti. Všechny tyto veličiny jsou závislé na teplotě:

- Seebeckův koeficient
- součinitel tepelné vodivosti
- měrný elektrický odpor

Tyto vlastnosti mohou reprezentovat konkrétní polovodičový prvek nebo mohou být vztaheny k celému termočlánku. Jestliže se vztahují k jednomu polovodičovému prvku, hovoříme o průměrných hodnotách obou materiálů termočlánku. Součinitel tepelné vodivosti reprezentuje schopnosti materiálu vést teplo. Měrný elektrický odpor reprezentuje odpor materiálu o jednotkové délce a průřezu.

c) **maximální dovolená teplota** indikuje maximální provozní teplotu teplé strany článku. Při vyšších teplotách případně dochází k difuzi atomů můstku do materiálu polovodiče a tím ke zhoršení jeho vlastností. Materiálem můstku bývá většinou měď, protože má dobrý měrný elektrický odpor a dobře se pájí. Při významném překročení maximální pracovní teploty se roztaví pájené spoje a dojde tím ke ztrátě vlastností článku [14],[16].

4.2.1 Chladicí faktor

Nejvyšších hodnot chladicího výkonu dosáhneme při nulovém rozdílu teplot. Předpokládáme-li lineární průběh teploty mezi teplotou a studenou stranou článku, můžeme vyjádřit chladicí výkon n -násobného článku

$$Q_{ch} = n \cdot (\alpha \cdot T_s \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T) \quad (4.1)$$

Na teplejší straně článku se emituje jak teplo Q přijaté na chladnější straně, tak příkon P článku. Pro emitovaný výkon n -násobného článku platí:

$$Q_h = n \cdot (\alpha \cdot T_H \cdot I + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T) \quad (4.2)$$

Velikost topného výkonu závisí na velikosti napájecího proudu. Účinnost topení Jouleovým teplem je nižší než samotná účinnost topení termoelektrickým článkem. Účinnost topení je následující:

$$\eta_h = \frac{Q_h}{P} \quad (4.3)$$

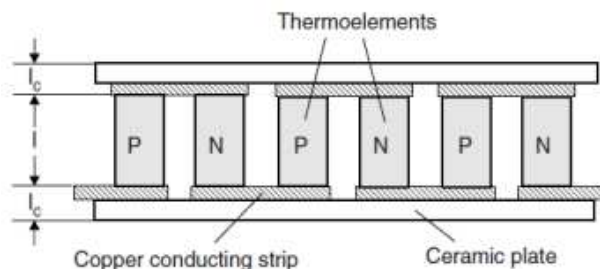
Chladicí faktor vyjadřuje účinnost chlazení. Je to poměr chladicího výkonu k příkonu [17].

$$\eta = \frac{Q}{P} \quad (4.4)$$

Q	[W]	chladicí výkon
Q_h	[W]	teplo vyzářené na teplé straně
n	[-]	pořadí článku
α	[V·K ⁻¹]	Seebeckův koeficient
T_s	[K]	teplota chladnější strany
T_H	[K]	teplota teplejší strany
I	[A]	procházející proud
R	[Ω]	vnitřní odpor článku
K	[W·°C ⁻¹]	tepelná vodivost článku
ΔT	[K]	teplotní rozdíl
η_h	[-]	účinnost topení
η	[-]	účinnost chlazení
P	[W]	příkon

4.3 Výkon

Jestliže prochází článkem tepelný tok, může být generován elektrický výkon a článek funguje jako zdroj elektrické energie. Výkon je generován jedním konkrétním článkem, a je závislý na teplotním rozdílu, na celkovém počtu termoelektrických dvojic na provedení jejich termoelementů a na vlastnostech samotného materiálu.



Obrázek 9 Schéma jednotlivých elementů [18]

Výkon článku dodávaný do zátěže se pak určí podle vztahu [1],[18]:

$$P_2 = \frac{\alpha^2}{2 \cdot \rho} \frac{N \cdot A \cdot (T_H - T_S)^2}{(l + n) \cdot (1 + 2 \cdot r \cdot \frac{l_c}{l})^2} \quad (4.5)$$

Parametry n a r se pohybují hodnotách $n \sim 0,1$ a $r \sim 0,2$. Spočítají se podle vztahu:

$$n = \frac{2 \cdot \rho_c}{\rho} \quad (4.6)$$

$$r = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad (4.7)$$

P_2	[W]	výkon modulu
α	[V·K ⁻¹]	relativní Seebeckův koeficient
ρ	[Ω·m]	měrný elektrický odpor
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
A	[m ²]	plocha příčného řezu termoelementu
T_H	[K]	teplota teplejší strany
T_C	[K]	teplota chladnější strany
l	[m]	délka termoelementu
l_c	[m]	tloušťka kontaktní vrstvy
n	[-]	elektrický parametr modulu
r	[-]	tepelný parametr modulu
ρ_c	[Ω·m]	měrný elektrický přechodový odpor

λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost
λ_c	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost konstantní vrstvy

Mnohdy může být poměrně obtížné zjistit všechny potřebné údaje, jako je například tloušťka konstantní vrstvy. Neboť tyto informace, stejně tak jako hodnoty n a r , ve svých dokumentech, výrobce neuvádí. Pak je vhodné použít pro výpočet vztah pro stanovení výkonu ideálního termoelektrického modulu, jelikož jsou zde velikosti kontaktních odporů zanedbány.

$$P_2 = \frac{\alpha^2}{2 \cdot \rho} \frac{N \cdot A \cdot (T_H - T_C)}{2 \cdot l} \quad (4.8)$$

Výkon modulu se zvyšuje s množstvím termoelektrických dvojic, dále plochou příčného průřezu termoelektrického elementu a se zmenšující se jeho délkou. Výkon článku také roste s druhou mocninou rozdílu teplot studené a teplé strany. To nám umožňuje přibližně určit výkon i pro jiné pracovní teploty, než které deklaruje výrobce [19].

$$P_2 = \frac{P_{ref}}{\Delta T_{ref}^2} \cdot \Delta T^2 \quad (4.9)$$

Celkový výkon dodávaný do zátěže bere v potaz odpor připojené vnější zátěže. Nejvyšší výkon modulu bude dodáván v momentě, kdy se vzájemně vnitřní odpor modulu a odpor vnější zátěže rovnají.

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha^2 \cdot (T_H - T_C)}{4 \cdot R_{int}} \quad (4.10)$$

P_{Lmax}	[W]	výkon dodávaný do zátěže
α	$[\text{V}\cdot\text{K}^{-1}]$	relativní Seebeckův koeficient
T_H	[K]	teplota teplejší strany
T_C	[K]	teplota chladnější strany
R_{int}	$[\Omega]$	vnitřní elektrický odpor modulu

Vnitřní odpor modulu v sobě zahrnuje odpor samotného termoelektrického materiálu, odpor měděného můstku a kontaktní odpor termoelektrické dvojice. Lze ho vypočítat podle vztahu [13],[19]:

$$R_{int} = N \cdot \left(\frac{\rho_N \cdot l}{A_N} + \frac{\rho_P \cdot l}{A_P} + R_C \right) \quad (4.11)$$

R_{int}	$[\Omega]$	vnitřní odpor modulu
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
ρ_N	$[\Omega\cdot\text{m}]$	měrný elektrický odpor polovodiče N

ρ_P	[$\Omega \cdot m$]	měrný elektrický odpor polovodiče P
$A_{N;P}$	[m^2]	plocha příčného průřezu polovodiče N;P
R_C	[Ω]	kontaktní odpor termoelektrické dvojice

Tak jako výkon a vnitřní odpor článku můžeme spočítat i jeho napětí a proud. Napětí je závislé na teplotě, což má za následek značné ztráty výkonu a ztěžuje to propojování modulů do jednotlivých celků. Napětí a proud lze vypočítat podle vztahů [1],[18].

$$U = \frac{N \cdot \alpha \cdot (T_H - T_C)}{1 + 2 \cdot r \cdot \frac{l_c}{l}} \quad (4.12)$$

$$I = \frac{\alpha \cdot A \cdot (T_H - T_C)}{2 \cdot \rho \cdot (l + n) \cdot (1 + 2 \cdot r \cdot \frac{l_c}{l})} \quad (4.13)$$

U	[V]	výstupní napětí
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
α	[$V \cdot K^{-1}$]	relativní Seebeckův koeficient
T_H	[K]	teplota teplejší strany
T_C	[K]	teplota chladnější strany
r	[-]	tepelný parametr modulu
l_c	[m]	tloušťka kontaktní vrstvy
l	[m]	délka termoelementu
I	[A]	výstupní proud
A	[m^2]	plocha příčného řezu termoelementu
ρ	[$\Omega \cdot m$]	měrný elektrický odpor
n	[-]	elektrický parametr modulu

4.4 Účinnost

Všeobecně účinnost definujeme jako poměr výstupní energie vůči vstupní energii. Podobně je to i účinností Peltierových článků. Uvažujme nyní ideální termoelektrický článek bez jakýchkoliv tepelných ztrát. Účinnost u takového stroje pak bude definována následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{\text{Výkon dodávaný modulem}}{\text{tepelný výkon absorbován modulem}} \quad (4.14)$$

Maximální účinnosti dosáhneme za ideálních podmínek, kdy zanedbáváme elektrické a tepelné ztráty. Tato účinnost závisí na Carnotově účinnosti η_{TC} a a účinnosti materiálu η_{MAT} . Carnotova účinnost je termodynamická účinnost Carnotova cyklu. Materiálová účinnost je silně ovlivněna hodnotou koeficientu Z . Což je, jak již bylo zmíněno v kapitole o termoelektrických materiálech, veličina reprezentující vzájemnou kvalitativní míru přeměny těchto dvou energií.

Za ideálních podmínek můžeme vyjádřit účinnost jako:

$$\eta = \eta_{TC} \cdot \eta_{MAT} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + Z \cdot T} - 1}{\sqrt{1 + Z \cdot T} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (4.15)$$

Maximální účinnosti dosáhneme, jestliže odpor zátěže R_L bude:

$$R_L = R \cdot \sqrt{1 + Z \cdot T} \quad (4.16)$$

V případě, že odpory na studeném a teplém spoji jsou zanedbatelné vůči odporu termoelementů, Seebeckovy koeficienty, elektrické a tepelné vodivosti jednotlivých termoelementů, jsou konstantní. Můžeme účinnost vyjádřit jako:

$$\eta = \frac{R \cdot I^2}{\lambda \cdot (T_H - T_C) - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 + \alpha \cdot I \cdot T_H} \quad (4.17)$$

Kde R je sériový odpor jednotlivých termoelementů.

4.5 Použití

Pro možné využití článku jako zdroje elektrické energie je potřeba, aby se hodnota napětí na jeho kontaktech pohybovala minimálně v řádech jednotek voltů. Proto se jednotlivé články spojují do série a vytváří tak termoelektrický generátor (TEG). Napětí na takovémto generátoru je pak zpravidla už dostatečné pro jeho využití ke generaci elektrické energie. Termoelektrické generátory se používají v celé řadě aplikací, a to v podstatě jako články pro generování elektrické energie, popřípadě jsou využívány pro chlazení. Jejich hlavní výhodou je absence pohyblivých částí, spolehlivost a dlouhá životnost. Nevýhodou je pak malá účinnost. Význam tohoto zařízení se však bude nadále zvyšovat. Velký prostor pro použití v budoucích letech se nachází hlavně v biomedicínských zařízeních. Vývoj probíhá i u renomovaných automobilových společností, který si dává za cíl nahradit současné alternátory.

4.5.1 Kotle malých výkonů

Moderní kotle vhodné pro vytápění rodinných domů, horských chat a různých podobných objektů jsou opatřeny čerpadly, ovládacími elektronickými prvky a dalšími součástmi, které ke své činnosti potřebují dodávku elektrického proudu. Při přerušení dodávky elektrického proudu kotel ztrácí svoji funkčnost. Například těžko přístupné horské oblasti jsou proto vybaveny záložními zdroji energie, jako třeba diesel agregátem. Z kotlů na tuhá paliva však odchází část energie nevyužita ve formě odpadního tepla. To můžeme pomocí termoelektrického generátoru, přeměnit na elektrickou energii, díky čemuž se lepší využití primárního zdroje energie. V ideálním případě se kotel stane energeticky soběstačný a nezávislý na elektrické síti. Kotel využívající termoelektrický generátor tak lze označit za kogenerační jednotku. Například generátor využívající odpadní teplo u kotle na tuhá paliva. Což lze využít všude tam, kde není elektrická síť, popřípadě jako záložní zdroj energie. Rozdílu teplot se dosáhne tím, že se generátor připevní na stěnu kotle a vnější strana je ochlazována. Část tepelné energie se přemění na elektrickou, zbývající teplo je využito k vytápění. U takového systému jsou dobré možnosti propojení s obnovitelnými zdroji energie. Jestliže je v místě provozován ostrovní systém s fotovoltaikou, pak přes den, kdy svítí slunce, se baterie dobíjí z panelů a večer z termogenerátoru. Lze tím ušetřit značné finanční prostředky za nákup akumulátorů a měniče.

Využití je možno v podstatě jakýkoliv teplotní rozdíl. Důkazem toho jsou dnešní moderní aplikace, jako třeba lampa či nabíječka AA baterií připevněna na radiátor a podobně.

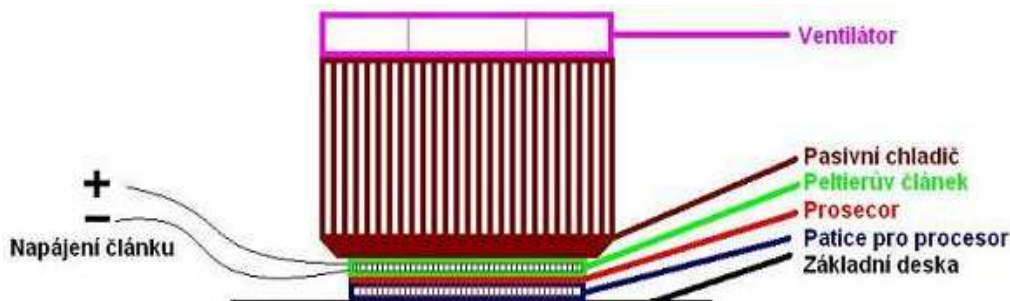


Obrázek 10 Generátor v aplikaci s kotlem na tuhá paliva [20]

4.5.2 Chlazení

Článekům určeným k chlazení se říká „*thermoelectriccoolers*“ (TEC). Konstrukčně jsou stejné jako články TEG, akorát s tím, že pracují na principu Peltierova jevu. To znamená, že se do článku přivádí proud a na jeho povrchu vznikne teplá a studená strana. Toho se hlavně využívá jako chlazení, avšak opačný jev (ohřev) je rovněž proveditelný tím, že se změní polarizace. Články nacházejí uplatnění zejména jako chladiče procesorů u PC. Procházející proud udává velikost výkonu, což vede ke snadnému způsobu regulace chlazení. Výhodou článku je soustředění topného či chladivého výkonu na poměrně malou plochu. Dochází zde k rovnoměrnému rozložení chlazení, protože plocha článku má plochý tvar. Nevýhodou takovéto aplikace je spotřeba energie, a tím tedy další nároky na zdroj, a pak také skutečnost, že článek

z druhé strany hřeje, což je potřeba chladit. Aby nedocházelo v průběhu času ke změnám teploty, je třeba článek napájet ze zdroje konstantního proudu. Dalším uplatněním jsou rovněž různá chladicí zařízení v medicíně nebo přenosná zařízení pro chlazení nápojů.



Obrázek 11 Chlazení procesorů PC [21]

4.5.3 Senzory

Pro své malé výkony jsou termoelektrické moduly vhodné pro napájení senzorů elektrických či neelektrických veličin. Modul je schopen poskytovat dostatečné množství energie pro vlastní spotřebu senzoru nebo detektoru pro měření teploty, měření vlhkosti v dané místnosti či koncentrace plynů. Teplotní senzory rozdělujeme na kontaktní a bezkontaktní podle toho, zdali se senzor měřeného zdroje tepla dotýká či nikoliv. Příkladem bezkontaktního senzoru je například pyroelektrický senzor, který zjišťuje elektromagnetické vlnění. Obecně jsou v praxi hojně využívány termistory kvůli své nízké ceně a dobré citlivosti, avšak jejich nevýhodou jsou značně nelineární charakteristiky.

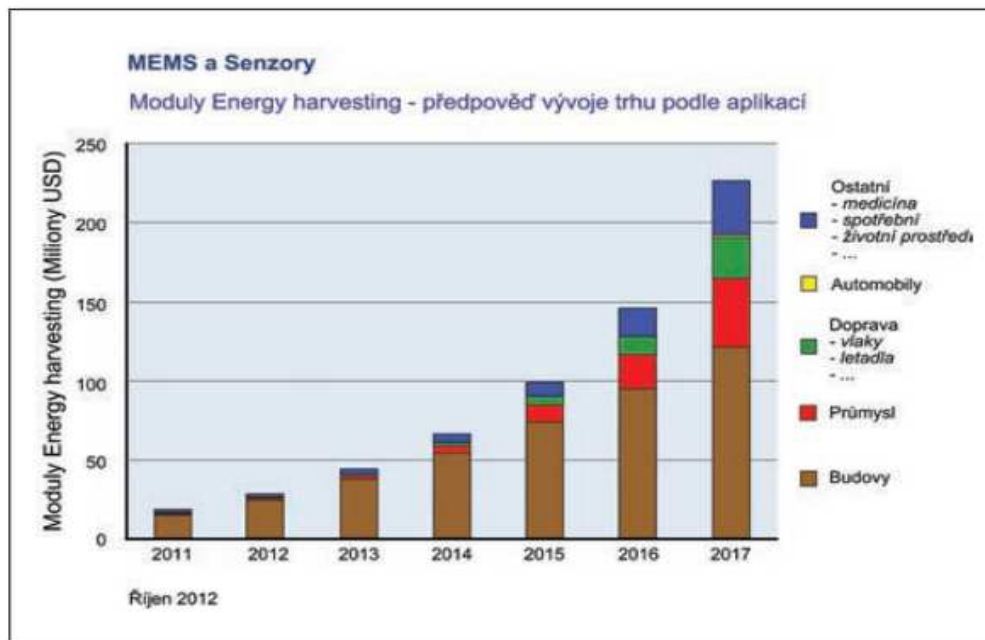
U termoelektrických modulů je napětí mezi kontakty článku závislé na teplotě, této vlastnosti můžeme přímo využít pro měření teploty. K dostání jsou články s vysokou teplotní odolností, což umožňuje měření teplot poměrně vysokých hodnot.

4.5.4 EnergyHarvesting

Velký prostor pro uplatnění termoelektrických generátorů je v napájení různých mikrosenzorů, či mikrosystémů. Moderní součástky již v dnešní době dovolují poměrně výrazné snížení příkonu i napětí a dovolují tedy využít zdrojů o malých výkonech. Což vede ke snížení potřeby napájení ze sítě či z baterií. Pojem „Energyharvesting“ lze přeložit jako „sklizeň energie“ a nazýváme jím způsob získávání energie z okolního prostředí, jímž může být například sluneční záření, vítr, proudění kapaliny, magnetismus nebo vibrace. Na trhu jsou už v tuto chvíli dostupné nové úsporné čipy, které významným způsobem regulovaly nároky na napájecí příkon. I u Energyharvesting se pracuje na zvyšování jejich výkonu a účinnosti.

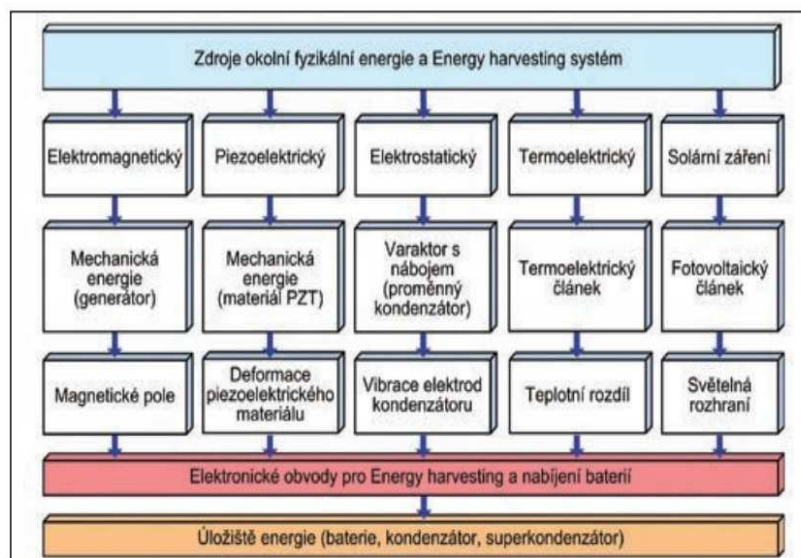
Systémy Energyharvesting jsou velice dynamicky se rozvíjejícím segmentem a jejich uplatnění můžeme najít v celé řadě aplikací, načež nejdůležitější jsou ty ve stavebnictví. Zajímavé jsou systémy používané v budovách, kde je můžeme nalézt například jako zdroje pro bezdrátové senzory nebo pro přepínače osvětlení. Velkou výhodou je to, že odpadá potřeba

vedení kabelů a jejich bezúdržbový provoz. Takovéto systémy lze použít i v uzavřených místech, kde není možná výměna například baterií. Předpokládaný vývoj těchto systémů je znázorněn na Obr.12.



Obrázek 12 Předpokládaný vývoj systémů Energyharvesting [22]

Samotný proces získání energie se skládá z převodu energie na energii elektrickou, a pak také její uschování v součástkách jako jsou baterie a podobně, či v elektrických obvodech. Těmito zařízeními napájíme obvody s nízkým příkonem, jako jsou přenosná zařízení nebo malé přístroje. Pro dostatečné napájení je třeba kombinovat více fyzikálních zdrojů dohromady. Na Obr.13 je přehled s současnosti používaných systémů využívajících energii z vnějšího prostředí [22].



Obrázek 13 Energyharvesting systémy využívající vnější zdroje energie [22]

Vnější zdroje energie je možno charakterizovat jako střídavé a stejnosměrné. Střídavé zdroje využívají různé elektromagnetické generátory, vibrace nebo výkon z piezoelektrických materiálů. Stejnosměrné zdroje lze popsat velmi pomalými časovými změnami jako je například teplotní gradient, popřípadě intenzita světla. Aby mohla být energie vhodným způsobem uskladněna, je třeba elektrickou energii usměrnit DC/DC měničem a posléze je převést do baterií nebo kondenzátoru. Díky těmto bateriím je tak možno zátěž napájet i v případě, že není vnější energie dostupná.

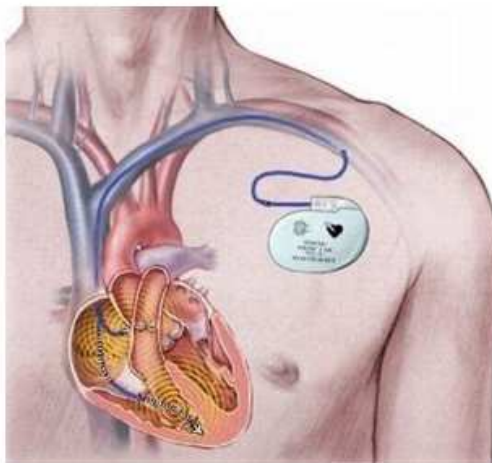
Energyharvesting systém postavený na termoelektrickém způsobu přeměny energie je jedním z mnoha způsobů získávání energie z vnějšího prostředí. Takovéto aplikace mohou distribuovat energii pouze ve chvíli, kdy je dostupný teplotní rozdíl, anebo v případě dodávání energie z baterií. Pro omezení šířícího se tepla se u termoelektrických baterií používají teplotně izolované struktury MEMS. Tyto systémy mohou pracovat již při malých rozdílech teplot, avšak tomu odpovídají i výstupní výkony v řádech μW a malé napětí. I tak je Energyharvesting obecně oblast s velkým potenciálem do budoucnosti.

Možným uplatněním systémů Energyharvesting může být například získávání energie z ústředního vytápění budov, klimatizace, tření v ložiscích.

4.5.5 Biomedicínská zařízení

Trendem ve světě biomedicínských zařízení je jejich neustálé vyvíjení a s tím spojené zmenšování aplikací. Po implementaci takovýchto zařízení mohou být pacienti odkázáni na neustálé monitorování svého zdravotního stavu - například osvobození od jinak nutného připojení na mimotělní přístroj. Lidské tělo nepřetržitě tvoří teplo o hodnotě zhruba 100W, které přechází do okolního prostředí vlivem proudění, vedení, záření a odpařování. Teplo vytvořené lidským teplem patří mezi nízkopotenciálové, avšak je dostačující pro některá biomedicínská zařízení. Ta lze klasifikovat jako implantáty a přístroje přizpůsobené k nošení.

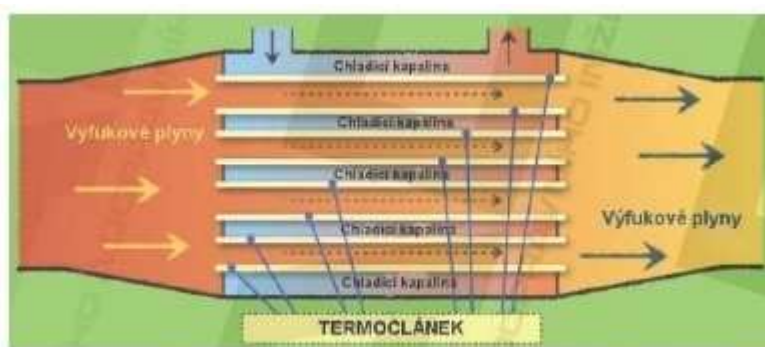
Přenosná zařízení monitorující fyziologické funkce pacienta jsou napájena mikrotermogenerátory, které generují výkon už od teplotního rozdílu $5^{\circ}C$. Pro provoz těchto zařízení je dostačující výkon zhruba $100 \mu W/cm^2$ a napětí 1V. U implantátů se termogenerátory využívají pro napájení defibrilátorů, zařízení pro monitorování hladiny glukózy, kardiostimulátorů a podobně. U takovýchto zařízení v lidském těle je však obtížné docílit vyšších teplotních rozdílů, proto jsou tyto termogenerátory schopny pracovat už od rozdílu $1^{\circ}C$ [19].



Obrázek 14 Biomedicínská zařízení [19]

4.5.6 Generátory v automobilech

Značné množství energie z paliva motoru v současné době odchází jednak výfukovými plyny, nebo chladicí soustavou bez využití. Jelikož zvětšující se množství elektroniky v automobilech klade značné nároky na množství energie, je její získávání pomocí termoelektrických generátorů zajímavým řešením při snižování spotřeby paliva. Vhodným místem pro použití těchto aplikací je výfukové potrubí nebo chladicí systém automobilu. Společnosti BMW se podařilo vyvinout termoelektrický generátor, který při rychlosti 130 km/h generoval výkon 200W. Cílem je však navýšení výkonu až na hodnotu 1kW. Termoelektrické generátory dokáží dodávat velké proudy, čehož lze využít pro nabíjení autobaterií. Úspora paliva, které je tímto možné docílit, je zhruba 5% [18].



Obrázek 15 Využití tepla ve výfukovém potrubí [23]

4.6 Způsoby montáže

Z hlediska výkonu termoelektrického generátoru je důležitá kvalita spojení jednotlivých modulů s chladičem a zdrojem tepla. Špatné upevnění se také může projevit ve spolehlivosti zařízení a jeho celkové životnosti. Moduly lze spojovat s okolím pomocí lepení, pájení či mechanicky. Lepení je omezeno maximálními pracovními teplotami lepidla, které se mohou pohybovat v rozmezí 150 -160 °C a to v závislosti na použitém lepidle. Pro vyšší teploty se využívá pájených spojení, které mají také efektivnější přenos tepla. U těchto spojení je třeba, aby teplota tavení pájky byla nižší než pájky použité ke spojení jednotlivých elementů uvnitř modulu.

Nejrozšířenějším způsobem spojování modulů s okolními součástmi jsou mechanické spoje pomocí šroubů. Pro co nejlepší přenos tepla se používá teplovodivá pasta, vyplňující prostor mezi oběma plochami. Mechanické spoje mají výhodu ve své rozebíratelnosti, což umožňuje snadnou údržbu. Ztrátám vytvořeným tepelnými mosty šroubových spojení zamezujeme použitím šroubů s nízkou tepelnou vodivostí a těsníci podložkami.

4.7 Životnost

Vzhledem k absenci pohyblivých částí mají termoelektrické generátory poměrně dlouhou životnost. Běžně se udává doba 10 a více let. Na životnost má velký vliv difúze pájky do materiálu polovodiče, což vede k jeho destrukci. Z toho důvodu je maximální provozní teplota nižší než teplota tavení pájky. Negativní vliv na fungování článku mají i rychlé změny teplot, které vlivem odlišných teplotních roztažností jednotlivých materiálů vytváří uvnitř článku mechanické pnutí. Dalším negativním faktorem jsou okolní vlivy, jako je vlhkost či špatné mechanické propojení s dalšími součástkami [18],[24].

4.8 Výrobci

Zde je přehled vybraných výrobců termoelektrických generátorů:

Crystal Ltd.	www.crystalltherm.com
CustomThermoelectric	http://www.customthermoelectric.com
EVERREDtronics Ltd.	http://www.everredtronics.com
greenTEGGmbH	http://www.greenteg.com
Hicooltec	http://www.hicooltec.com
Hi-Z Technology, Inc	http://www.hi-z.com
Kryotherm	http://www.kryothermtec.com
MarlowIndustries, Inc.	http://www.marlow.com
MicropeltGmbH	http://micropelt.com
PGI International, Ltd.	http://www.pgiint.com
RMT LTD	http://www.rmtltd.ru
Tecteg MFR	http://thermoelectric-generator.com
TEGMART	http://www.tegmart.com
Tellurex	http://tellurex.com
Termalforce	http://www.thermalforce.de
ThermonamicElectronicsCorp.,Ltd.	http://thermonamic.com

5. DC/DC MĚNIČE

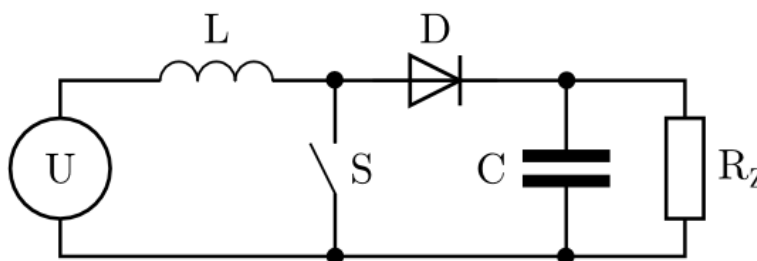
Napětí generované termoelektrickým generátorem je poměrně malé a v čase proměnné v závislosti na teplotním gradientu. Avšak napájený spotřebič vyžaduje konstantní hodnotu tohoto napájecího napětí. Tento problém nejčastěji řeší zvyšující DC/DC měniče. Ty přeměňují stejnosměrné napětí na stejnosměrné napětí jiné velikosti, jež požaduje napájené zařízení. Takovéto napětí lze snadno regulovat. Jestliže napájené zařízení ke svému chodu vyžaduje střídavé napětí, lze použít i DC/AC měniče. Konstrukčně lze tyto měniče rozdělit na galvanicky oddělené a neoddělené, kde jsou všechny části výstupního obvodu spojeny vodičem se vstupním obvodem. Měniče ukládají energii do součástek, jako jsou baterie a kondenzátory, z nichž se následně v případě potřeby energie opět uvolňuje [25]. V současné době se u DC/DC měničů nejčastěji ke spínání využívá tranzistor. Pro řízení spínání se u moderních konvertorů využívá pulsní šířková modulace. Ta má výhodu v lineárním řízení napájení zátěže. Parametrem pro pulsní šířkovou modulaci je střída.

$$s = \frac{t_{on}}{t} \quad (5.1)$$

s	[-]	střída
t_{on}	[s]	doba zapnutí signálu
t	[s]	perioda

Měnič zvyšující napětí

Jak už označení napovídá, tento měnič má na svém výstupu vyšší napětí než na svém vstupu a pracuje ve dvou cyklech. V prvním cyklu je tranzistor (spínač) sepnutý a proud prochází cívkou a tímto tranzistorem. Ve druhém cyklu je tranzistor rozepnutý. Na cívce se vlivem zániku magnetického pole obrátí polarita a ve chvíli, kdy přes ní prochází proud, se stává zdrojem energie a na zátěži je vyšší napětí, než je napětí vstupní [26].



Obrázek 16 Schéma zapojení měniče zvyšující napětí [26]

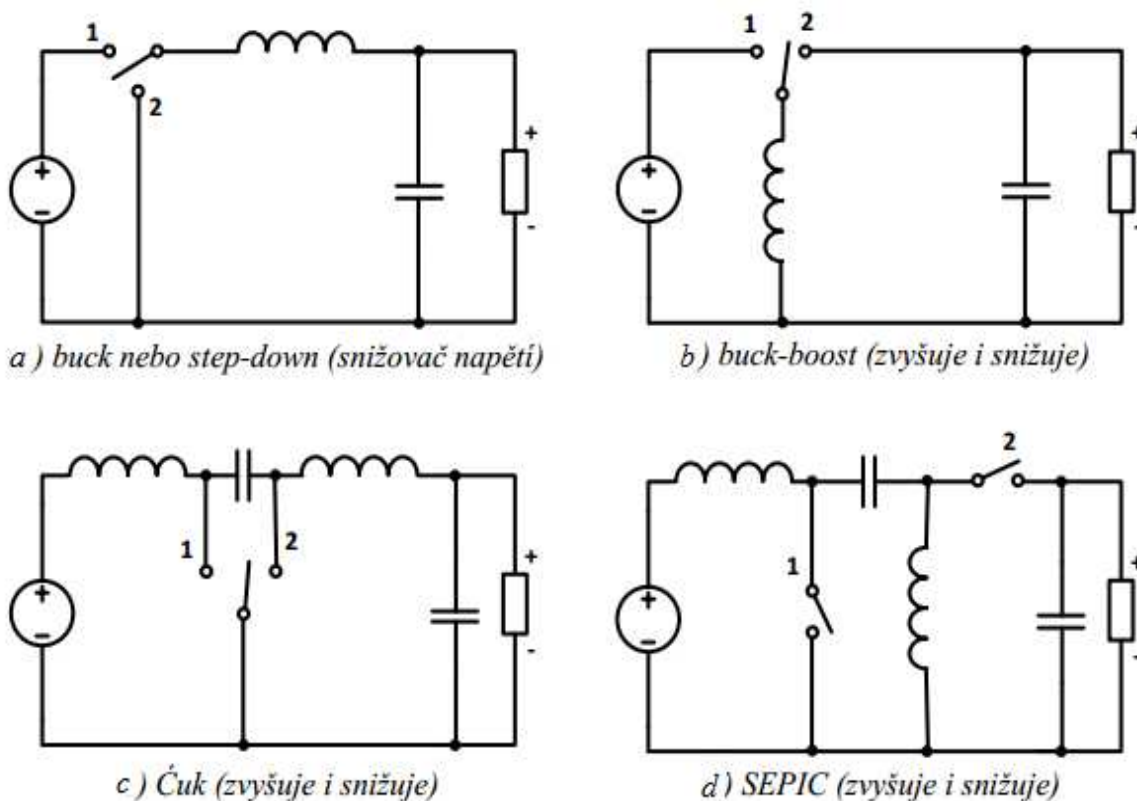
V případě ideálních součástek bude výstupní napětí určené dobou sepnutého a rozepnutého spínače. Jestliže frekvence střídání těchto dvou stavů je konstantní, je výstupní napětí určené střídou, což v případě vypnutého spínače znamená, že výstupní napětí je rovno napětí vstupnímu. Se zvyšující se střídou se zvyšuje i výstupní napětí, což dokládá následující vztah:

$$U_2 = \frac{1}{1-s} \cdot U_1 \quad (5.2)$$

U_1	[V]	vstupní napětí
U_2	[V]	výstupní napětí
s	[-]	střída

Často se zavádí zpětná vazba, aby bylo možno regulovat velikost střídy, a tím i velikost výstupního napětí. Účinnost takovýchto zařízení se pohybuje okolo 90% [26].

Existuje také několik dalších druhů DC/DC měničů. Každý typ je přizpůsoben podle požadavků napájené aplikace.



Obrázek 17 Schéma zapojení měniče napětí [25]

6. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Úkolem je návrh a realizace zařízení, které by umožňovalo změřit vlastnosti termoelektrického generátoru a zároveň by dokázalo dodávat elektrickou energii, například k nabíjení mobilního telefonu.

JEDNOTLIVÉ BODY PROBLÉMU

- Výběr TEG článku
- Mechanická konstrukce
- DC/DC měnič

6.1 Výběr TEG článku

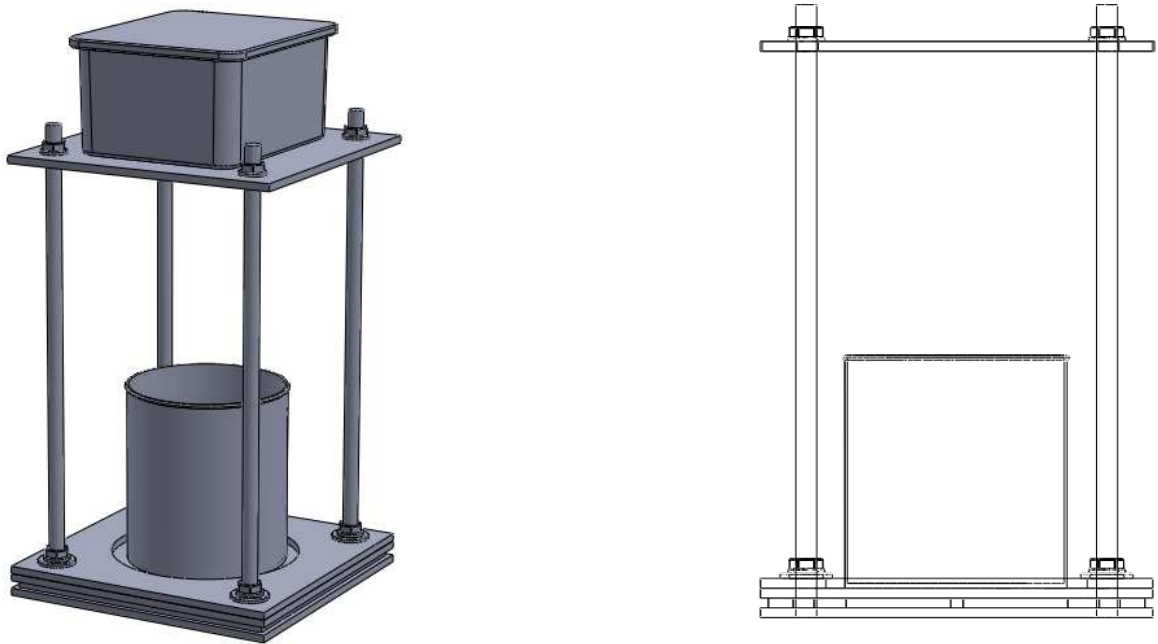
Nejdříve je třeba rozhodnout, který TEG článek bude měřen. Základním požadavkem na článek, s ohledem na dc/dc měnič, je jeho napětí. Ze široké nabídky v dnešní době celosvětově dostupných článků, byly nakonec vybrány dva články TEG 10W pro svoji dostupnost v České republice a také kvůli poměrně vysoké teplotě, se kterou dokáží pracovat. Článek je vytvořen na základě Bi-Te technologie, což mu umožňuje pracovat při teplotách až 330 °C stále a 400°C krátkodobě. Modul je na obou stranách opatřen tepelně vodivou grafitovou fólií, která má nízký tepelný odpor, takže není potřeba při instalaci použít teplovodivou pastu.

Tabulka 3 Parametry modulu

Teplota teplé strany	300°C
Teplota studené strany	30°C
Napětí naprázdno	8V
Optimální zatěžovací odpor	1,59Ω
Optimální výstupní napětí	4V
Optimální výstupní proud	2,4A
Optimální výstupní výkon	9,6W
Tepelný tok přes modul	188W
Hustota tepelného toku	11,8Wcm

6.2 Mechanická konstrukce

Požadavkem na mechanickou konstrukci jsou snadná a levná výroba a jednoduchá rozebíratelnost.



Obrázek 18 Návrh zařízení v programu SolidWorks

Podstava: Tvoří jí nerezový plech, na který jsou umístěny termoelektrické generátory. Tento plech bude sloužit jako absorbér tepla, který bude dále předávat teplé straně článků. Ze studené strany jsou články přitisknuty měděným plechem, který dobře odvádí teplo. Vzhledem k tomu, že tento měděný plech je relativně malé tloušťky, bude z horní strany přitlačován dalším krycím plechem, který zajistí, že měděný plech rovnoměrně dosedne na oba články. Tento krycí plech má uprostřed kruhový otvor, který zajistí styk hliníkové nádoby s chladicí kapalinou a přímo s měděným plechem. K podstavě jsou také připevněny další části konstrukce.

Izolace: Zařízení je navrhováno k využívání teploty - například na povrchu kotle na tuhá paliva. Tomu musí odpovídat i izolace okolo termoelektrických článků, která má zajistit, aby se články teplotně neovlivňovaly mezi sebou, a také aby nedocházelo k přenášení tepla ze spodní desky přímo do horní desky, což by zhoršovalo schopnost chlazení. Proto byla zvolena skelná vata, jejíž vlákna dokáží odolávat vysokým teplotám, pro tento účel zcela dostačujícím.

Nádoba: Požadavkem na nádobu s chladicí kapalinou je její dostatečná tepelná vodivost. Proto byl za materiál nádoby zvolen hliník, který by měl být schopen v dostatečné míře

odebírat teplo z měděné desky a předávat ho kapalině, kterou bychom měli být schopni ohřát pro různou potřebu.

Nadstavba: Do podstavy je připevněna nadstavba, na které je umístěn měnič napětí v uzavíratelném krytu, který má zajistit, že nedojde k mechanickému poškození měniče. Za nadstavbu je také možno celé zařízení uchopit a umístit ho mimo dosah zdroje tepla.

6.3 Měnič napětí

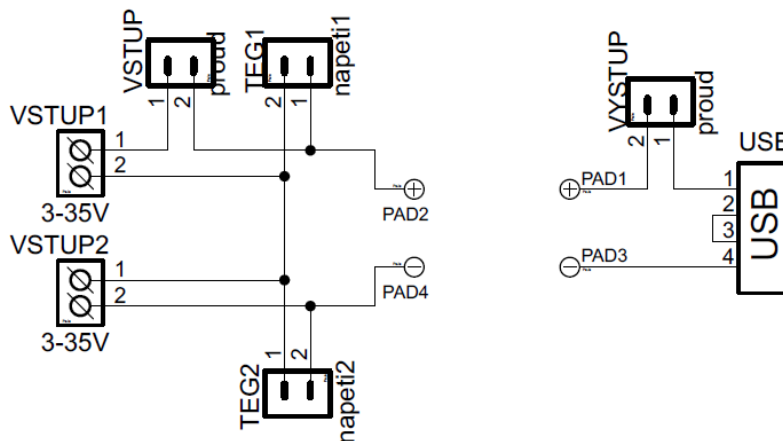
Kromě změření parametrů termoelektrických generátorů má zařízení také sloužit k nabíjení mobilního telefonu. Proto je třeba dosáhnout konstantního výstupního napětí 5V, které se k tomuto účelu používá. Toho dosáhneme použitím DC/DC měniče, který bude schopen pracovat v širokém rozmezí vstupního napětí v závislosti na napětí článků. Zvolen byl SEPIC měnič DC-DC pro svoji místní a cenovou dostupnost a své výhodné parametry.

Tabulka 4 Parametry měniče

Vstupní napětí	3-35 Vdc
Výstupní napětí	1,25-30Vdc
Výstupní proud	2A
účinnost	92%
frekvence	50KHz
Zvlnění výstupního napětí	40mV
Pracovní teplota	-40°C +85°C
rozměry	48x23x14 mm

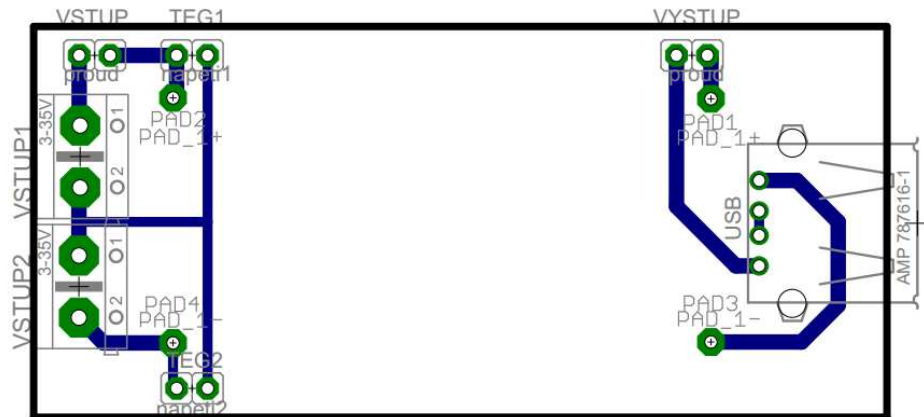
6.3.1 Návrh desky plošného spoje

Pro osazení DC/DC měniče je třeba vytvořit desku plošného spoje, která bude zajišťovat přívod energie od TEG článků a její následnou distribuci pro mobilní telefon.



Obrázek 19 Schéma zapojení obvodu s DC/DC měničem

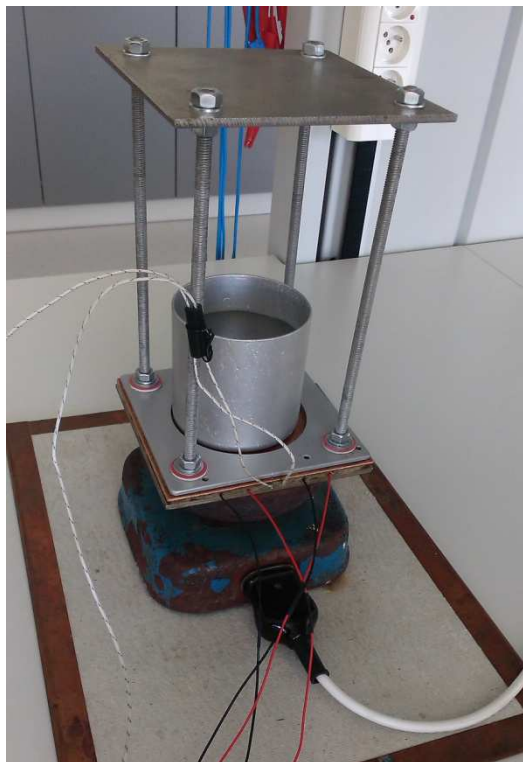
Předloha pro výrobu desky plošného spoje byla vytvořena v programu Eagle 5.11. Jako vstupní svorkovnice byla zvolena ARK2500R-A-2P, pomocí níž budou vodiče TEG článků připojeny k desce plošného spoje. Pomocí oboustranných kolíků S1G20 2,54mm zabudovaných do desky plošného spoje je možno na desce měřit vstupní napětí a proud. Uzavření obvodu bez připojeného ampérmetru zajišťuje zkratovací propojka JUMP-SW BLACK. Připojení desky plošného spoje s mobilním telefonem pak zajišťuje konektor USB1X90.



Obrázek 20 Předloha desky plošného spoje s DC/DC měničem

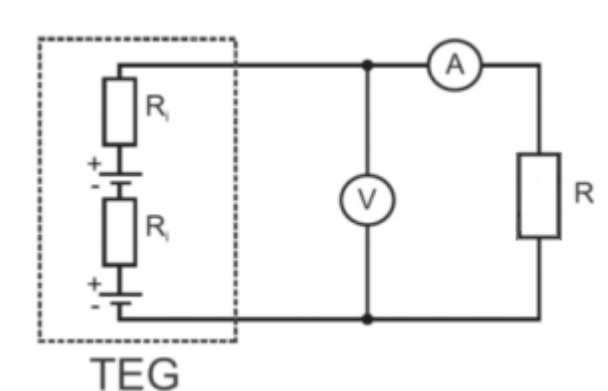
7. MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

Po složení zařízení bylo potřeba provést patřičná měření. Teplá strana byla ohřívána elektrickým vařičem a studená strana byla chlazena hrnkem se studenou vodou. Mezi oběma články byly na teplou a studenou stranu umístěny teplotní sondy typu "K" pro možnost zaznamenávání teploty.



Obrázek 21 Výsledné zařízení

Pro měření byla sestavena měřicí aparatura zahrnující multimetry pro měření napětí, teploty a proudu.



Obrázek 22 Schéma zapojení měření elektrických veličin

K měření byly použity tyto přístroje:

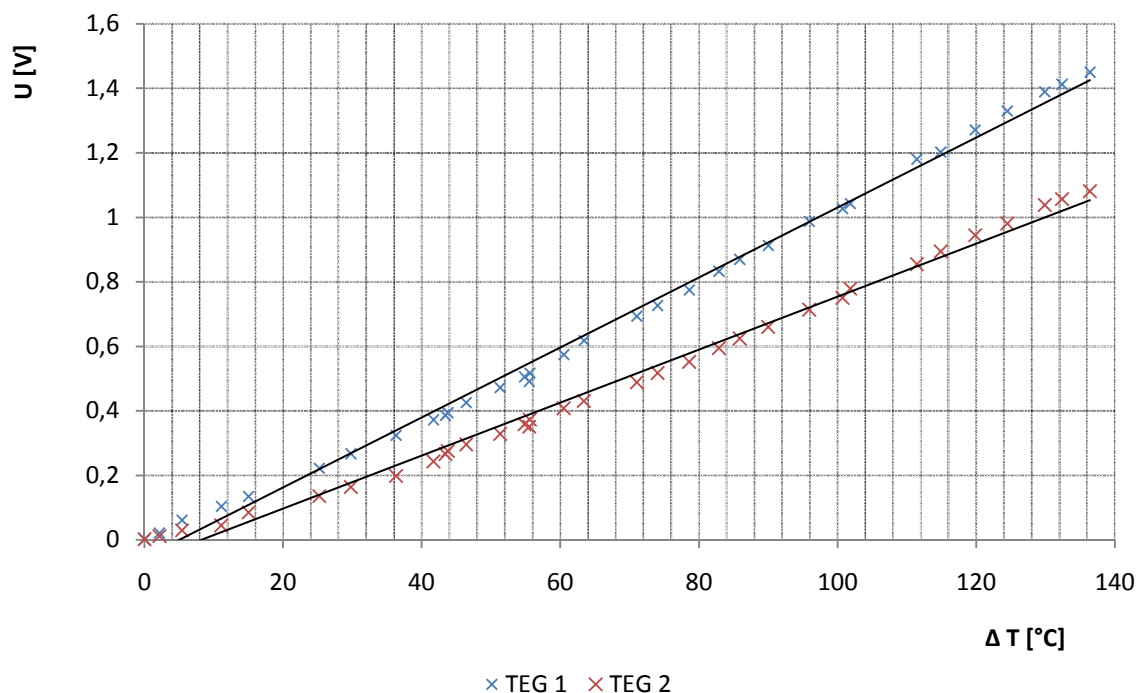
Tabulka 5 Seznam použitých přístrojů

Měřená veličina	Měřidlo	Označení
napětí	multimetr	UNI-T UT71A
napětí	multimetr	UNI-T UT71A
proud	multimetr	FK DMM890G
teplota	multimetr	APPA 109N
teplota	multimetr	APPA 109N

7.1 Grafické zpracování

7.1.1 Napětí na prázdko

První charakteristikou, která byla zjišťována, byla charakteristika na prázdko. Na spodní straně článku byla postupně zvyšována teplota a studená strana byla chlazena hrnkem s vodou. Ta se postupně ohřívala, a nebylo tedy možné udržovat konstantní hodnotu studené strany.



Obrázek 23 Napětí na prázdko

Z grafu je patrné, že napětí článků roste lineárně s rozdílem teploty. Rozdílnost obou napětí, může být způsobena nedostatečným přitlačením horního měděného plechu na článek TEG 2, nebo špatným tepelným spojením obou styčných ploch.

7.1.2 Výkon

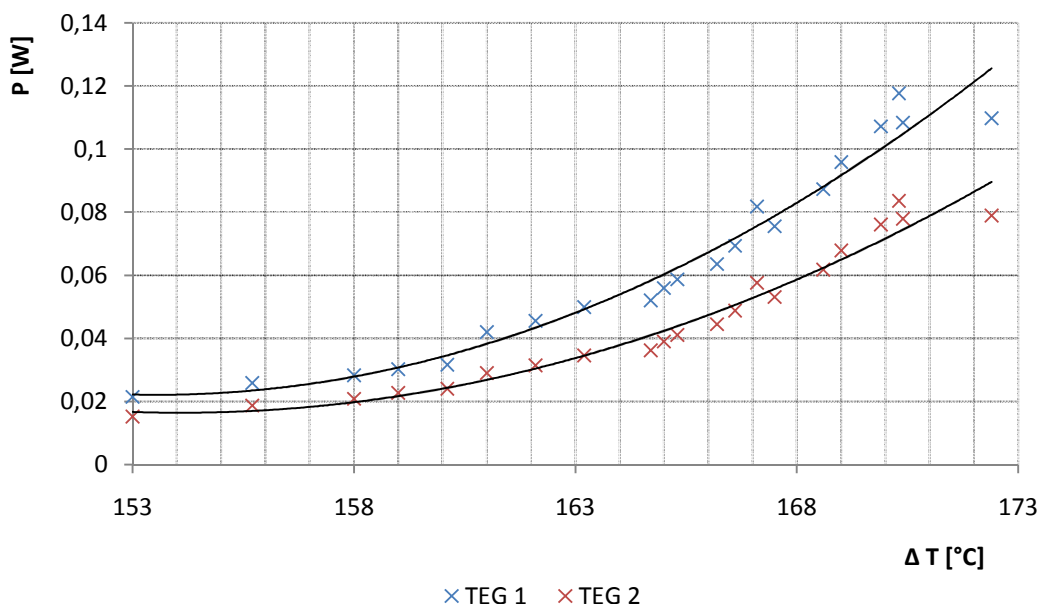
Dalšími měřeními parametry byly napětí a proud při zatížení DC/DC měničem s připojeným mobilním telefonem HTC Desire 500. Z těchto veličin pak byly zjištěny výkony jednotlivých článků. DC/DC měnič začne pracovat až při přibližné hodnotě 2,8 V vstupního napětí. Z tohoto důvodu muselo být na sériově spojených člancích dosaženo poměrně velkého teplotního rozdílu.

Výkon získaný z TEG článku zjistíme následovně:

$$P_2 = U \cdot I \quad (7.1)$$

U [V] napětí

I [A] proud



Obrázek 24 Výkon článků

TEG články lze považovat, díky jejich vlastnostem, za měkké zdroje napětí. Maximální výkon dodávají články v situaci, kdy je k nim připojena zátěž s odporem rovnajícím se vnitřnímu odporu těchto článků.

7.1.3 Účinnost

Ke zjišťování účinnosti byla použita metoda OPACKI. Tato metoda je popsána v normě ČSN 36 12 01 a používá se pro stanovení účinnosti při rozehvívání, ve stavu zatepla a pro určení průměrné účinnosti topidel. Vychází se z porovnání tepla nutného pro rozehvátí soustavy a tepla potřebného k odpaření určeného množství vody. Zaznamenávají se doby 1. až n-tého odparu do té doby než $t_n \approx t_{n-1}$.

Energie dodaná odporovému vaříči, který ohřívá sestavu, lze určit ze vztahu:

$$A = P \cdot t \quad (7.2)$$

P	[W]	příkon
t	[s]	čas

Potřebné teplo k odpaření daného množství vody zjistíme ze vztahu:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot c_s \quad (7.3)$$

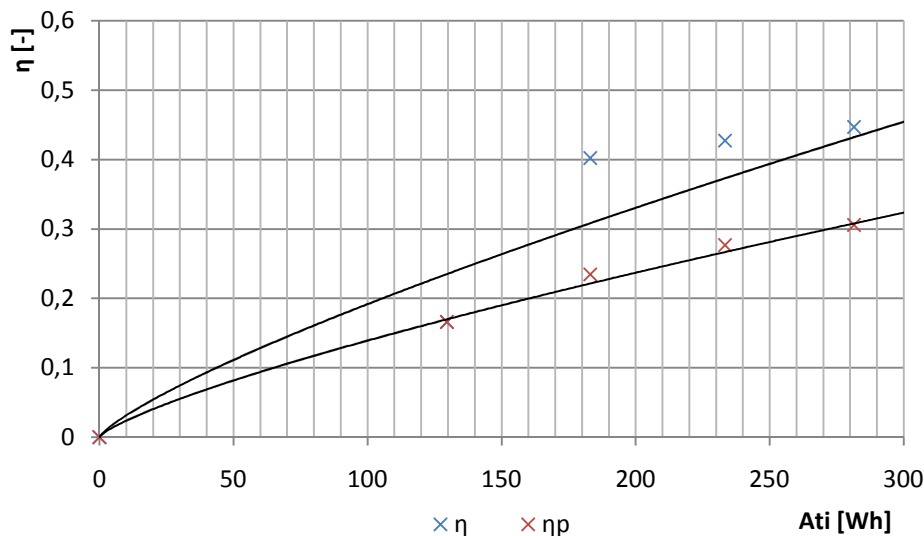
m	[kg]	hmotnost vody
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrné teplo vody $c = 4186 \text{ J·kg}^{-1}·\text{K}^{-1}$
ΔT	[K]	rozdíl teplot
c_s	[kJ·kg ⁻¹]	skupenské teplo vody $c_s = 2253 \text{ kJ·kg}^{-1}$

Účinnost systému je dána podílem těchto veličin:

$$\eta = \frac{Q}{A} \quad (7.4)$$

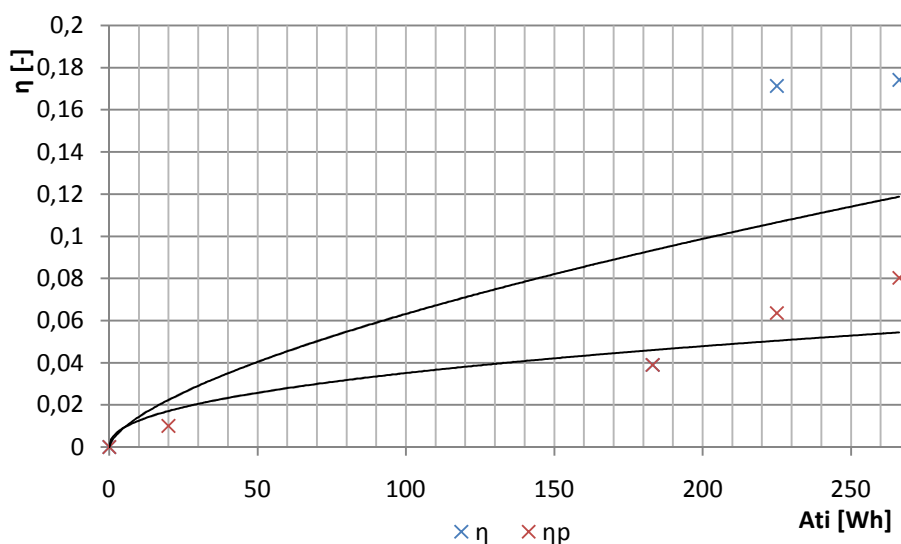
Pro zjištění účinnosti “za studena”, kdy začínáme měřit z klidového stavu, se bere v potaz čas do prvního odparu. Účinnost “za tepla” se pak určí z času potřebného k odparu při ustálené teplotě vaříče. V případě, že budeme ve výpočtu pracovat s celkovými hodnotami za čas t , bychom zjistili průměrnou účinnost za celý čas t .

Nejprve pomocí této metody byla zjišťována účinnost systému elektrický odporový vaříč – hrnek. Účinnost “za studena” činila 16,5%, “za tepla” 44,5% a průměrná účinnost 32,5%, což jsou hodnoty poměrně nízké. Způsobeno je to malou plochou a nerovnostmi dna hrnku, které nepokrývá celou plochu plotýnky vaříče.



Obrázek 25 Účinnost vařič – hrnek

Poté byla zjišťována účinnost systému elektrický odporový vařič – zařízení – hrnek. Účinnost “za studena“ činila 4%, “za tepla“ 17,5% a průměrná účinnost 8%. Průměrná účinnost systému vařič – zařízení – hrnek je tedy zhruba čtvrtinová oproti průměrné účinnosti systému vařič – hrnek. Je to způsobeno malou plochou termoelektrických modulů, přes které přestupuje teplo z teplé desky a přes měděný plech a dno hrnku je odevzdáno vodě a také měděným plechem, který rozvádí teplo převzaté od modulů uprostřed zařízení k okrajům mimo plochu dna hrnku. Možností, jak zvýšit účinnost, je tedy zvětšení plochy termoelektrických modulů přidáním dalších modulů.



Obrázek 26 Účinnost vařič – zařízení – hrnek

Účinnost termoelektrického generátoru byla zjištěna ze vztahu:

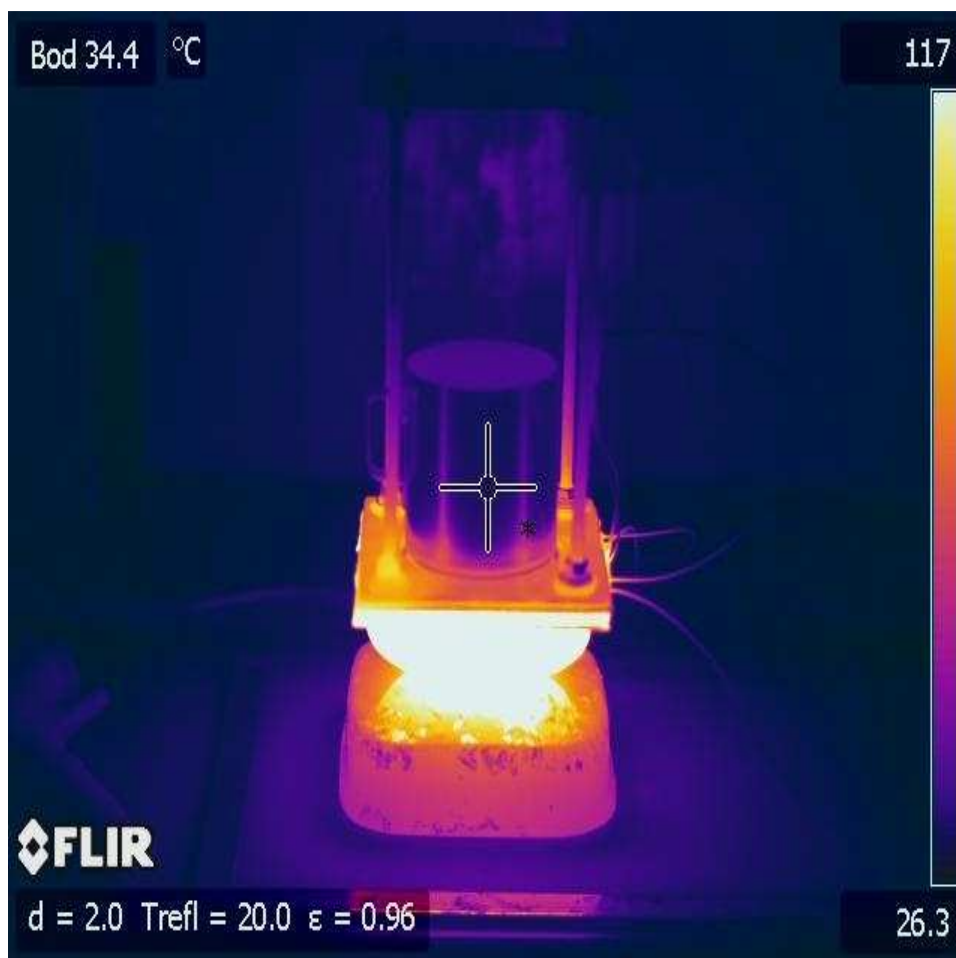
$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_H - T_C}{2}} - 1}{\sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_H - T_C}{2}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (7.5)$$

T_H	[K]	teplota teplé strany
T_C	[K]	teplota studené strany
Z	[K ⁻¹]	merit

Tabulka 6 Naměřené a vypočtené hodnoty

Th [K]	Tc [K]	ΔT [K]	ZT [-]	η [%]
297,05	297,05	0,00	0,00	0,00
303,65	298,25	5,40	0,01	0,00
316,65	301,65	15,00	0,02	0,03
328,15	302,95	25,20	0,04	0,08
341,65	305,35	36,30	0,06	0,15
361,65	315,25	46,40	0,07	0,24
372,15	316,65	55,50	0,09	0,33
387,15	326,65	60,50	0,09	0,38
406,65	332,65	74,00	0,12	0,54
426,15	340,25	85,90	0,13	0,70
443,15	347,25	95,90	0,15	0,84
458,15	356,35	101,80	0,16	0,92
470,65	358,25	112,40	0,18	1,09
483,15	363,15	120,00	0,19	1,21
503,15	374,15	129,00	0,20	1,34
511,15	377,15	134,00	0,21	1,42
533,15	390,15	143,00	0,22	1,54
553,15	402,15	151,00	0,24	1,65
576,15	414,15	162,00	0,25	1,82

Nejvyšší dosažená účinnost modulů činí 1,82 %. Připočteme-li účinnost těchto dvou článků k průměrné účinnosti ohřevu vody, dostaneme celkovou účinnost zařízení, která dosahuje zhruba hodnoty 11,6%.



Obrázek 27 Pohled na zařízení pomocí termokamery

8. ZÁVĚR

V této práci byly nastíněny principy fungování termoelektrických článků, které mohou přeměňovat tepelnou energii na elektrickou, využívané materiály, konstrukce a jejich vlastnosti. Podstatou těchto článků je využívání tzv. Seebeckova jevu, kdy při rozdílu teplot na jeho stranách vzniká elektrické napětí a do připojené zátěže prochází proud. Výkon, který jsme schopni takto získat, závisí na pracovních teplotách a materiálech, které použijeme. Největšího výkonu dosáhneme, bude-li se vnější odpor zátěže rovnat vnitřnímu odporu článku. V opačných případech bude docházet ke ztrátám a výkon se bude snižovat. Výkon je také závislý na druhé mocnině rozdílu teplot na článku, což je vlastnost, která komplikuje jeho využití stejně tak, jako relativně nízká účinnost, která se pohybuje v řádech jednotek procent. Výhodou těchto článků však je absence pohybujících se částí, celková jednoduchost a spolehlivost, což má za následek jejich dlouhou životnost. V práci byly nastíněny některé aplikace se zajímavým potenciálem do budoucnosti, jejichž význam se bude zvyšovat se zvyšující se účinností materiálů a s tím jak se bude klást větší důraz na využívání obnovitelných zdrojů energie. Dále byl vytvořen přehled dnes dostupných termoelektrických generátorů s jejich vlastnostmi a cenou. Praktická část se zabývala návrhem zařízení k nabíjení mobilního telefonu pomocí termoelektrického generátoru. Zařízení bylo koncipováno jako přenosné a určené k využití tepla na povrchu kamen na tuhá paliva. Kvůli nízkému výstupnímu napětí i při značných teplotních diferencích musely být použity dva generátory a k nim uzpůsoben měnič napětí. I přesto byl výstupní výkon relativně malý. Možností, jak jej zvýšit, je přidání dalších článků, čímž by se zároveň zvýšila celková účinnost celého zařízení, což by ale vyžadovalo zásah do konstrukce, která by mohla přejít do podoby hrnce s dvojitým dnem, ve kterém by byly uloženy tyto termočlánky.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ROWE, D.M. *Thermoelectrics handbook: Macro to nano*. 2006.
- [2] ČERMÁK, P. *Elektrina přímo z tepla*. [online]. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://3pol.cz/888-elektrina-primo-z-tepla>
- [3] GOLDSMID, H.J. *Introduction to Thermoelectricity*. 2009. SpringerSeries in Materials Science. ISBN 978-3-642-00716-3.
- [4] ROWE, D.M. *CRC Handbook of Thermoelectrics*.
- [5] LI, M., X. SHAOHUI, Q. CHEN a L. ZHENG. *Thermoelectric-Generator-Based DC–DC Conversion Networks for Automotive Applications*. 2011. Journal of Electronic Materials. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11664-011-1557-5>
- [6] FAIRBANKS, J. *Thermoelectric applications in vehicles status 2008*. [online]. 2008 [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW: <http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>.
- [7] VAŠÍČEK, Radek. *Termofyzikální vlastnosti* [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupný z WWW: http://ceg.fsv.cvut.cz/misc/jirka/vyuka/lpg/tepelne_vyber_%20cz.pdf
- [8] GODART, C., GONÇALVES A., LOPES. E.B., VILLEROY. B., *Role of Structures on Thermal Conductivity in Thermoelectric Materials* [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW http://projects.itn.pt/Thermoelectric_EBLopes/RoleStruct_Nato.pdf.
- [9] VOVES, Jan. *Fyzika polovodičových součástek*. ČVUT, 1997, ISBN 80-01-01684-6.
- [10] FRANK, H. *Fyzika a technika polovodičů: celost. vysokošk. učebnice pro vys. školy techn., stud. obor. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990.*
- [11] MUSIL, VLADISLAV. *ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY*. BRNO: VUTIUM, 2005, ISBN 80-214-2627-6.
- [12] ŘEZŇÁK, L. *Fyzika polovodičů*. In: [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z: <http://www.trunky.cz/bp/fypolo/data/2-3.pdf>
- [13] SYNDER, J. *Thermoelectrics: The Science of Thermoelectric Materials* [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW: <http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics>
- [14] *Thermoelectric: HANDBOOK*. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=5016>.
- [15] *Encyklopedie fyziky: Peltierův jev*. [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [16] GOFROŇ, V. *Použití peltierova článku pro řízení teploty* [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2013/BP_Gofron.pdf
- [17] *Peltierovy termobaterie 2*. [online]. [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie-2.html>
- [18] BRÁZDIL, M. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie* [online]. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43013

- [19] LOKAJ, J. *Termoelektrický generátor malého výkonu* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67162
- [20] KOZÁK, J. *Termoelektrický generátor* [online]. BRNO, 2011 [cit. 2014-11-20]. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42227.
- [21] ZUZÁŇÁK, L. Chlazení počítače pomocí Peltierova článku. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://rn.itmoov.eu/chlazení-pocitace-pomoci-peltierova-clanku/>
- [22] HUSÁK, M. Mikroelektronické zdroje energie z okolí – Energyharvesting. In: [online]. FEL ČVUT v PRAZE [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/media/pdf/ukazky/vyvoj_1302.pdf
- [23] DOBIÁŠ, J. *Využití nízkopotenciálních zdrojů tepla v elektroenergetice* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011 [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39801
- [24] Tellurex: FrequentlyAskedQuestionsAboutOurPowerGeneration Technology. [online]. 2010 [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <http://tellurex.com/wp-content/uploads/2014/03/seebeck-faq.pdf>
- [25] ŠTETINA, J. *Termoelektrický generátor* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52958
- [26] SLINTAK, V. DC/DC měniče. In: [online]. [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://uart.cz/952/dc-dc-menice/>
- [27] SANO, S, H MIZUKAMI a H KAIBE. *DevelopmentofHigh-EfficiencyThermoelectricPowerGenerationSystem* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/152-05_E.pdf