

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Elektronika a komunikace

Katedra mikroelektroniky



Analýza termoelektrických článků pro napájení v biomedicíně

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Matěj Hašek
Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hašek** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **492020**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza termoelektrických článků pro napájení v biomedicině

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of Thermoelectric Batteries for Power Supply in Biomedical Engineering

Pokyny pro vypracování:

1. Poved'te analýzu současného stavu využití termoelektrických baterií pro napájecí účely v biomedicině.
2. Analyzujte základní elektrické vlastnosti termoelektrických baterií, informace vyhodno'tte formou charakteristik. Pozornost věnujte zejména parametrům při minimálních teplotních rozdílech, zatížitelnosti, výkonu na výstupu apod.
3. Navrhněte možnost využití pro nabíjení mikrobaterií nebo superkapacitoru s možností využití pro senzorová měření, popř. bezdrátové vysílání dat.

Seznam doporučené literatury:

1. Husák, M., Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem – I, DPS Elektronika od A do Z, 2013/č. 5, ISSN: 1805-5044.
2. Husák, M., Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem – II, DPS Elektronika od A do Z 2013/č. 6, ISSN: 1805-5044.
3. Husák, M., Piezoelektrické mikro- a nanogenerátory, DPS Elektronika od A do Z 2014/č. 1, ISSN: 1805-5044.
4. Husák, M., Napájecí management piezoelektrických mikrogenerátorů, DPS Elektronika od A do Z 2014/č. 4, ISSN: 1805-5044.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a všechny použité podklady (literatura, katalogové listy, atd.) jsem svědomitě uvedl v níže přiloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Matěj Hašek

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za obrovskou podporu a speciální poděkování patří panu Alexandru Gregorovi za poskytnutí prostor pro práci.

Matěj Hašek

Abstrakt

Tato práce se věnuje problematice energy harvesting za pomoci termo-elektrického principu. Zaměření je zejména na využití tohoto principu na sběr energie z povrchu lidského těla. Získávání elektrické energie pomocí tělesné teploty lze využít k napájení lékařských zařízení či senzorů. Progres zažívá také možnost uložení této energie pro budoucí využití, popřípadě pro napájení obvodů, pokud není přístupný primární zdroj. V textu je uvedeno porovnání čtyř termoelektrických článků pomocí měření jejich parametrů. Následně je TEG-127020 použit pro napájení obvodu zaměřeného na efektivní využití získané energie a k jejímu následnému ukládání do superkapacitoru.

Klíčová slova - Energy harvesting, termoelektrický princip, termočlánek, vhodnost užití termočlánků, obvod pro management energie, superkondenzátor

Abstract

This publication focuses on problematic of thermoelectric energy harvesting. The main point is using of this principle to harvest energy from the human body skin. Body heat energy harvesting can be used as a power supply of medical equipment or sensors. Progress could be seen in saving this energy in small power banks and using them as a source, when primary source is not available. Text includes comparison of four thermoelements by measurement of their specifications. Then the TEG-127020 is used as a source for a special circuit that focuses on using harvested energy effectively.

Keywords - Energy harvesting, thermoelectric principle, thermoelement, figure of merit, energy management circuits, supercapacitor

Obsah

Obsah	1
Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	5
Seznam použitých zkratk a symbolů	6
1 Energy harvesting	7
1.1 Základní informace a motivace	7
1.2 Typické metody	8
1.2.1 Zdroje světla	8
1.2.2 Zdroje pohybu	9
1.2.3 Zdroje tepla	9
1.2.4 Porovnání metod	10
1.3 Základní architektura	11
2 Termoelektrické generátory	12
2.1 Základní princip termoelektrického článku	12
2.1.1 Seebeckův jev	12
2.2 Složení a funkce termoelektrických generátorů	13
2.2.1 Funkce termoelektrických generátorů	13
2.2.2 Náhradní obvod pro termoelektrický generátor	14
2.3 Vhodnost jednotlivých termoelektrických generátorů pro různé aplikace	16
2.4 Termočlánky pro malé teplotní rozdíly	18
2.4.1 Teplota lidského těla a okolí	18
2.4.2 Energy harvesting z lidského těla	19
3 Management energie	20
3.1 Strategie	20
3.2 Obvody pro management energie	20
3.2.1 LTC3108	20
3.2.2 LTC3109	22
4 Způsoby ukládání energie	24
4.1 Akumulátory	25
4.2 Superkondenzátory	26
5 Komerční aplikace	28
6 Biomedicínské aplikace	30
7 Analýza základních elektrických vlastností termoelektrických baterií	32
7.1 Výběr termoelektrických článků	32
7.1.1 Zvolené generátory	32

7.2	Měřicí metoda pro hodnocení vlastností zvolených termoelektrických baterií	34
7.2.1	Měřicí zařízení	34
7.3	Měření na termoelektrických bateriích	37
7.3.1	Teplota teplého konce	37
7.3.2	Další nastavení aparatury pro měření	37
7.4	Dosažené výsledky	39
7.4.1	TEC1-12707	39
7.4.2	TEC1-071080	43
7.4.3	TEG-127009	47
7.4.4	TEG-127020	50
7.5	Vyhodnocení výsledků	54
8	Návrh obvodu pro management a ukládání získané energie, jeho realizace a testování na těle	56
8.1	Návrh	56
8.2	Tvorba DPS	57
8.3	Testování na lidském těle a měření	57
9	Návrh dalších vylepšení	60
10	Závěr	60
	Literatura	61
	Přílohy	64

Seznam obrázků

1	Schéma možností získávání energie z okolí [22]	8
2	Blokový diagram struktury systému energy harvesting [4]	11
3	Seebeckuv jev [25]	12
4	Základní stavební kámen termoelektrického generátoru [4]	13
5	Termoelektrický generátor, a) detail propojení termoelektrických článků, b) jeden termoelektrický článek [24]	14
6	Náhradní schéma zapojení pro termočlánek z obrázku 4 [4]	15
7	Závislost bezrozměrného ZT na teplotě [3]	16
8	Závislost bezrozměrného ZT na teplotě [4]	17
9	Termoelektrický generátor ve tvaru pyramidy [3]	17
10	Termoelektrický generátor ve tvaru čtverce [3]	18
11	Blokové schéma integrovaného obvodu LTC3108 [2]	21
12	Typické zapojení LTC3108 pro napájení bezdrátového senzoru [2]	22
13	Blokové schéma integrovaného obvodu LTC3109 [13]	23
14	Typické zapojení LTC3109 pro napájení bezdrátového senzoru [13]	23
15	Graf porovnání úložišť získané energie [4]	25
16	Schéma baterie [4]	25
17	Schéma elektrolytického kondenzátoru [4]	26
18	Náhradní modely superkapacitoru. a) R-C model, b) model svodového odporu [12]	27
19	Hodinky Citizen Eco-Drive (vlevo) a Seiko Thermic (vpravo) [3]	28
20	Prototyp termoelektrického generátoru [9]	28
21	Termoelektrický generátor navržený skupinou Ziyang Wanga [26]	29
22	Model integrování termoelektrického generátoru do bezdrátového sluchátka [1]	29
23	Oximetr [18]	30
24	Senzor pro sběr dat během spánku [18]	30
25	Schéma E-skin napájené pomocí teploty lidského těla [17]	31
26	Model měřicího systému	34
27	Ohřívač tvořený výkonovými rezistory	36
28	Porovnávání hodnot PT100 a měřicí sondy k multimetru	36
29	Měření teploty zápěstí	37
30	Testovaný článek TEC1-12707	38
31	Schéma zapojení měřicího obvodu vytvořené v programu Scheme-it (https://www.digikey.cz/schemeit)	38
32	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro různé teplotní rozdíly baterie TEC1-12707	39
33	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-12707	40
34	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEC1-12707	40
35	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEC1-12707	41
36	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-12707	42

37	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-12707	42
38	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-071080	43
39	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-071080	44
40	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEC1-071080	44
41	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEC1-071080	45
42	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-071080	46
43	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-071080	46
44	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127009	47
45	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127009	47
46	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu U_{out} pro baterii TEG-127009	48
47	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEG-127009	48
48	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127009	49
49	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127009	50
50	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127020	51
51	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127020	51
52	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEG-127020	52
53	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEG-127020	52
54	Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127020	53
55	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127020	54
56	Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterie TEG-127009 a TEG-127020	55
57	Model DPS vytvořený pomocí programu Autocad Fusion 360	57
58	TEG s hliníkovým chladičem	58
59	LED připojená na výstup obvodu	58
60	Graf nabíjení superkondenzátoru	59
61	Schéma zapojení	64
62	Deska plošného spoje z vrchní strany	64
63	Deska plošného spoje ze spodní strany	65

Seznam tabulek

1	Typická data pro zdroje Energy harvesting [15]	10
2	Tabulka typických hodnot pro akumulátory a superkondenzátory [12]	24
3	Parametry TEC1-12707	32
4	Parametry TEC1-071080	33
5	Parametry TEG-127020	33
6	Parametry TEG-127009	33
7	Hodnoty R_{in} pro baterii TEC1-12707	41
8	Hodnoty R_{in} pro baterii TEC1-071080	45
9	Hodnoty R_{in} pro baterii TEG-127009	49
10	Hodnoty R_{in} pro baterii TEG-127020	53

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Vysvětlení	Jednotka
U	Napětí	(V)
ΔU	Změna napětí	(V)
U_0	Napětí na prázdno	(mV)
U_{out}	Výstupní napětí	(mV)
I_{out}	Výstupní proud	(mA)
$I_{\text{nab.}}$	Nabíjecí proud superkondenzátoru	(mA)
α	Seebeckův koeficient	(V/K)
α_a	Seebeckův koeficient materiálu A	(V/K)
α_b	Seebeckův koeficient materiálu B	(V/K)
T_h	Teplota teplého konce	(°C)
T_c	Teplota studeného konce	(°C)
ΔT	Rozdíl teplot na obou koncích	(°C)
R_{load}	Odpor zátěžového rezistoru	(Ω)
R_{in}	Vnitřní odpor termoelektrického článku	(Ω)
P_{out}	Výstupní výkon	(mW)
ZT	Figure of merit	(-)
η	Účinnost	(-)
C_{store}	Kapacita superkondenzátoru	(μF)
t_{cold}	Čas pro nabití výst. kondenzátoru při studeném startu	(s)
t_{store}	Čas potřebný pro nabití superkondenzátoru	(h)
W	Energie uložená na kondenzátoru	(mJ)
$W_{20\text{min}}$	Energie uložená na superkondenzátoru za 20 minut	(mJ)
W_{full}	Energie uložená na superkondenzátoru při plném nabití	(mJ)
Zkratka	Vysvětlení	
AC	Alternating current - střídavý proud	
DC	Direct current - stejnosměrný proud	
CO ₂	Oxid uhličitý	
Bi ₂ Te ₃	Tellurid bismutitý	
NiMH	Nikl metal hydridová baterie	
NiCd	Nikl kadmiová baterie	
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	
Li-ion	Lithium iontová baterie	
Li-pol	Lithium polymerová baterie	
EEG	Elektroencefalografie	
EOG	Elektrookulogram	
EMG	Elektromyogram	
IoT	Internet věcí	
ECG	Elektrokardiogram	
TEG	Termoelektrický generátor	
TEC	Termoelektrický chladič	

1 Energy harvesting

1.1 Základní informace a motivace

Metody typu energy harvesting se dostávají stále více do popředí zájmu odborníků a dalšího vývoje. Ve společnosti roste stále více zájem o to dělat věci co nejvíce "zeleně" a s malou uhlíkovou stopou. Na světě ale existují již velmi dlouho velké a efektivní generátory elektrické energie. Proč by se tedy společnost zabývala získáváním malého množství energie?

Koncept této metody je poměrně prostý a přímočarý. Pokud se rozhlédneme kolem sebe, najdeme spoustu míst, kde téměř vyvěrá energie, která je nevyužitá. V okolí existuje velké množství zdrojů, které vyzařují energii do okolí, kde se ztrácí bez jakékoliv snahy ji dále použít. To je přesně to, co energy harvesting dělá.

Slovo harvesting znamená v českém jazyce sběr. Princip je tedy založen na sběru zbytkové a volně dostupné energie z okolí. Tato energie je pak nejčastěji, ale ne nutně, přeměněna na energii elektrickou. Takovou energii můžeme pak následně dobře využít. Za okolní zdroj můžeme považovat teplo, světlo nebo například pohyb. Dá se tedy říct, že jde o obnovitelné zdroje [4].

Oproti velkým generátorům dokáží takovéto zdroje vytvořit pouze nepatrné množství energie. Účinnost těchto zdrojů není příliš vysoká. Ne na všech místech na světě mají lidé takové štěstí, aby měli poblíž elektrárnu, která je bude neustále zásobovat elektrickou energií. Jsou pro ně tedy alternativní zdroje energie naprosto krucióální. Další věc je ta, že existuje velké množství aplikací, které vyžadují napájení, nicméně je složitější je napájet ze sítě [3].

S vývojem technologií, součástek a všeho okolo dochází v posledních letech k tomu, že nutný příkon pro určité aplikace oproti dřívějšímu klesá. Naopak účinnost generátorů pro energy harvesting stoupá. Docházíme tedy do stavu, kdy je výkon generovaný těmito metodami dostačující pro napájení oněch aplikací. Vznikají tak nové možnosti pro vývoj a tvorbu autonomních systémů.

Jelikož i s vývojem dokážeme generovat energii pouze v malém měřítku, je nutné s tím dále rozumně nakládat. Pokud se rozhodujeme o použití této metody, vyplatí se si položit několik následujících zásadních otázek:

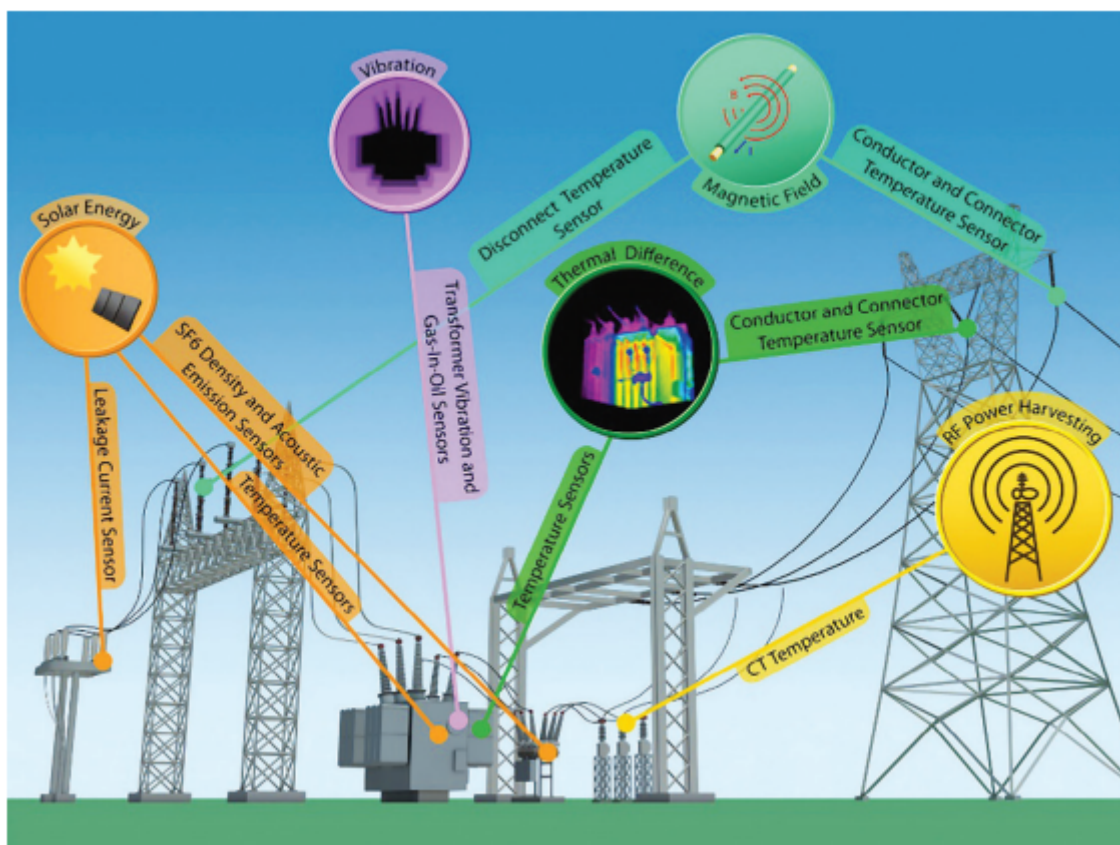
- Je zdroj stále dostupný?
- Mění se intenzita?
- Jde o efektivní řešení v poměru cena/výkon?
- Jaký způsob těžby energie je pro napájení dané aplikace nejvhodnější?

Pokud jsme schopni se rozhodnout podle otázek, že je pro dané využití energy harvesting dobrá volba, je pak na snadě přemýšlet o tom, jakou z metod zvolíme. Každá z metod nachází své uplatnění na trochu jiném místě. Každá má také trochu jinou účinnost za daných podmínek.

1.2 Typické metody

Metody, které energy harvesting využívá nejsou vůbec nové. Jde o principy, které jsou známy již poměrně dlouhou dobu, jen zde našly další efektivní využití. Jak již bylo řečeno, metody nemají velkou účinnost. Účinnost je také podmíněna určitými podmínkami. Je nutné zvážit umístění aplikace.

V kapitole 1.1 je uvedeno, že za zdroj můžeme považovat například teplo, světlo či pohyb, popřípadě energii okolních antén. To lze vidět také v obrázku. Je jasné, že při aplikaci venku bude sběr energie ze slunce efektivnější než ostatní metody. Při použití uvnitř bude situace ale úplně jiná. Vhodnost tedy není jednoduché generalizovat. Navíc různé aplikace vyžadují různé řešení konceptu generátoru [4].



Obrázek 1: Schéma možností získávání energie z okolí [22]

1.2.1 Zdroje světla

Při sběru energie ze světla se využívá dobře známých solárních článků poskládaných do solárních panelů. Jako hlavní zdroj světla je přirozeně slunce.

Jev, díky kterému je tohle všechno možné, se nazývá fotoelektrický jev. Jde o způsob sběru energie, který je už nějakou dobu na výsluní. Je to asi nejpoužívanější princip v současné době. Jde také o metodu, která má při správném použití největší účinnost a dokáže generovat největší energii.

Poskytuje přímou přeměnu světla na elektrinu. Články jsou tvořeny polovodičovou strukturou. Samotná přeměna energie neprodukuje žádné emise.

Nevýhodou je, že světlo není přístupné pořád. Slunce také není na obloze na stejném místě po celý den ani rok. Ideální by bylo panel za sluncem natáčet, tím by

ale klesala účinnost celého systému. Panely jsou tedy nastaveny určitým směrem a v určitém vertikálním úhlu. V našich oblastech se nejčastěji využívá celoročně nastavení 45° vertikálně[23].

1.2.2 Zdroje pohybu

Pohyb je zdroj energie s obrovským potenciálem. Každý se denně pohybujeme. Věci okolo nás se každý den pohybují. Nemusí přitom jít pouze o pohyb jako je například chůze. Často a velmi efektivně se využívá například vibrací.

Jako metoda pro přeměnu pohybu či vibrací na elektrickou energii se používá piezoelektrického jevu. Pokud krystaly mechanicky namáháme, objevuje se u nich elektrická polarizace. Náboj, který generujeme namáháním, lze ukládat pro budoucí využití.

Tento způsob generování energie se používá poměrně hojně. Nachází uplatnění v komerčních využitích či pro sensorové aplikace. Obdobně jako u přechodného způsobu nevznikají při přeměně emise. Na rozdíl od 1.2.1 průběh generované energie v čase tvoří špičky. Tedy ke generaci dochází pouze při deformaci, průběh je mnohem méně hladký než v minulém případě [5].

Senzory je například možné vpravit do nanotechnologie či do textilu a generovat energii přímo z lidského těla. Uplatnění lze najít také v medicíně. Například jako zdroj napájení kardiostimulátoru [4].

1.2.3 Zdroje tepla

Další možný zdroj je teplo. V našem okolí existuje obrovské množství objektů vyzařujících teplo, které není nijak využito. Stroje, přístroje ani jiná zařízení nikdy nepracují se stoprocentní účinností. Ztráty jsou často vyzařovány právě ve formě tepla.

Nejde ovšem jen o stroje. Tepelný zdroj může být také například paprsek slunce dopadající na zemský povrch, může to být rozpálený komín vlivem vytápění místností nebo třeba horký výfuk auta při běhu motoru.

Jako trvalý a prakticky nevyužitý zdroj tepla můžeme považovat také lidské tělo. To si udržuje poměrně stálou teplotu na povrchu kůže. Lze ho tedy považovat za poměrně konstantní zdroj tepelné energie [24].

Pro přeměnu energie tepelné na energii elektrickou se využívá metoda termoelektrického jevu. Tento jev se častěji nazývá jako jev Seebeckův. Jde v podstatě o inverzní Peltierův jev [19].

Jako zařízení pro konverzi oněch dvou energií se používá zařízení nazvané termoelektrický článek. Termočlánky jsou základní stavební kameny celých termoelektrických generátorů. Termočlánek má polovodičové složení [4].

Uplatnění této metody, jak bylo výše naznačeno, může být velmi rozmanité. Za zmínku určitě stojí využití tohoto principu pro napájení autonomních senzorů. Tento druh aplikací je v současné době velice atraktivní a rozvíjený. Další uplatnění je například pro medicínské aplikace. Velmi zajímavě dokázala využít tuto metodu například firma Seiko, která dokázala pomocí teploty lidského těla napájet hodinky [4, 16, 24].

Jelikož je tato práce celá věnována energy harvesting pomocí termoelektrického jevu, více do hloubky se termočládkům, termogenerátorům i jejich principu bude věnovat část 2.

1.2.4 Porovnání metod

Jak bylo již výše ve 1.2 popsáno a řečeno, jednotlivé metody a jejich dosažitelný výkon nelze pořádně generalizovat. I tak lze alespoň rámcově porovnat hodnoty jednotlivými metodami dosažitelné. Tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 1.

Tabulka 1: Typická data pro zdroje Energy harvesting [15]

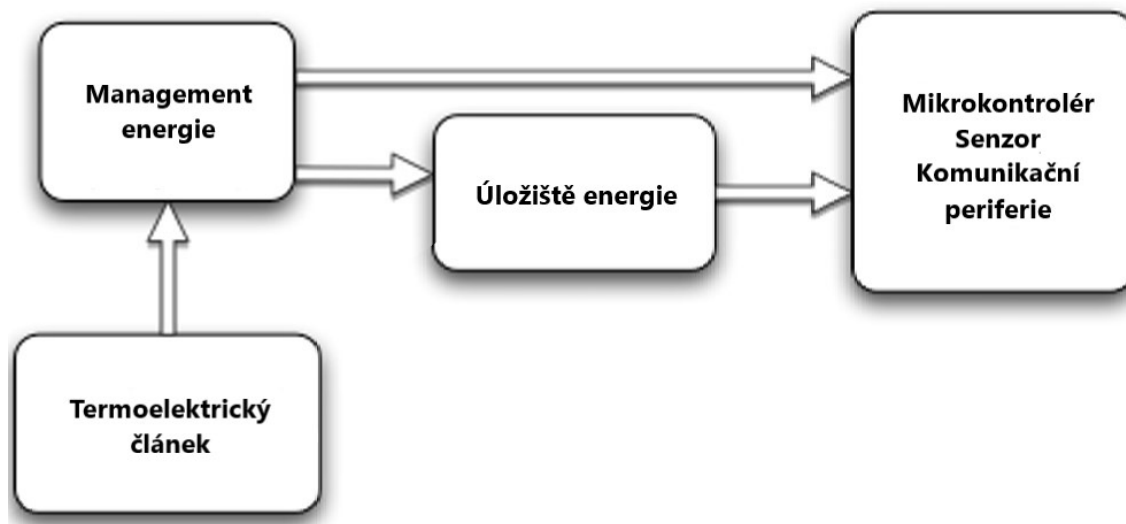
	<i>Podmínky</i>	<i>Hustota výkonu</i>	<i>Oblast</i>	<i>Energie/Den</i>
Pohyb	1 m/s ²	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	1 cm ³	8,64 J (předp. stálé vibrace)
Světlo	Venku	7500 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	1 cm ³	324 J (dostupné 50 % času)
Světlo	Uvnitř	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	1 cm ³	4,32 J (dostupné 50 % času)
Teplo	$\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	1 cm ³	2,59 J (dostupné 50 % času)

Z tabulky 1 je patrně vidět, že informace uvedené v 1.2 se shodují s realitou. Pro aplikace energy harvesting ve venkovních prostorech, fotoelektrický jev dokáže vygenerovat podstatně vyšší výkon než ostatní uvedené metody. Hodí se tedy pro aplikace, které vyžadují vyšší výkon.

Pokud jsou venkovní prostory nahrazeny za prostory vnitřní, situace se poměrně radikálně změní. Hodnota dostupné energie se relativně srovná na podobnou hodnotu.

1.3 Základní architektura

Pro celý proces energy harvesting nestačí pouze generátor energie. Jak bylo popsáno v 1.2, každá z metod generuje elektrickou energii trochu jiným způsobem. Celý systém je proto možné popsat zjednodušeným blokovým schématem 2.



Obrázek 2: Blokový diagram struktury systému energy harvesting [4]

Výstupní elektrický signál z generátoru se skládá z elektrických proměnných. Konkrétně z elektrického proudu a elektrického napětí. V závislosti na zvoleném typu energy harvesteru se mohou proměnné lišit v jednotlivých složkách. Hlavně ve fázi, frekvenci, amplitudě AC signálu nebo ve velikosti DC signálu.

Vzhledem k tomu, že touto metodou často napájíme nějaký koncový prvek, například senzor nebo jiný autonomní systém, je třeba výstupní signál generátoru upravit podle potřeb dané aplikace.

Přesně k tomu slouží management elektrické energie. Jak bylo popsáno hned na začátku práce 1.1, metody energy harvesting neoplývají příliš vysokou účinností. S přeměněnou energií je proto nutné rozumně nakládat.

Pod tímto blokem si tedy lze představit obvody, které se starají o management energie. Starají se o její rozumné využívání a přerozdělování do dalších sekcí schématu. Tomuto konkrétnímu bloku se věnuje sekce 3.

Dalším blokem je uchovávání energie. Jak je z názvu patrné, pod tímto blokem si je možné představit nějaký úložný prostor. Energie se zde uchovává například pro vyrovnávání výpadků zdroje. V praxi se k tomuto účelu nejčastěji používají akumulátory nebo superkondenzátory. Více se tomuto tématu věnuje sekce 4.

Jako poslední uvedený blok schématu je koncové zařízení. V praxi kupříkladu nějaký senzor nebo vysílač. Tento prvek se nicméně používá často v kombinaci s prvky předchozím. Energie nemusí být ukládána do nekonečna. Celý systém bývá navržen tak, že se přeměněná energie ukládá do akumulátoru a v případě, že je nashromážděno patřičné množství ji řídicí obvody poskytnou koncovému zařízení [4].

2 Termoelektrické generátory

V předchozích sekcích bylo shrnuto, co je konkrétně energy harvesting, jakých zdrojů využívá a jaká je zjednodušená struktura celého systému. Tato práce se ovšem nevěnuje všem možnostem energy harvesting, ale pouze termogenerátorům. Tedy generování elektrické energie z tepelné energie. Základním stavebním kamenem termoelektrických generátorů jsou jednotlivé termoelektrické články.

V části 1.2.3 byly popsány zdroje, které jsou vhodné k tomuto použití. Jelikož jde o způsob umožňující využívat odpadní teplo strojů a jiných zařízení, lze tak zvyšovat účinnost a tím snižovat produkci CO₂. Takto získaná energie je pak mnohem více šetrná k životnímu prostředí [4].

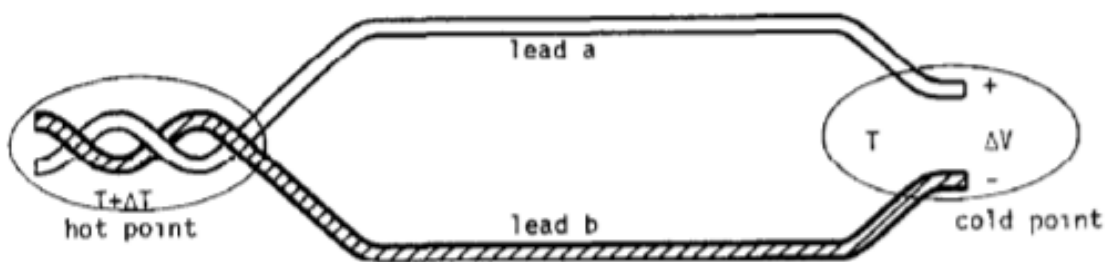
2.1 Základní princip termoelektrického článku

Termočlánek je zařízení sloužící k přeměně tepelné energie na energii elektrickou. Princip, který to umožňuje, není nijak inovativní. Byl objeven již v 19. století a nazývá se Seebeckův jev.

2.1.1 Seebeckův jev

Lze ho jinak nazvat jako inverzní Peltierův jev. Jde o jeden z termoelektrických jevů. Je to způsob umožňující přeměnu tepla na elektřinu.

V roce 1821 byl tento jev objeven německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem a byl podle něho pojmenován. Ten při svých výzkumech měření teploty přišel na to, že když vodič spojí dva vodiče na jednom konci, spojený konec vystaví teplejšímu prostředí a opačné dva konce vystaví chladnějšímu prostředí, mezi nespojenými konci vodičů začne vznikat napětí viz obrázek 3.



Obrázek 3: Seebeckův jev [25]

Tento jev lze matematicky popsat rovnicí (1)

$$\Delta U = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \quad (1)$$

kde ΔU je vzniklé napětí mezi vodiči, ΔT je rozdíl teplot mezi teplým a studeným koncem a α_{ab} jsou takzvané Seebeckovy koeficienty.

Vzniklé napětí U se udává ve voltech. Teplotní rozdíl

$$\Delta T = T_H - T_C \quad (2)$$

je udáván v K. T_H je teplota na teplém konci a T_C je teplota na studeném konci.

Pro Seebeckovy koeficienty platí vztah

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b \quad (3)$$

kde α_a je Seebeckův koeficient vodiče a a α_b je Seebeckův koeficient vodiče b . Z toho je na první pohled patrné, že Seebeckův jev nelze aplikovat na dva stejné materiály, neboť by bylo $\alpha_{ab} = 0$ a tím i, podle rovnice(1) $\Delta U = 0$.

Seebeckovy koeficienty se tedy udávají pro jednotlivé materiály. Jsou udávány tabulkovou hodnotou, ale nemusí být nutně konstanta. Lze je vypočítat jako

$$\alpha_{ab} \doteq \frac{U}{\Delta T} \quad (\text{kde } \Delta T \Rightarrow 0) \quad (4)$$

Tyto koeficienty se udávají s jednotkou $V \cdot K^{-1}$. Udávají tedy přírůstek napětí na jeden K. Častěji a lépe je ale lze uvádět jako $\mu V \cdot K^{-1}$, neboť přírůstek napětí se pohybuje v řádech μV .

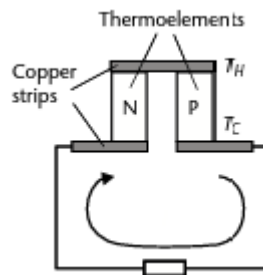
Následujícím výzkumem se přišlo na to, že je lepší aplikovat termoelektrické články se složením z polovodičů. Podstatně tím totiž roste jejich účinnost. Pro termočlánky tvořené vodiči se pohybují Seebeckovy koeficienty spíše kolem nižších desítek $\mu V \cdot K^{-1}$. Pro polovodiče tato hodnota narůstá do řádu mV [4, 11, 25].

2.2 Složení a funkce termoelektrických generátorů

V sekci 2.1 bylo řečeno, že termoelektrické články byly původně tvořeny vodiči a postupně se přešlo na polovodivé složení. To vše kvůli mnohem vyšší účinnosti. Uvažované generátory dále v textu budou tedy tvořeny právě polovodičem.

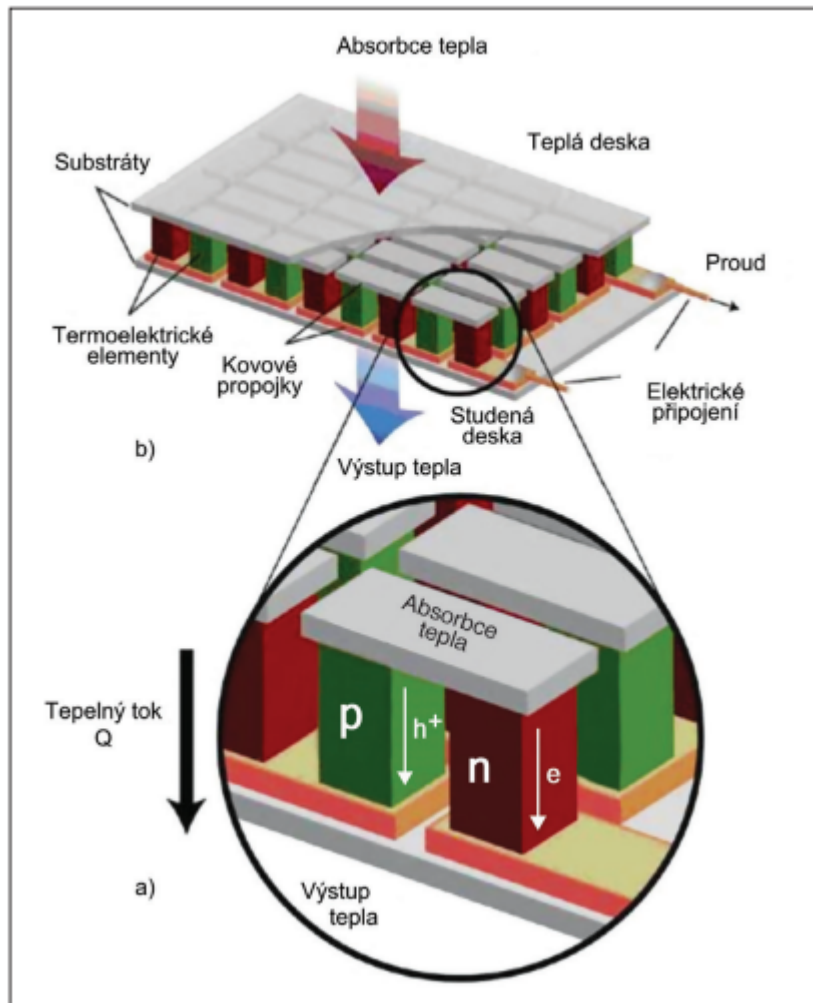
2.2.1 Funkce termoelektrických generátorů

Každý termoelektrický generátor je tvořen ze termoelektrických článků. Jeden termoelektrický článek představuje elektrické spojení polovodiče typu n a p . Jednotlivé polovodiče (n a p) jsou pak následně spojovány do série. Teplá a studená strana článku je pak spojována paralelně. Viz obrázek 4 a 5.



Obrázek 4: Základní stavební kámen termoelektrického generátoru [4]

Máme tedy termoelektrický článek. Ten má ale sám o sobě velmi malou účinnost. Tyto články se dají dále propojovat do série. Při větším množství spojených článků vzrůstá účinnost celého systému. To lze vidět v obrázku 5. Energie se bude pohybovat od teplého ke studenému konci. Intenzita tepelného toku Q je pak úměrná tepelné vodivosti vodiče. Propojky mezi jednotlivými typy polovodiče jsou tvořeny pomocí vodivého materiálu. Takováto sestava pak dohromady vytváří celý termoelektrický generátor [4, 19, 24].



Obrázek 5: Termoelektrický generátor, a) detail propojení termoelektrických článků, b) jeden termoelektrický článek [24]

2.2.2 Náhradní obvod pro termoelektrický generátor

Termoelektrický generátor si lze představit jako tepelnou baterii. Celek je pak možné nahradit obvodem, který se skládá z několika částí.

První prvek je elektromotorické napětí baterie. Toto napětí je úměrné Seebeckovu napětí $U_0 = \alpha_{np} \cdot \Delta T$. Dolní indexy u Seebeckových koeficientů, n a p , pak představují polovodiče typu n a p , ze kterých jsou jednotlivé termoelektrické články složeny.

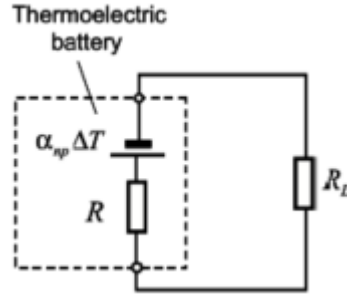
Prvek R představuje celkový sériový odpor obou typů polovodiče. Tvoří tedy vnitřní odpor generátoru. Poslední prvek schématu je R_L , který představuje velikost připojené zátěže. Schéma náhradního obvodu je uvedeno na obrázku 6 [4, 19].

Celý obvod je pak možné popsat několika rovnicemi. Napětí na zátěži lze vypočítat jako

$$U_{R_L} = \alpha_{np} \Delta T \frac{R_L}{R + R_L} \quad (5)$$

Proud tekoucí zátěží je pak roven

$$I_{R_L} = \frac{\alpha_{np} \Delta T}{R + R_L} \quad (6)$$



Obrázek 6: Náhradní schéma zapojení pro termočlánek z obrázku 4 [4]

Jelikož známe proud tekoucí zátěží a známe i napětí na zátěži, můžeme vyjádřit z rovnic (5) a (6) velikost výkonu jako

$$P = \frac{s}{(1+s)^2} \frac{(\alpha_{np}\Delta T)^2}{R} \quad (7)$$

kde $s = \frac{R_L}{R}$. Jde o poměr odporu zátěže a vnitřního odporu generátoru. Maximální výkon bude pak generován, pokud $R_L = R$ a poměr tedy bude roven 1. To znamená impedanční přizpůsobení. Vztah pro výkon pak lze přepsat jako

$$P_{\max} = \frac{(\alpha_{np}\Delta T)^2}{4R} \quad (8)$$

Pokud by byly dány Seebeckovy koeficienty a vnitřní odpor, pro měnící se teplotní rozdíl ΔT by se maximální výkon podle vztahu (8) zvyšoval nebo snižoval s druhou mocninou. Měl by tedy parabolický průběh. V realitě to tak ovšem být nemusí, zvláště pro vyšší teplotní rozdíly, neboť se změnou teploty se mohou také měnit Seebeckovy koeficienty a dokonce i vnitřní odpor.

Ze znalosti výkonu, který je schopen generátor dodat je také neméně důležité zjistit, s jakou účinností generátor pracuje. Termoelektrické generátory přeměňují tepelný tok na elektrickou energii s jistou účinností. Účinnost konverze je pak obecně udávána jako

$$\eta = \frac{P}{Q} \quad (9)$$

kde P je výkon a Q je tepelný tok absorbovaný na spojení materiálů.

Jeden z parametrů ovlivňující účinnost je faktor Z . Tento faktor se nazývá anglicky *Figure of merit* a bude o něm dále řeč v sekci 2.3.

Termoelektrický generátor nemůže mít účinnost vyšší nežli je účinnost vyjádřená pro Carnotův cyklus. Ta je udána jako

$$\eta = \Delta T \frac{\eta_r}{T_h} \quad (10)$$

přičemž η_r představuje redukovanou účinnost (vztaženou ke Carnotově účinnosti).

Účinnost lze pak zjednodušeně zapsat jako

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (11)$$

Jak je vidět, účinnost velmi závisí na faktoru Z [4, 11, 19].

2.3 Vhodnost jednotlivých termoelektrických generátorů pro různé aplikace

Podle výše psaného textu jasně vyplývá, že termogenerátor, který by byl tvořen vodičovým složením, nemůže konkurovat polovodičovým materiálům. Nicméně také polovodiče mezi sebou mají poměrně velké rozdíly.

V praxi se pro tento účel nepoužívají jednoduché polovodiče. Jejich účinnost není nijak zázračná. Používají se proto jejich různé sloučeniny. Každá taková sloučenina pak oplývá specifickými vlastnostmi. Jde zvláště o to, pro jakou aplikaci jakou sloučeninu použijeme.

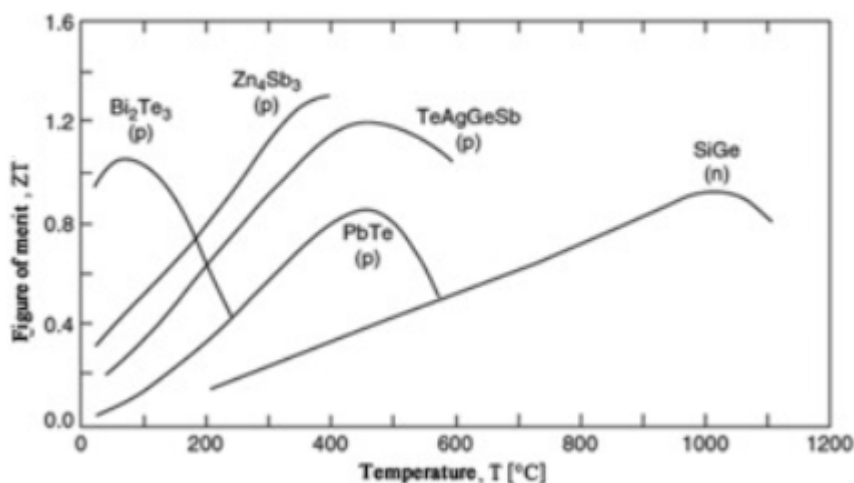
Různé sloučeniny jsou různě vhodné pro různé velikosti teplotních rozdílů ΔT . Tím je tedy přímo ovlivněna účinnost. Účinnost je jeden z klíčových parametrů při volbě termočlánku. Další kruciólní parametry jsou výstupní napětí a proud. Vztahy pro jejich výpočet již byly uvedeny v sekci 2.2.2.

Jak bylo psáno o sekci výše, velmi důležitý je faktor Z , který se anglicky nazývá *Figure of merit*. Volným překladem lze česky říci, že tento parametr určuje míru vhodnosti použití termočlánku. Tento parametr podstatně ovlivňuje účinnost termoelektrického generátoru. Lze ho matematicky vyjádřit jako

$$Z = \frac{\alpha_{np}^2}{R \cdot K} \quad (12)$$

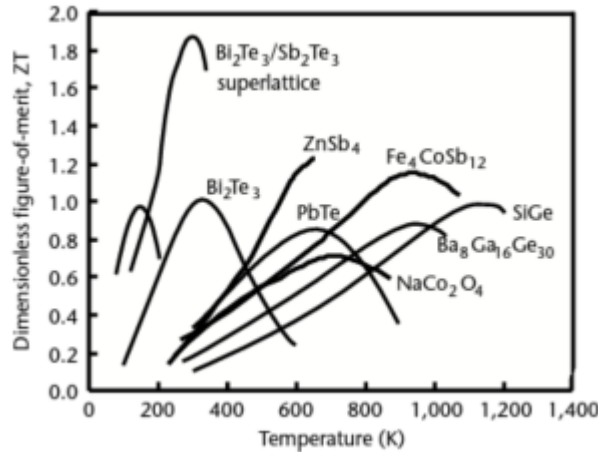
kde α_{np}^2 [$\mu V \cdot K^{-1}$] jsou Seebeckovy koeficienty, R [$\Omega \cdot cm$] je elektrický odpor a kde K [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je teplotní vodivost. Parametr Z je tedy vázán na vlastnosti materiálu. Jednotka faktoru Z je K^{-1} [4].

Ze vzorce je jasné, že pro termogenerátor bude ideální hledat materiály s vysokými Seebeckovy koeficienty. Nicméně stejně tak podstatné je hledat materiály s nízkým elektrickým odporem (vysokou elektrickou vodivostí) kvůli omezení ztrát vlivem Jouleova ohřevu a materiály s nízkou teplotní vodivostí pro omezení absorpce tepla v místě spojení materiálů. Při výběru je tedy nutné udělat kompromis mezi těmito parametry.



Obrázek 7: Závislost bezrozměrného ZT na teplotě [3]

Častěji se v praxi používá veličina ZT . Plní stejnou funkci jako parametr Z , její výhodou je, že je bezrozměrná. V grafu 7 lze vidět závislost materiálů na teplotě. Tento graf ovšem ukazuje závislost ZT na teplotě udané ve $^{\circ}\text{C}$. V praxi se používá spíše závislost ZT na K viz 8.



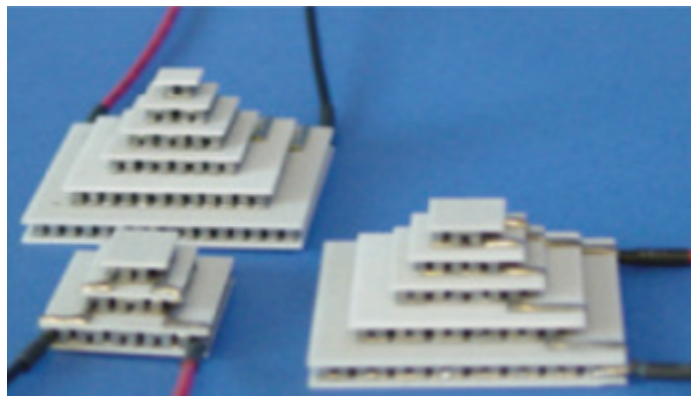
Obrázek 8: Závislost bezrozměrného ZT na teplotě [4]

V grafu 8 jsou vyneseny průběhy pro několik různých materiálů. Jak je vidět, potvrzuje se, že různá složení termoelektrických článků jsou vhodná pro různé aplikace.

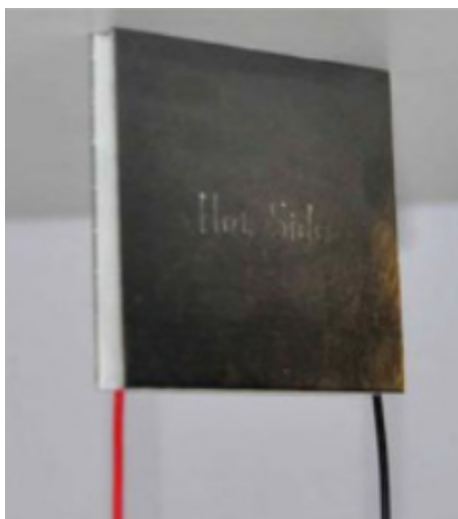
Tato práce se zabývá energy harvesting za pomoci tepla lidského těla. Budou proto zajímavé materiály, které mají vysokou míru vhodnosti ZT pro aplikace kolem teploty dostupné v běžném životě. Taková teplota se pohybuje přibližně okolo 300 K. Z grafu 7 i 8 je patrné, že z uvedených materiálů je vhodný Bi_2Te_3 s hodnotou $ZT = 0,9$ [3, 4, 19].

Výrobci jsou nejčastěji udávány parametry U_{\max} a I_{\max} , což je maximální provozní napětí a proud pro daný článek. Při volbě je dobrým pravidlem volit ten článek, který má nejvyšší součin obou veličin.

Kromě těchto veličin má každý článek také určité geometrické vlastnosti. Články jsou často vyráběny ve čtvercovém provedení (např. 30 x 30 mm, 40 x 40 mm,...). To ale není nutné, články mohou být i obdélníkové, či je lze vytvořit ve formě jakési pyramidy, kde se vrstvi jednotlivé články na sebe viz 9 a 10 [3].



Obrázek 9: Termoelektrický generátor ve tvaru pyramidy [3]



Obrázek 10: Termoelektrický generátor ve tvaru čtverce [3]

2.4 Termočlánky pro malé teplotní rozdíly

Moderní mikroelektronika se svým rozvojem dostala k velkému snížení potřebných příkonů pro všelijaké systémy a aplikace. Ty dovedou operovat s příkony kolem desítek až stovek μW . Tím umožnila proniknout generátorům, které tvoří malé výkony. Pro mnoho aplikací jsou dokonce mnohem vhodnější, neboť dosavadní využívání baterií není vždy dokonalé. Baterie je potřeba po čase vyměnit. Nejen z toho důvodu jsou velmi praktické termoelektrické generátory [28].

Jelikož se většina lidí nejčastěji pohybuje v uvozovkách v normálních teplotách, aplikace jsou často provozovány v podobných teplotních hladinách. Zvláště pokud jde o harvesting energie z teploty lidského těla.

2.4.1 Teplota lidského těla a okolí

Teplota, kterou tělo disponuje, se může lišit a nemusí být konstantní. Pomiňme neduhy lidského těla, jako je reakce formou horečky na nějakou nemoc. Teplota jádra lidského těla se pohybuje zhruba v rozmezí $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Teplota na povrchu kůže je o něco nižší. Tato teplota se na různých místech na těle trochu liší. Závisí také na okolní teplotě a hlavně na aktivitě jedince. Například při sportovních aktivitách se generace tepla tělem zvyšuje. V průměru se ale pohybuje zhruba kolem $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je něco přes 300 K [27].

Teplota prostředí se těžko aproximuje. Člověk se pohybuje v různých místech. Například pokojová teplota v místnostech se pohybuje v rozsahu od $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota vnitrokontinentálních států mírného pásu se udává v létě průměrem kolem $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. V zimě jde teplota do hodnot pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Každopádně, vůči teplotě lidského těla lze vytvořit pouze malý teplotní rozdíl. Pro tento účel není vhodný každý termoelektrický generátor, jak již bylo řečeno v sekci 2.3.

2.4.2 Energy harvesting z lidského těla

Právě pro tento účel jsou vhodné termoelektrické články účinné při nízkých teplotních rozdílech. Dle výše zmíněných informací lze vidět, že takovéto možnosti využívá stále více aplikací.

Omezení je zde oblastí těla, ze které chceme energii získávat. Teplota se v různých částech těla liší. Omezení je i například v možnosti připevnění generátoru na nějaké místo na těle, neboť ne všude to jde snadno.

Články využívané pro takovouto aplikaci jsou často navrhovány tak, aby byly do jisté míry ohebné. Důvod je zřejmý, jde o umožnění pohybu člověka, aniž by došlo k destrukci a pohyb byl co nejméně omezován [10].

Podle grafu 8 je vidět, jak bylo již zmíněno, že jedno z nejvhodnějších materiálových složení pro toto využití je tellurid bismutitý (Bi_2Te_3). Není to ale jediný využívaný materiál. Lze využít i materiály s nižším faktorem ZT. Další věc je využití nanomateriálů. Těmi lze dosáhnout větší hodnoty ZT [4].

Energy harvesting využití takovýmto způsobem je tedy zdroj pro mnoho a mnoho systémů a zařízení. Od komerčních aplikací po aplikace medicínské. K nim více informací v sekcích 6 a 5.

3 Management energie

Podle schéma 2 je dalším důležitým bodem, po samotném energy harvesting, management energie. Tedy jakési řízení využití získané energie.

V systémech, kde se pracuje s nízkou hladinou získané energie je krucální s ní nadále rozumně nakládat. Další věc je, že generovaná energie nemusí být v ideální formě pro další vyžití.

3.1 Strategie

Pro mnoho systémů operujících s malým množstvím energie je takový management schopnost přepínat a ovládat další prvky systému tak, že pokud nejsou v danou chvíli potřeba, úplně je vypne nebo je přepne do stavu, kdy mají naprosto minimální odběr. To ale není vše. Aby měl celý systém co nejoptimálnější funkci, je za potřebí zajistit další věci.

Aby mohlo být dosaženo maximálního výkonu ze zdroje, je nutné přizpůsobení impedancí mezi zdrojem, převodníkem a elektrickým systémem. Pro naprosto ideální stav by měly být impedance shodné. Jelikož je to ne vždy možné, je důležité vyhledávat termoelektrické generátory s co nejnižším vnitřním odporem. Pokud je vnitřní odpor nižší nežli odpor zátěže, dosažitelný výkon je vyšší, než pokud by to bylo naopak.

Další věcí je, že generované napětí a proud nejsou vždy přímo naprosto kompatibilní s elektronickými prvky zařazenými dále v systému. Je tedy také nutná regulace a úprava velikosti a průběhu.

Energie také může být ukládána do akumulátoru či superkondenzátoru. Výhoda je pak taková, že při nestálosti zdroje lze výpadky nahradit za akumulované energie. Management tedy také přerozděluje získanou energii mezi její ukládání a současné využívání, případně pak pro udržení stálého výstupu za pomoci již naakumulované energie [4, 8, 20].

3.2 Obvody pro management energie

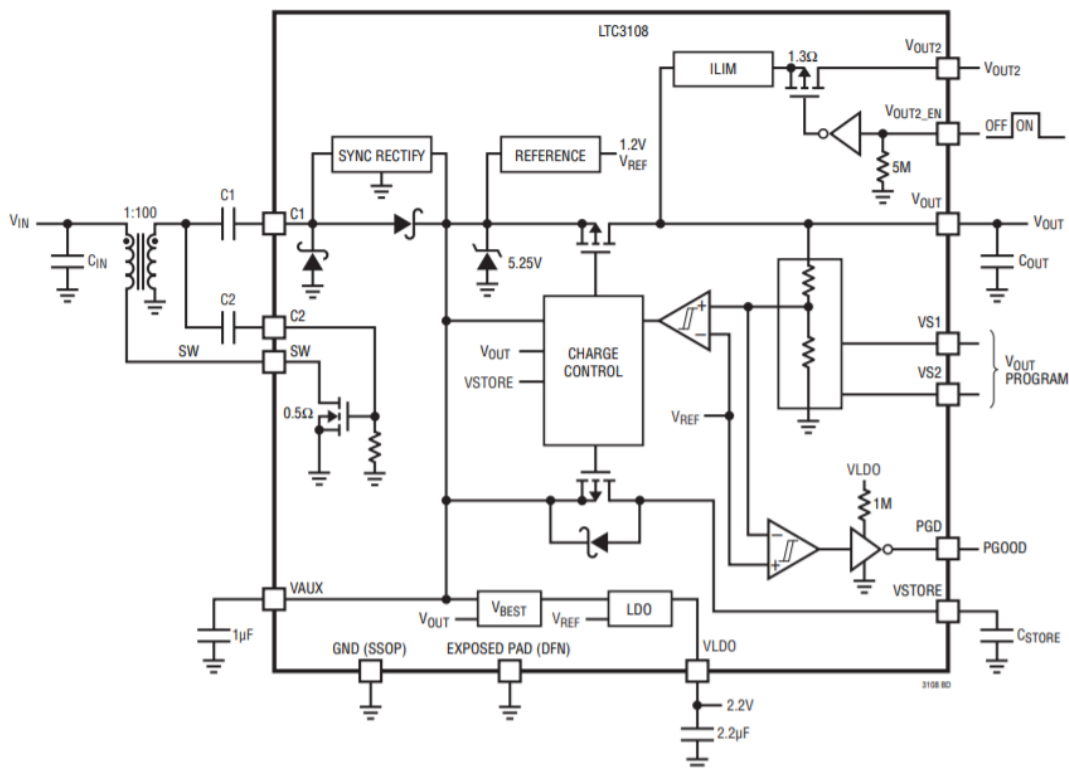
V současné době není potřeba takové obvody složitě vytvářet. Obvody jsou vyráběny ve formě integrovaných obvodů a jsou běžně dostupné. Mezi výrobce patří například společnost Texas Instruments nebo Analog Devices.

Existuje tedy také několik typů. Každý z typů je jako každý z termočlánků vhodný pro trochu jiné použití. Pro různé aplikace lze tedy volit trochu jiný obvod. Záleží, co je konkrétně vyžadováno.

3.2.1 LTC3108

Integrovaný obvod LTC3108 je navržen pro zdroje s velmi nízkými hodnotami napětí. LTC3108 dále toto napětí konvertuje na použitelné výstupní napětí vhodné pro napájení bezdrátových senzorů, mikroprocesorů a podobně.

Jelikož některé aplikace vyžadují vyšší výkon nebo vyšší hladinu napětí, tento integrovaný obvod umožňuje energii akumulovat a následně ji periodicky po určitých dávkách dodat do systému. Tento obvod je vhodný například pro termoelektrické generátory či pro fotovoltaické články. Na obrázku 11 je uvedeno blokové schéma zapojení [2].



Obrázek 11: Blokové schéma integrovaného obvodu LTC3108 [2]

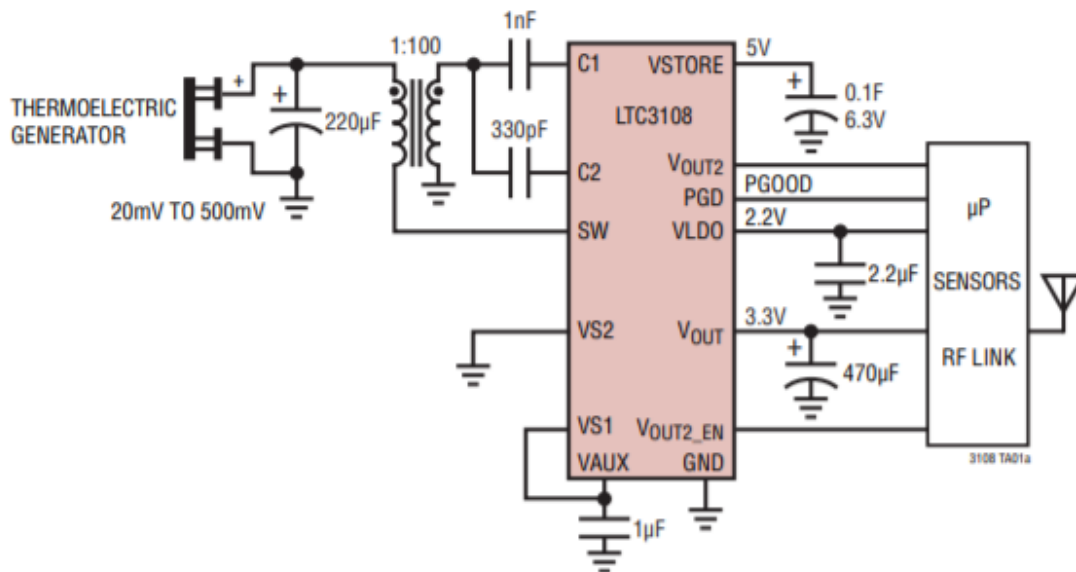
Obvod používá zvyšující transformátor. Poměry transformátoru je vhodné měnit podle velikosti vstupního napětí. Pro napětí od 20 mV je využito poměru 1:100. Pro aplikace, kde je vyšší teplotní rozdíl a tedy vyšší vstupní napětí se používá poměr nižší. Doporučen je poměr 1:50 pro vstupní napětí minimálně 50 mV při zatížení, 1:20 pro vstupní napětí alespoň 150 mV.

Dále je využito vnitřního MOSFETu pro rezonanční oscilátor, který je schopen pracovat při velmi nízkých vstupních napětích.

Sekundár zvyšujícího transformátoru je připojen na DC-DC konvertor typu nábojové pumpy a také na usměrňovač. Ten je využíván pro napájení integrovaného obvodu a nabíjení výstupních kondenzátorů. Výstupní svorka VLDO má hodnotu napětí 2,2 V a výstup pak je navržen tak, aby se nejprve reguloval pro napájení nízkopříkonového mikroprocesoru. Poté se nabije hlavní výstupní kondenzátor na hodnotu napětí, které je programováno pomocí pinů VS1 a VS2. Napětí má zpravidla hodnoty 2,35 V, 3,3 V, 4,1 V, či 5 V.

Když se kondenzátor nabije na nastavenou hodnotu napětí, LTC začne nabíjet jinak přebytečnou energii superkondenzátor či akumulátor na pinu V_{STORE}. Pokud dojde na výstupu k odběru, k vyrovnávání špiček a dodání dostatku energie slouží výhradně kondenzátor na výstupu. V tu chvíli, kdy je energie odebírána, dojde na výstupu k úbytku, to znamená, že obvod se snaží na výstupu udržet nastavené napětí a tím pádem omezuje nabíjení superkapacitoru. Jakmile skončí odběr a na výstupu se opět objeví nastavené napětí, LTC3108 začne energii opět plně přesouvat do akumulačního prvku.

Při připojení vhodného termoelektrického generátoru může LTC3108 plnit svou funkci již od teplotního rozdílu 1 °C. Vhodné termočlánky jsou uvedeny přímo v kata-



Obrázek 12: Typické zapojení LTC3108 pro napájení bezdrátového senzoru [2]

logovém listu výrobce [2]. Jsou zde uvedeny i rozměry termoelektrických generátorů.

Na obrázku 12 je uvedeno jedno z typických zapojení tohoto obvodu. Jde o napájení bezdrátového senzoru. Obvod by mohl být dále modifikován přidáním akumulárního článku nebo popřípadě superkondenzátoru [2, 21].

3.2.2 LTC3109

Jako příklad je uveden ještě jedno zapojení. Jde o integrovaný obvod, který je k dispozici s pouzdem 4 mm x 4 mm. Umožňuje řízení pro zdroje s velmi nízkým vstupním napětím. Stejně jako obvod LTC3108 toto nízké napětí konvertuje na napětí dále použitelné.

Oproti LTC3108 je ale vhodný pro aplikace, které vyžadují napájení se správnou polaritou. To není u velmi nízkých napětí jednoduché (nelze použít diodové můstky kvůli úbytku napětí, který na diodách vzniká). LTC3109 má tedy oproti LTC3108 jiné vstupní obvody.

Obvod dále také umožňuje akumulaci energie, pokud má aplikace, pro kterou tento integrovaný obvod využíváme, větší odběrové nároky, než je možné poskytnout přímo.

Jde o step-up měnič s topologií fungující od vstupního napětí 30 mV. Obvod využívá malý zvyšující transformátor. Pro 30 mV je využito transformačního poměru 1:100, pro vyšší hodnoty vstupního napětí lze transformační poměr zmenšit.

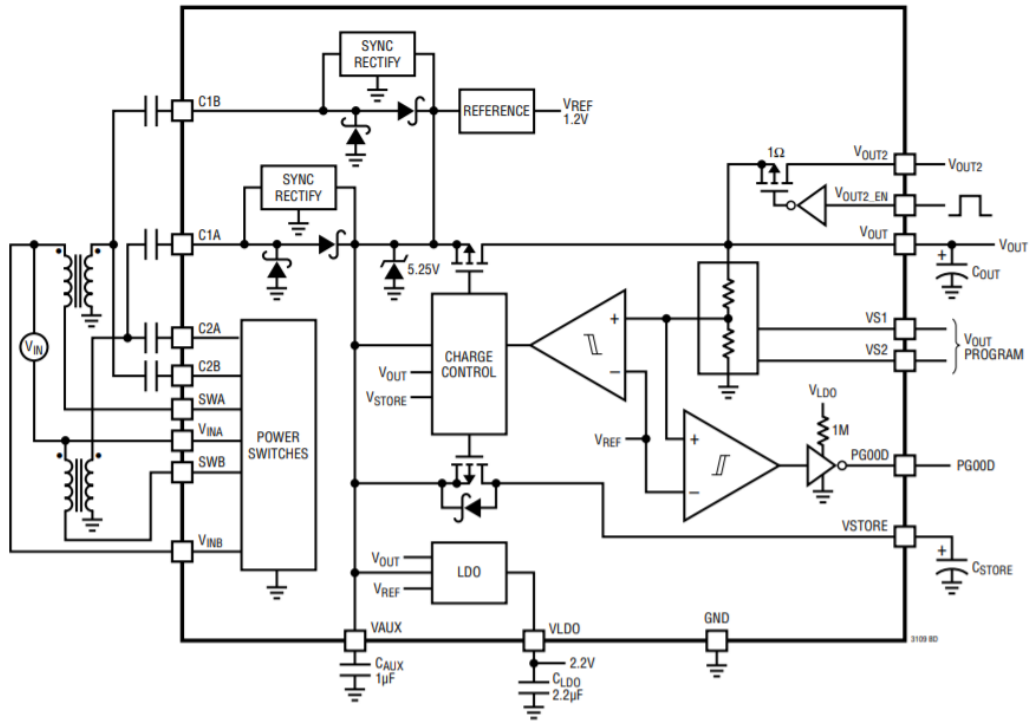
Dále je využito dvou režimů činnosti n-kanalového MOSFETu k vytvoření rezonančního oscilátoru pomocí zmíněného transformátoru a malého vazebního kondenzátoru. Tím je umožněno zvýšit hodnotu vstupního napětí na dostatečně vysokou hodnotu, která umožní vytvořit několik regulovaných hodnot napájení. Konkrétně jde o hodnoty 2,35 V, 3,3 V, 4,1 V nebo 5 V.

LTC3109 umožňuje využívat jeden nebo dva vstupy. Díky tomu můžeme například připojit dva nezávislé termoelektrické generátory umístěné na jiných místech a užívat energii získanou pomocí obou z nich.

Tento integrovaný obvod umožňuje také použití ještě druhého výstupu. Ten je

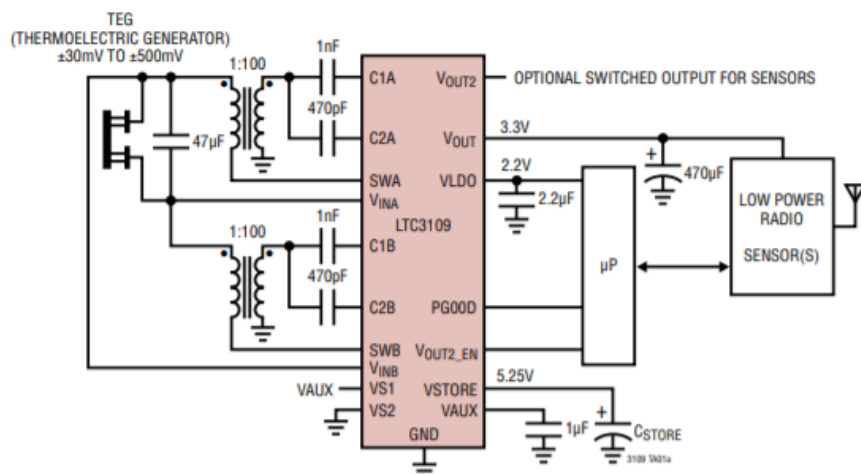
možné zapnout nebo vypnout pomocí pinu VOUT_EN. Druhý výstup je vhodný například pro napájení aplikací, které nemají režim s nízkým odběrem (režim spánku) nebo se nedají úplně vypnout.

LTC3109 využívá jako vstupní zdroje například termoelektrické generátory. Případně může být použit i pro střídavé signály s nízkou amplitudou.



Obrázek 13: Blokové schéma integrovaného obvodu LTC3109 [13]

Obrázek 13 ukazuje blokové schéma LTC3109 a obrázek 14 typické zapojení pro napájení senzoru [13, 21].



Obrázek 14: Typické zapojení LTC3109 pro napájení bezdrátového senzoru [13]

4 Způsoby ukládání energie

V základní struktuře systému energy harvesting 2 následuje za blokem pro management ukládání energie. Ukládání energie je obecně velmi důležitý obor. Pro systémy, které disponují pouze omezeným a nevelkým vstupním výkonem je ještě o to důležitější.

Obecně jde o to, že metody energy harvesting nemusí dodávat stejně velkou energii po celý čas fungování. Je toho ale více. Velké množství aplikací pro svou funkci vyžaduje konstantní zdroj energie. Někdy je také za potřebí dodat energii špičkově, přičemž špička je větší, než je schopen generátor dodat.

Je samozřejmé, že pokud aplikace potřebuje průměrně energii vyšší, než je schopen systém v průměru vytvořit, správná funkce není možná. Pokud ovšem je průměrná energie nižší, lze ji periodicky špičkově dodávat tak, že se energie postupně ukládá do úložiště a poté je dodána v potřebné míře.

Pokud je nutná spotřeba nižší, nežli je schopen generátor dodat, energie se může souběžně s během dané aplikace přerozdělovat pomocí managementu (viz 3) a zároveň ukládat do úložiště.

Energie z úložiště se pak může využít k vyrovnání velkých výpadků, pokud nefunguje generátor, nebo případně může napájet nějaké další aplikace.

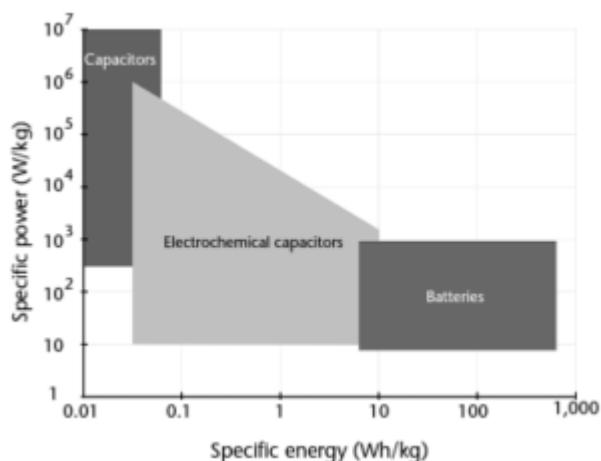
Základní nejčastěji používané typy úložiště jsou dva. Jde o akumulátory a superkondenzátory [4].

Tabulka 2 ukazuje typické parametry pro oba ze zdrojů. Je evidentní, že každé z úložišť energie může být méně či více vhodné pro dané aplikace. Obecně ale oba dva způsoby nahrazují makrobaterie.

Tabulka 2: Tabulka typických hodnot pro akumulátory a superkondenzátory [12]

	Baterie	Superkondenzátor
Životnost podle nabíjecích cyklů	$< 10^3$ cyklů	$> 10^6$ cyklů
Procentuální hodnota samovybití	5 %	30 %
Velikost napětí (V)	3,7 - 4,2	0 - 2,7
Hustota energie (Wh/kg)	20 - 150 (vysoká)	0,8 - (nízká)
Hustota výkonu (W/kg)	50 - 300 (nízká)	400 - 500 (vysoká)
Rychlost nabíjení	Hodiny	Sekundy až minuty
Rychlost vybíjení	0,3 h - 3 h	Jednotky minut
Nabíjecí obvody	Složitě	Jednoduché

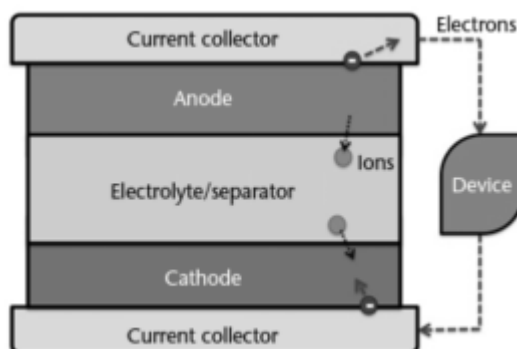
Na grafu 15 je možné vidět porovnání baterií a superkondenzátorů, kde na ose x je vynesena hustota energie a na ose y je vynesena hustota výkonu. Z těchto aspektů je vidět, jak se lze rozhodnout pro určité aplikace.



Obrázek 15: Graf porovnání úložišť získané energie [4]

4.1 Akumulátory

Baterie jsou galvanické buňky, kde je chemická energie z elektrochemické reakce transformována na energii elektrickou. Akumulátory jsou složeny ze dvou elektrod (anody a katody) a z elektrolytu [4].



Obrázek 16: Schéma baterie [4]

Jsou to primární napájecí články pro smart systémy. Mezi akumulátory mají největší hustotu energie a nejvyšší účinnost baterie typu *Li-ion* a *Li-pol*. Jak bylo zmíněno v tabulce 2, nabíjecí obvody pro akumulátory jsou složitější nežli obvody pro nabíjení superkondenzátorů. Speciálně pro baterie tvořené lithiem. Jejich nabíjení je nejčastěji řízeno integrovanými obvody. Tato funkce bývá implementována přímo v integrovaných obvodech pro management energie viz 3. Nicméně lithiové baterie mají velkou výhodu v tom, že netrpí paměťovým efektem.

Vzhledem k nižší složitosti nabíjení se také často využívají baterie typu nikl metal hydrid (*NiMH*). Tyto baterie disponují velkou energickou hustotou a dají se snáze nabíjet. Další variantou jsou baterie nikl kadmiové (*NiCd*). Tento typ baterií se dokáže vybit na nižší hladinu nežli baterie tvořené lithiem [12].

Nevýhoda těchto baterií tvořených niklem je, že mohou trpět *paměťovým efektem*. Paměťový efekt způsobuje to, že pokud se baterie opakovaně vybíjí, ale hladina na kterou se vybijí se v každém cyklu o něco liší. Baterie si pak "zapamätuje" hodnotu, na kterou je vybíjena a časem se tato hladina stane nejnižší možnou

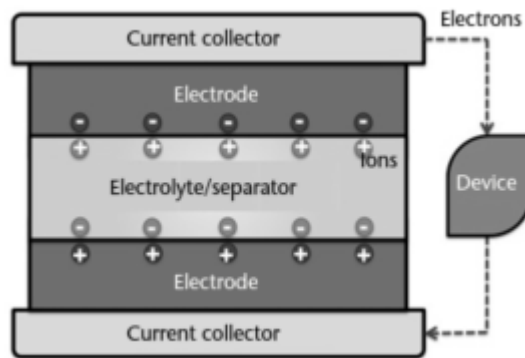
dosažitelnou, kde baterie přestane pracovat. Takže se po určitém počtu cyklů, zpravidla > 1000 , baterie nedokáže úplně vybit [6].

Baterie obecně oproti superkondenzátorům mají nižší životnost na počet cyklů nabití-vybití. Baterie jsou schopné dodat vyšší napětí a obecně energii dodávat po delší dobu. Jsou také vhodnější pro delší uchovávání energie, jelikož její ztráta samovybitím je nižší než u superkondenzátoru [12].

4.2 Superkondenzátory

Druhá typická možnost pro ukládání energie jsou superkondenzátory. Ty nacházejí svoje uplatnění u novější generace systémů energy harvesting díky své vyšší životnosti (větší počet cyklů nabití-vybití). Jsou tedy vhodné pro aplikace, kde se očekává dlouhá životnost.

Ačkoliv je kapacita stále mnohem nižší nežli je u akumulátorů, jsou takovéto kondenzátory schopné zásobit například senzorové systémy dostatečným množstvím energie [12].



Obrázek 17: Schéma elektrolytického kondenzátoru [4]

Ze schématu 17 je vidět, že struktura je podobná jako u baterie. Vzhledem k tomu, že v kondenzátoru neprobíhá elektrochemická reakce, teoreticky nedochází k nevratným dějům. Kondenzátory jsou pak vhodné k použití pro více než milion cyklů, což je podstatně více než baterie viz 2 [4].

Než je superkondenzátor v obvodu použit místo baterie, je potřeba zvážit některé jeho charakteristiky. Například dodané napětí vs. dodaná energie, svod, hustotu energie nebo například zbytkovou energii kondenzátoru.

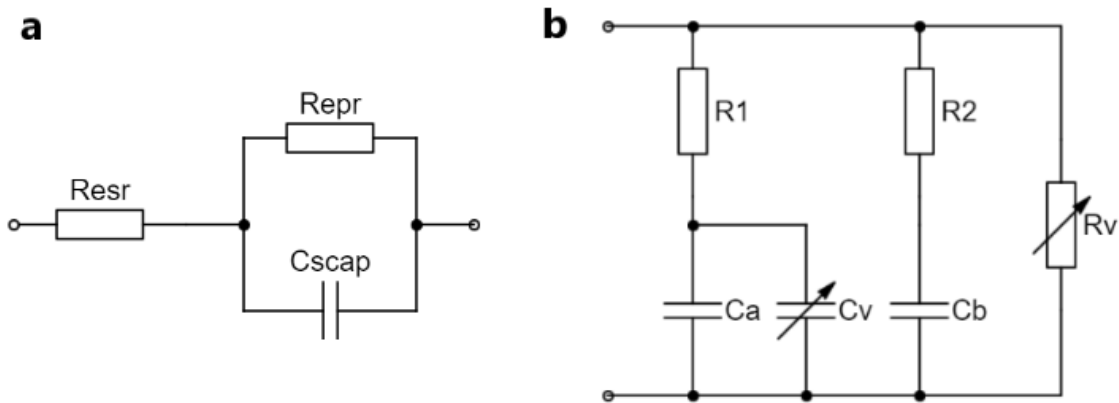
Pro popis superkondenzátorů se používají dva ekvivalentní modely. Jde o model R-C a o model svodového odporu.

Svod lze analyzovat pomocí R-C obvodu tvořeného třemi prvky - vnitřním odporem kondenzátoru R_{esr} , svodovým odporem R_{epr} a kapacitou kondenzátoru C_{scap} viz 18a).

Podle Ohmova zákona je možné zapsat svodový proud jako

$$I_{leak,scap}(t) = \frac{V_{scap}(t)}{R_{epr}} \quad (13)$$

Jelikož se zvětšující kapacitou roste také napětí na kondenzátoru, podle rovnice (13) roste také svodový proud. Se zvětšující kapacitou se navíc snižuje svodový odpor.



Obrázek 18: Náhradní modely superkapacitoru. a) R-C model, b) model svodového odporu [12]

Pokud je superkondenzátor nabíjen zdrojem dodávajícím malou energii (např. právě zdroje typu energy harvesting), je nutné, aby výkon, který nabíjí kondenzátor byl vyšší než výkon svodu. Krucální faktory jsou pak tedy řídicí obvody (obvody pro management) určující účinnost celého nabíjení.

Neduh kondenzátoru je poměrně velké samovybíjení v porovnání s hodnotou akumulátoru. To je způsobené přerozdělováním energie mezi větvemi v druhém modelu 18b). Pokud se nerovná napětí na $C_{sc} = C_a + C_v$ s napětím na C_b , dochází k redistribuci energie. Energie, která je nutná pro redistribuci, je "konzumována" rezistorem R_2 . To lze zapsat rovnicí

$$P_{redistr.} = \frac{V_{C_{sc}} - V_{C_b}}{R_2} \quad (14)$$

Z rovnice (14) je patrné, že čím větší bude rozdíl napětí, tím větší bude redistribuce a tím víc se bude kondenzátor sám vybíjet.

Zbytková (residuální) energie kondenzátoru je taková energie, která je nepoužitelná, jelikož je nižší, nežli spodní práh DC-DC konvertoru v některém z integrovaných obvodů zmíněných v 3. Často bývá takováto hodnota nastavena na 0,7 V. Taková zbytková energie kondenzátoru je pak rovna

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot (0,7)^2 \quad (15)$$

což může u superkondenzátoru být poměrně velká hodnota vzhledem k jejich velké kapacitě C .

Superkondenzátory lze také zapojovat a používat v různých topologiích. Nejjednodušší topologie je s jedním superkondenzátorem s velkou kapacitou (50 - 100 F) použitým jako buffer. Nevýhodou je, že velká kapacita může být důvodem prodloužení času nutného pro nabíjení a také zde může vznikat vyšší zbytková energie. Na druhou stranu, takováto topologie dokáže udržet energii delší dobu.

Druhá možnost je topologie, kde je zapojeno více superkondenzátorů s nižšími kapacitami (1 - 5 F). Výhodou je lepší distribuce energie a kratší nabíjecí čas. Také zbytková energie je v této topologii nižší. Nevýhodou je, že energie je v kondenzátorech možné uchovat po kratší dobu než v předchozí topologii [12].

5 Komerční aplikace

Termoelektrické generátory nachází své uplatnění v mnoha oborech a oblastech. Od aplikací v automobilovém průmyslu [14] po aplikace v kosmu [7]. Jde o příklady, které využívají teplo okolí.

Při zaměření se na aplikace využívají jako zdroj teplo lidského těla, zajímavá je aplikace této metody od firmy Seiko a Citizen.

Hodinky od firmy Seiko využívají pro napájení termoelektrický generátor o 1040 termoelektrických článků a hodinky firmy Citizen využívají 1242 termočlánků [3].



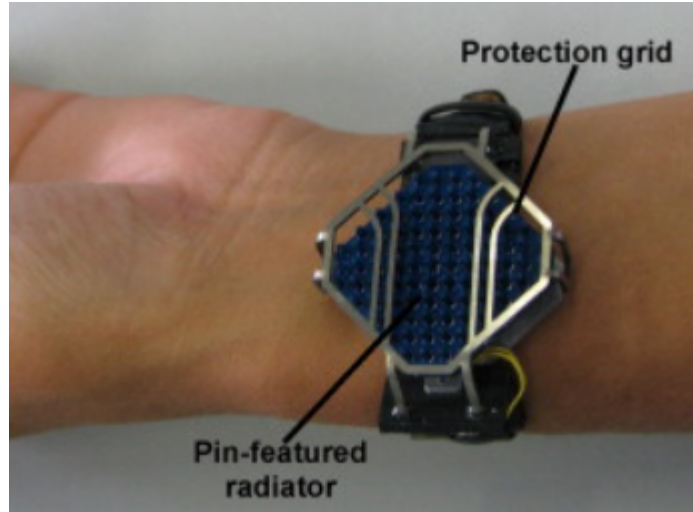
Obrázek 19: Hodinky Citizen Eco-Drive (vlevo) a Seiko Thermic (vpravo) [3]

Skupina lidí kolem Berta Gyselinckxe vytvořila termoelektrický generátor vhodný pro přichycení na lidské tělo. Lze ho tedy přichytit na co nejvíce pohodlné místo, které nebude člověka příliš omezovat. Vhodné je kupříkladu zápěstí. Generátor pak v těchto místech maximalizuje získanou energii, ukládá ji a následně funguje v podstatě jako power banka [9].



Obrázek 20: Prototyp termoelektrického generátoru [9]

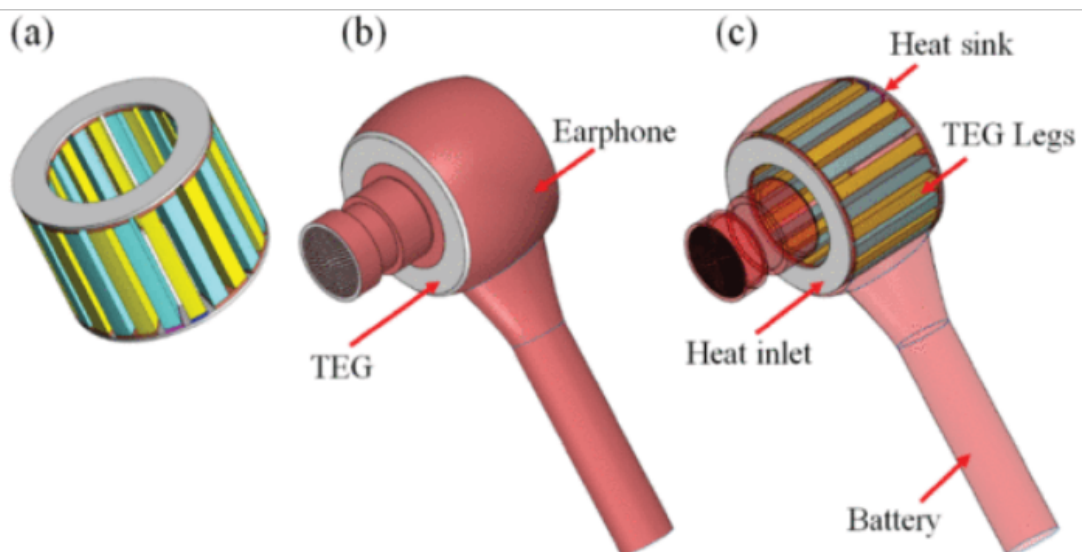
Další variantu termoelektrického generátoru vhodného pro použití na zápěstí dala dohromady skupina kolem Ziyang Wanga. Termogenerátor je navržen ve dvou variantách lišících se počtem termoelektrických článků v generátoru (2350 nebo 4700). Výstupní napětí se pohybuje kolem 150 mV při výkonu 0,3 nW během standardních podmínek [3].



Obrázek 21: Termoelektrický generátor navržený skupinou Ziyang Wanga [26]

V loňském roce 2021 byl publikován článek přinášející metodu energy harvesting pomocí termoelektrického jevu do stále více rostoucího fenoménu bezdrátových sluchátek. To lze vidět na obrázku 22. Do sluchátka je integrován termogenerátor tvořený Bi_2Te_3 . Sluchátko je navrženo tak, že sbírá teplo z lidského ucha a opačná strana termogenerátoru je chlazena okolním vzduchem.

Termogenerátor je vytvořen ve tvaru kruhu a je navržen tak, aby pracoval při nízkých teplotních rozdílech. Generátor má výkon 0,6 mW při teplotním rozdílu $\Delta T = 10,5 \text{ K}$ [1].



Obrázek 22: Model integrování termoelektrického generátoru do bezdrátového sluchátka [1]

6 Biomedicínské aplikace

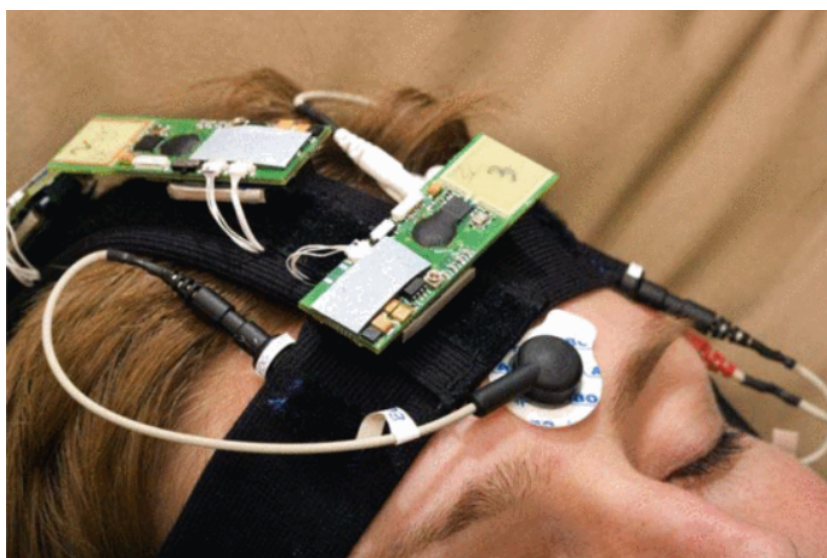
Aplikací, které jsou možné v biomedicínském prostředí je také poměrně velké množství. Termoelektrické generátory jsou často v této oblasti použité pro napájení senzorů, které jsou umístěny na lidském těle.

Skupina lidí operující kolem J. Penderse vytvořila první systém monitorující nějakou činnost lidského těla, který je napájený pomocí termoelektrického generátoru. Konkrétně jde o oximetr, což je zařízení měřící hladinu kyslíku v krvi. Oximetr je napájen pomocí náramku umístěného na zápěstí, ve kterém je umístěn termogenerátor. Senzor samotný se pak umísťuje na prst [18].



Obrázek 23: Oximetr [18]

Dalším příkladem může být například bezdrátový systém monitorující EEG nebo systémy pro monitoring spánku. Systémy dokáží pomocí termoelektrických generátorů výrazně zmenšit velikost baterie, a tak jsou systémy pro subjekt více příjemné. Z toho důvodu jsou právě vhodné pro spánkovou analýzu. Data o EEG, EOG a EMG pak systém bezdrátově posílá na přijímač umístěný ve stejné místnosti. Data mohou být zkoumána v reálném čase, nebo uchována pro pozdější výzkum [18].



Obrázek 24: Senzor pro sběr dat během spánku [18]

Velice zajímavým příkladem je takzvaná E-skin. To celé silně souvisí s IoT. Jak je

možné vidět na obrázku 25, celý koncept je takový, že je na těle přichycen termoelektrický generátor. Tento generátor je flexibilní, to znamená, že zvyšuje pohodlí člověka. Generátor pak napájí obvody, které sdružují nějaké konkrétní funkce. Konkrétně měří různé činnosti lidského těla, například již zmíněnou hladinu kyslíku v krvi, tlak krve, ECG a další věci, které by mohly zapříčinit nějaký zdravotní problém.

Z obrázku je dále vidět, že systém při vyhodnocení problému vysílá signál na další místa. Popřípadě lze může člověk sám sledovat, co se děje. Další chytrou věcí je, že systém by například připomínal, že je čas si vzít prášky či například píchnou injekci [17].



Obrázek 25: Schéma E-skin napájené pomocí teploty lidského těla [17]

7 Analýza základních elektrických vlastností termoelektrických baterií

Jak bylo řečeno v sekci 2.4, ideální termoelektrický generátor pro energy harvesting z teploty lidského těla vůči okolí by byl z materiálu Bi_2Te_3 . Navíc jelikož není tvar pokožky zcela plochý téměř na žádném místě, ideální volbou by byl flexibilní termočlánek vyráběný kupříkladu společností TEGway.

7.1 Výběr termoelektrických článků

Na českém trhu je ovšem poměrně omezený výběr a nižší dostupnost takovýchto článků. Navíc velká většina je typu TEC, neboli *thermoelectric cooler*, což je v překlade termoelektrický chladič využívající peltierův jev, který je naznačen v 2.1.1. Tedy využívá funkci inverzní k funkci termoelektrického generátoru označovaného jako TEG. Oba dva typy článků jsou ovšem vůči sobě reciproké. Rozdíl je v tom, že TEC má oproti TEG nižší účinnost přeměny rozdílů teplot na elektrickou energii.

Je to z důvodu, že může být tvořen jiným složením méně vhodným pro takovou přeměnu. Další rozdíl je, že TEC články jsou navrženy pro práci v nižších maximálních teplotních podmínkách. S největší pravděpodobností je tento fakt způsoben tím, že jednotlivé články v celé baterii jsou spojeny pájivou pastou odolnou do nižších teplot, proto při překročení dojde k nevratnému poškození celku.

Na celosvětovém trhu existuje velké množství menších či větších výrobců. Generátory, které výrobci nabízejí se liší v mnoha parametrech (viz 2). Nevýhodné je, že datasheet každého výrobce udává trochu jiné parametry, což komplikuje výběr.

7.1.1 Zvolené generátory

Pro výzkum a měření bylo vybíráno z běžně dostupných článků na českém trhu. Byly vybrány články typu TEG i TEC. Zvolené články jsou celkem 4.

Rozměry článků jsou maximálně 44 x 40 mm a nejmenší 30 x 30 mm. K dispozici byly také články 60 x 60 mm, což by se nabízelo vzhledem k faktu, že s rostoucí plochou roste výstupní výkon. Generátory 60 x 60 mm byly ovšem zavrženy, neboť takto velký generátor by se těžko kvalitně připevňoval na lidské tělo, navíc vytvořený měřicí přípravek 7.2 využívá pro odvod tepla chladič, jehož plocha by byla menší nežli takto velký článek. To by způsobovalo problém v kvalitním odvodu tepla.

První vybraný generátor má označení **TEC1-12707**. Bohužel datasheet neobsahuje Seebeckův koeficient. Lze ho určit například výpočtem z rovnice 4. Výpočet lze ovšem provést až po naměření hodnot. Rozměry článku jsou 40 mm x 40 mm x 3,6 mm.

Tabulka 3: Parametry TEC1-12707

Délka	40 mm
Šířka	40 mm
Tloušťka	3,6 mm
T_{\max}	138 °C
ΔT_{\max}	68 °C
Elektrický odpor při 25 °C	1,55 Ω

Baterie je tvořena 127 dílčími termoelektrickými články. Tento článek je založen na technologii Bi_2Te_3 , která je podle grafu 8 vhodná pro využití u teplot kolem 300 K, což je necelých 27 °C.

Druhý zvolený generátor se nazývá **TEC1-071080**. Taktéž je typu TEC. Seebeckův koeficient taktéž není v datasheetu obsažen. Lze ho určit z naměřených hodnot. Rozměry generátoru jsou pak 30 mm x 30 mm x 3,3 mm.

Tabulka 4: Parametry TEC1-071080

Délka	30 mm
Šířka	30 mm
Tloušťka	3,3 mm
T_{\max}	90 °C
ΔT_{\max}	75 °C
Elektrický odpor při 25 °C	0,86 Ω

Další dva zvolené termoelektrické generátory jsou typu TEG. Oba dva jsou založeny na Bi-Te technologii. Z toho vyplývá, že by měli být oba dva polovodičovými složením vhodné pro aplikace při teplotě kolem 300 K.

První z využitých generátorů je označen **TEG-127020**. Výrobce bohužel ani zde neudává v datasheetu Seebeckův koeficient. Generátor je tvořen 127 páry P-N přechodů. Geometrické rozměry jsou 40 mm x 44 mm x 3,3 mm.

Tabulka 5: Parametry TEG-127020

Délka	40 mm
Šířka	44 mm
Tloušťka	3,3 mm
T_{\max}	250 °C
ΔT_{\max}	225 °C
Elektrický odpor při 25 °C	1,49 Ω

Druhým z generátorů s označením TEG je nazván **TEG-127009**. Katalogové údaje opět neobsahují záznam o hodnotě Seebeckově koeficientu. Generátor je také tvořen 127 termoelektrickými články. Rozměry generátoru jsou 30 mm x 34 mm x 3,2 mm.

Tabulka 6: Parametry TEG-127009

Délka	30 mm
Šířka	34 mm
Tloušťka	3,2 mm
T_{\max}	250 °C
ΔT_{\max}	225 °C
Elektrický odpor při 25 °C	3,37 Ω

Jak lze vidět u obou baterií označených jako TEG, obě jsou vhodné pro poměrně vysoké teplotní rozdíly.

7.2 Měřicí metoda pro hodnocení vlastností zvolených termoelektrických baterií

Pro analýzu vlastností termoelektrických článků existují určité metody a nějaká daná pravidla. Pro samotné měření je podstatné zajistit několik důležitých věcí.

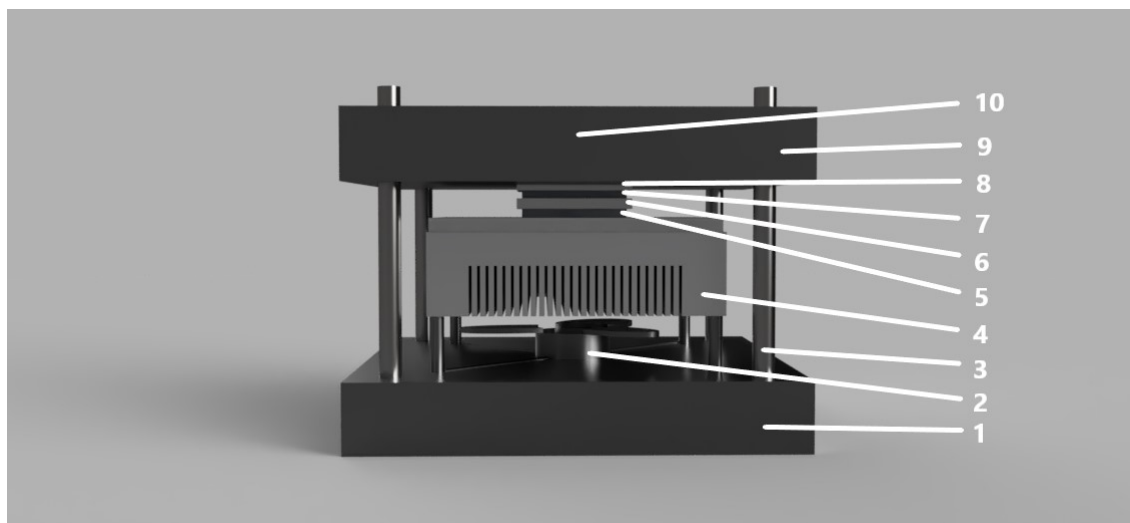
Pro měření jakýchkoliv výstupních charakteristik termoelektrické baterie pro daný teplotní rozdíl je velice důležité udržet tento teplotní rozdíl stálý. Tedy jde o to udržet na jedné straně stálou vyšší teplotu a na druhé straně stálou nižší teplotu. Při nedodržení této podmínky bude v měření vznikat chyba a měření tak nebude zcela přesné.

Další důležitou věcí při měření je odvod tepla z termočlánku. Jelikož skrz článek prochází tepelný tok, jednou stranou baterie je teplo absorbováno a druhou stranou je z článku odváděno. Povrch samotného článku je často (a u všech v této práci využitých) tvořen oxidem hlinitým Al_2O_3 , což je jeden z nejznámějších keramických oxidů. Sám o sobě oplývá neoplývá přílišnou tepelnou vodivostí, a tak je krucióální k němu teplovodivě připojit chladič například z hliníku, aby mohlo být teplo lépe odvedeno. V opačném případě by docházelo k postupnému prohřívání celé baterie, a tak by se snižovaly dosažitelné hodnoty.

7.2.1 Měřicí zařízení

Celý systém vytvořený pro měření vlastností byl navržen tak, aby bylo možné důkladné měření v co nejlepších podmínkách. Měřicí systém využívá sendvičovou strukturu. Díky tomuto konceptu je možné dosáhnout velmi těsné vazby všech komponent dohromady. Celá struktura se nechá rozložit na několik dílčích částí tvořících celek.

Při popisu od spodu jde tedy o základnovou podstavu, chladič, peltierův článek, dvě hliníkové desky, zkoumaný termoelektrický generátor, výkonové rezistory, vrchní část a dva snímače teploty. Pro lepší představu následujícího popisu jsem vytvořil obrazný model pomocí MS Fusion 360 viz obrázek 26.



Obrázek 26: Model měřicího systému

Základna (bod 1 v obr. 26) je tvořena z dřevěné překližky, jejíž rozměry jsou 200 mm x 130 mm. V každém z rohů je umístěna závitová tyč (bod 3 v obr. 26),

kteřá je ukotvena ze spodu i z vrchu maticí. Závítové tyče slouží právě k pevnému stažení do sendvičové struktury.

Na základně je pevně přichycen chladič tvořený z hliníkového žebrovaného chladiče a větráku (body 2 a 4 v obr. 26). Napájecí napětí větráku je 12 V. Větrák a hliníkový chladič tvoří jeden pevný celek. Tento celek je využit k odvodu tepla z peltierova článku, konkrétně z jeho teplé strany. Chladič s největší pravděpodobností pochází ze starého počítače.

Peltierův článek (bod 5 v obr. 26) v systému zajišťuje možnost vychladit jednu stranu zkoumané baterie na určitou teplotu. Netřeba se tedy omezovat na teplotu okolního vzduchu a je možné články testovat i pro jiné okolní teploty, které by se v praktickém využití samozřejmě vyskytovaly a znalost chování článku v takovýchto teplotách je žádoucí.

Využitý chladič nese označení TEC1-127150. Geometrické rozměry jsou 40 mm x 40 mm x 2,9 mm. Maximální teplotní rozdíl ΔT se pohybuje kolem 67 °C a maximální chladičový výkon článku je kolem 130 W, což je pro tuto aplikaci více než dostačující.

TEC je s chladičem tepelně spojen pomocí teplovodivé pasty pro co nejlepší tepelnou vodivost. Teplovodivá pasta je následně využita mezi všemi komponentami.

Na peltierův článek je umístěna hliníková deska (bod 6 v obr. 26) o tloušťce přibližně 4 mm. Hliník je opět volen kvůli dobré tepelné vodivosti. Tím, že je deska poměrně masivní, dokáže po nachlazení konstantněji držet teplotu.

Aby mohla být měřena teplota studeného konce článku, bylo by ideální vložit teploměr právě mezi hliníkovou desku a testovanou termoelektrickou baterii. Měření takovým způsobem jsem ovšem neměl k dispozici. Z toho důvodu je znovu využito dobré tepelné vodivosti hliníku. V desce je vyvrtaný otvor, do kterého je vsazen teplotní senzor. Takto snímaná teplota je shodná s teplotou přímo u baterie.

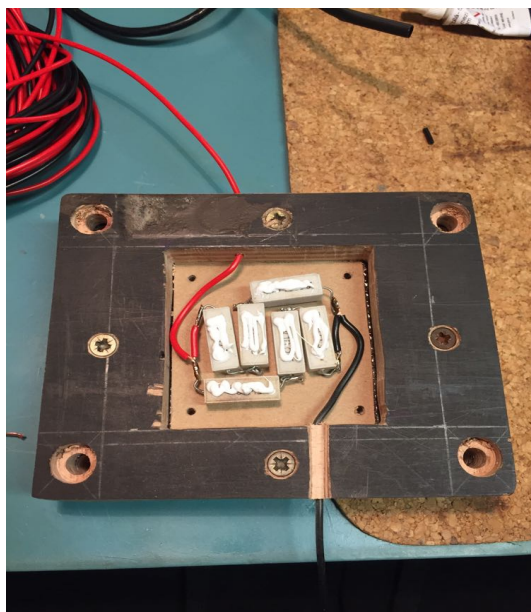
Jako snímací prvek je využit odporový senzor PT100 značený SA10200542. Jde o jeden z nejjednodušších teplotních senzorů. Jeho odpor při teplotě 0 °C je $R_{T=0\text{ °C}} = 1000\ \Omega$. Dle datasheetu je vhodný pro teploty od -50 °C do 500 °C. Hodnoty jsou v datasheetu udávány s posloupností po 5 °C. Odchylka je do 0,5 °C v rozsahu, ve kterém je čidlo použito. Pro přesnější odečítání teploty byl v excelu vytvořen podle rovnice uvedené v datasheetu graf závislosti odporu na teplotě.

Svrchní část měřicího systému (bod 9 v obr. 26) je opět tvořena překližkou se stejnými rozměry jako základna. Jediný rozdílný rozměr je v tloušťce. V rozích jsou otvory pro závítové tyče, díky kterým lze vrchní část ke spodní stáhnout pomocí matic.

Rozdíl v tloušťce je z důvodu, že do této části jsou zapuštěny výkonové rezistory (naznačeno bodem 10 v obr. 26), které jsou využívány jako prvek pro ohřev. Jsou využity keramické výkonové rezistory s rozměry 8 mm x 8 mm x 21 mm. Jde o 10 Ω rezistory se ztrátovým výkonem 5 W. Celkem je využito 6 sériově-paralelně spojených rezistorů o celkové hodnotě odporu 15 Ω viz obrázek 27.

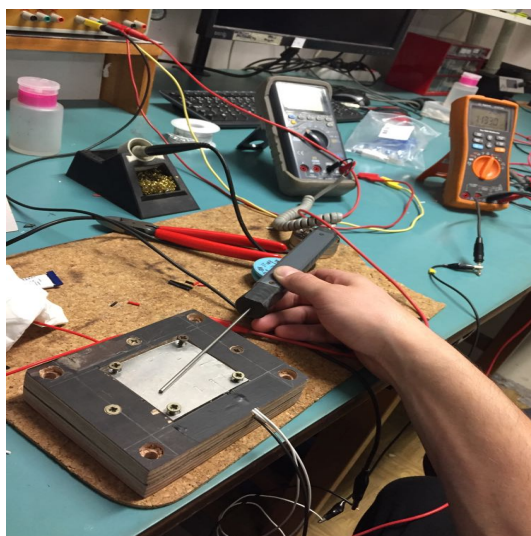
Rezistory jsou tepelně spojeny s druhou hliníkovou deskou (bod 8 v obr. 26) pomocí teplovodivé pasty. Navíc je deska pomocí vrutů spojena s vrchní dřevěnou částí, čímž je zajištěno těsnější spojení rezistorů a hliníkové desky pro lepší tepelný přenos viz obrázek 28.

Do hliníkové desky je opět jako v minulém případě vsazeno stejným způsobem stejné teplotní čidlo pro kontrolu teploty teplé strany generátoru.



Obrázek 27: Ohříváč tvořený výkonovými rezistory

Aby se omezilo toku tepla kolem testovaného termoelektrického generátoru (bod 7 v obr. 26) a tudíž dalšímu zkreslení výsledků, bylo žádoucí využít izolace kolem testovaného prvku mezi chlazenou a ohřívanou deskou. Jako nejvhodnější materiál se zde jevil korek, který by také použit viz obrázek 30



Obrázek 28: Porovnávání hodnot PT100 a měřicí sondy k multimetru

Celý měřicí systém potřebuje poměrně hodně dalších přístrojů. Konkrétně je třeba zdroj 12 V pro větrák v chladiči. Dále je potřeba regulovatelný zdroj pro napájení výkonových rezistorů a tím zahřívání testované součástky. Další zdroj je třeba pro napájení peltierova článku pro chlazení testovaného generátoru.

Kromě zdrojů jsou dále za potřebí měřicí přístroje. Pro měření teploty pomocí odporového senzoru PT100 je potřeba ohmmetr, zde tedy konkrétně dva, pro každé čidlo jeden. Dále záleží na tom, jaké parametry chceme testovat. Na to se podíváme v kapitole 7.3

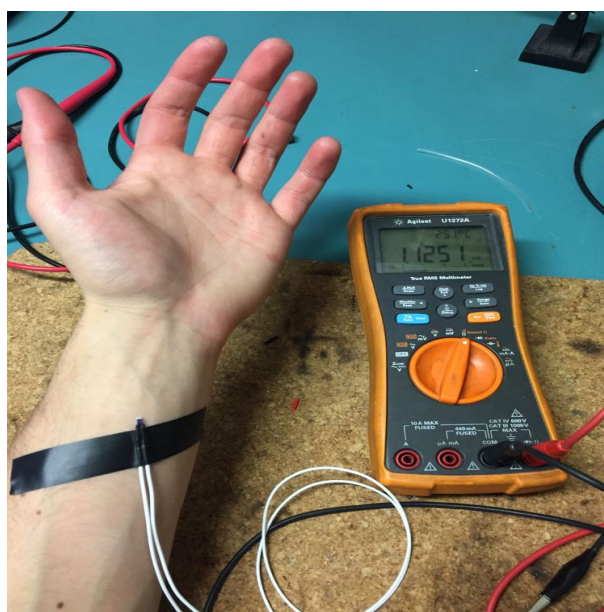
7.3 Měření na termoelektrických bateriích

Jak bylo řečeno v části 7.1.1, pro analýzu byly vybrány celkem 4 články. Navržená a použitá měřicí metoda byla uvedena v kapitole 7.2.1. Výzkum byl prováděn při nízkých teplotních rozdílech. Články byly testovány postupně stejným způsobem.

7.3.1 Teplota teplého konce

Při získávání elektrické energie metodou energy harvesting z lidského těla je na teplém konci článku právě teplota lidského těla. Jak bylo diskutováno výše, ideální možnost pro takovéto využití je na paži v okolí zápěstí. Prvním bodem bylo tedy zjistit, jaká skutečná teplota je dosažitelná.

Za pomoci odporového senzoru PT100 přilepeného na paži v klidovém stavu bylo provedeno měření této teploty.



Obrázek 29: Měření teploty zápěstí

Experimentem byla tedy zjištěna hodnota $1,1251 \Omega$, což je přibližně $32,5 \text{ }^\circ\text{C}$. To je ve shodě s obecně udávanou hodnotou teploty kůže na předloktí.

Tím je také určena teplota, která bude nastavována pro teplý konec baterie při testování.

7.3.2 Další nastavení aparatury pro měření

Měření bylo postupně prováděno na všech zkoumaných článcích stejným způsobem. K měření již byly potřeba i další měřicí přístroje.

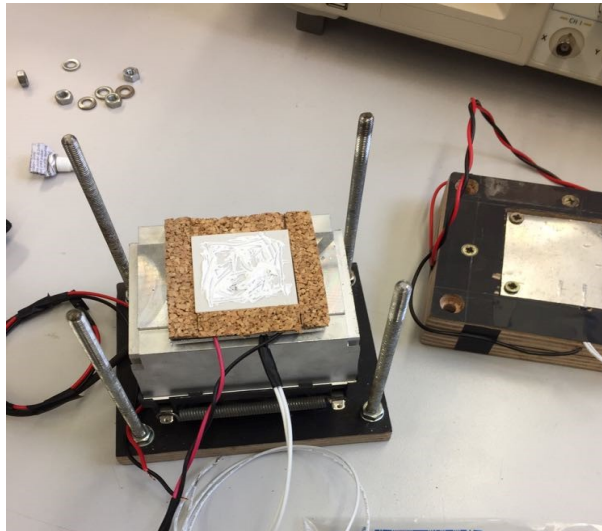
V **první fázi** byl v aparatuře vynechán chladič prvek tvořený peltierovým článkem a zkoumaná baterie se přímo teplovodivě spojila s hliníkovým chladičem a na druhé straně byla zahřívána. Teplota v místnosti dosahovala přibližně $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro všechny články bylo provedeno měření nejprve tak, že bylo měřeno napětí na prázdko.

Ačkoliv teplota okolí dosahovala 25°C , naměřená teplota na studené straně zkoumané baterie dosahovala $27,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Vlivem ne tak dobrého odvodu tepla jako ve druhé

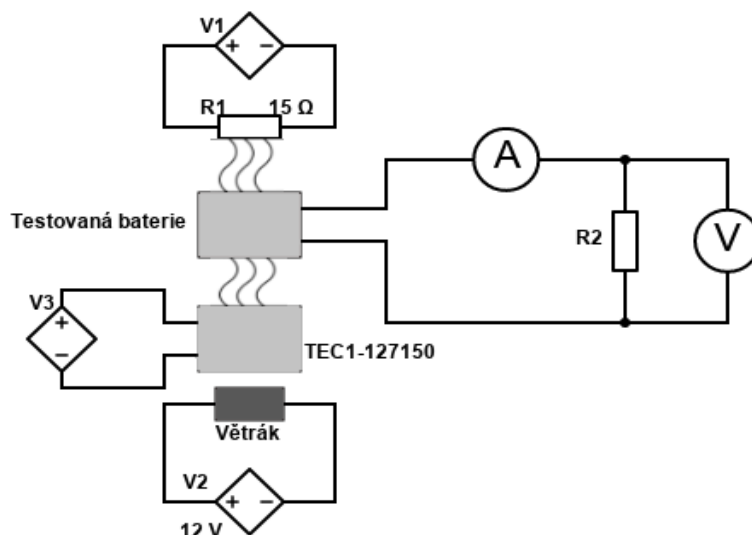
fázi docházelo k samovolnému ohřevu povrchu termočlánku. V měřených hodnotách tedy bylo počítáno s teplotou okolí 27,1 °C a tím i menším teplotním rozdílem.

Dalším krokem bylo připojení zátěže ke zkoumané baterii. Do obvodu byl dále připojen ampérmetr a voltmetr podle schématu 31. Pro konstantní teplotní rozdíl vůči okolí bylo měřeno celkem 15 různých hodnot zátěže v rozsahu od 1,1 Ω po 1000 Ω.

V **druhé fázi** byl do aparatury přidán chladicí prvek tvořený peltierovým článkem. Díky tomu bylo možné přesně nastavit teplotu na studeném konci zkoumané baterie. Měření dále pokračovalo stejným způsobem jako v první fázi.



Obrázek 30: Testovaný článek TEC1-12707



Obrázek 31: Schéma zapojení měřicího obvodu vytvořené v programu Scheme-it (<https://www.digikey.cz/schemeit>)

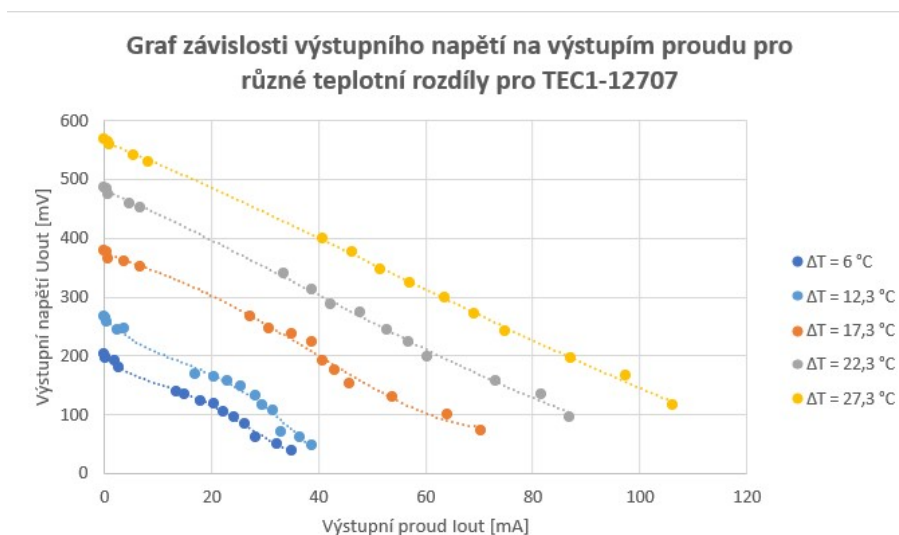
7.4 Dosažené výsledky

Měření podle výše zmíněného postupu bylo provedeno na všech vybraných bateriích. Následují výsledky naměřených dat vynesené pomocí grafů.

7.4.1 TEC1-12707

První set dat je vyneseno jako volt-ampérová charakteristika, konkrétně závislost výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro různé teploty a tedy i pro různé teplotní rozdíly.

Jak je vidět v grafu 32, dle předpokladů s rostoucím teplotním rozdílem se zvyšuje napětí. Vynesené naměřené body jsou proloženy křivkami. Tyto křivky jsou si velmi podobné. Vykazují taky, až na určité body, poměrně slušnou linearitu. Z toho lze usuzovat, že vnitřní odpor termoelektrické baterie zůstává pro tyto teplotní rozdíly konstantní. Tento poznatek bude dále využit.



Obrázek 32: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro různé teplotní rozdíly baterie TEC1-12707

Pro naměřené hodnoty výstupního proudu I_{out} a výstupního napětí U_{out} jsem dále vypočítal výstupní výkon P_{out} podle vztahu (16)

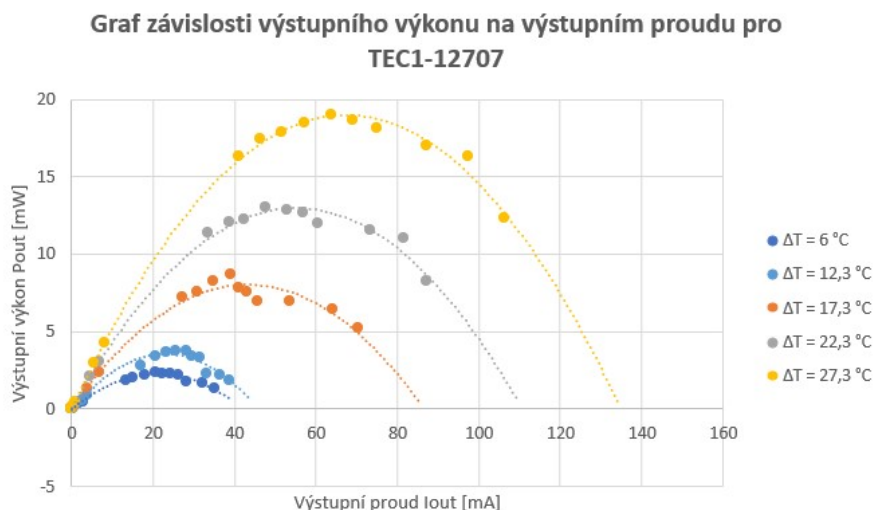
$$P_{out} = U_{out} \cdot I_{out} \quad (16)$$

Jak je známo, rovnici (16) je možné přepsat do tvarů

$$P_{out} = I_{out}^2 \cdot R \text{ nebo } P_{out} = \frac{U_{out}^2}{R} \quad (17)$$

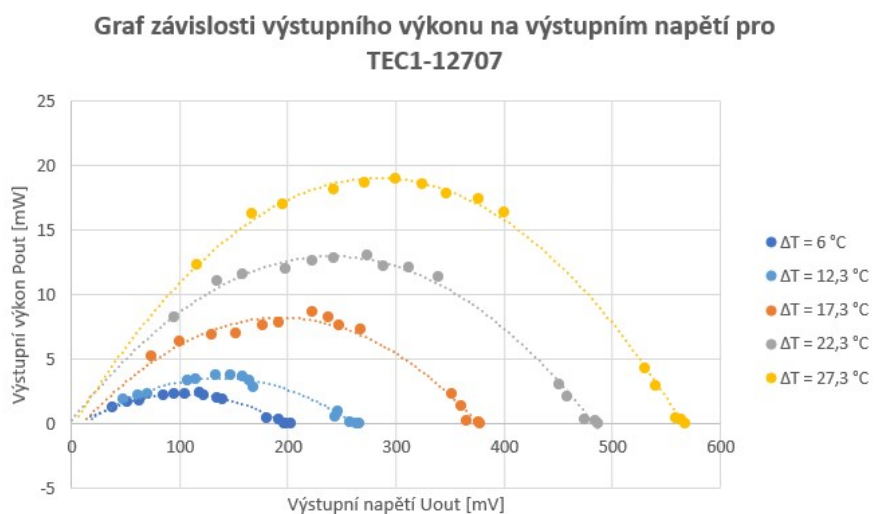
Křivka vynášející výstupní výkon P_{out} by tedy měla mít v závislosti na výstupním napětí U_{out} či na výstupním proudu I_{out} parabolický průběh, jak bylo předpokládáno také v části 2.2.2.

Výsledek je možné pozorovat v grafech 33 a 34. Jak je vidět, dosažený výkon je nejvyšší pro zátěž, která je co nejbližší hodnotě vnitřního odporu zkoumané baterie, jak bylo předpokládáno v sekci 3.1.



Obrázek 33: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-12707

Na grafech 33 a 34 je taktéž vidět, že s rostoucím teplotním rozdílem ΔT roste maximální dosažitelný výkon na výstupu. V obou grafech jsou body dále proloženy křivkou, která je polynomem druhého řádu, tedy parabola. Jak lze vidět, body poměrně dobře křivku kopírují. Tím jsou potvrzeny dané předpoklady.

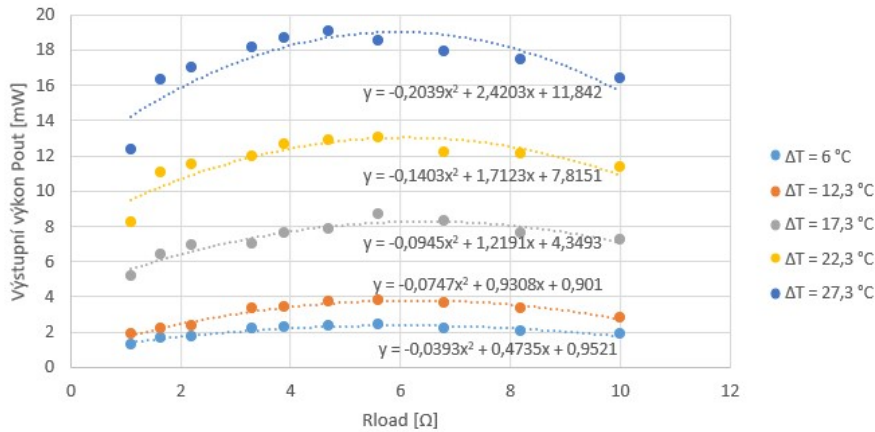


Obrázek 34: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEC1-12707

Další možností, jak vynést výkonovou závislost, je pro různé hodnoty zátěže. Jak bylo řečeno, použité zátěžové rezistory byly v rozsahu 1,1 - 1000 Ω . Do grafu 35 byly vyneseny pouze hodnoty v rozsahu 1,1 - 10 Ω . Je to z důvodu, že při vynesení diametrálně vyšších hodnot by vznikla v následujících výpočtech velká chyba.

Jelikož je výstupní výkon P_{out} nejvyšší při shodě vnitřního odporu R_{in} s odporem zátěže R_{load} , při vynesení bodů v této závislosti bude přesně vidět průběh tak, že lze určit hodnotu zátěže, při které dosahuje výkon svého maxima.

Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na zátěži pro
TEC1-12707



Obrázek 35: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEC1-12707

Jednotlivé body v grafu jsou proloženy polynomy druhého řádu. Rovnice každého proložení je v grafu zobrazena také. Vyšetřením průběhu funkce lze nalézt lokální maximum funkce, a tak zjistit hodnotu zátěže, při které je výstupní výkon nejvyšší. Tím lze zjistit vnitřní odpor baterie.

Jelikož bylo výše uvedeno, že se vnitřní odpor nemění, měl by být pro všechny vynesené křivky stejný. Proto byly vypočtené odpory zprůměrovány. Výsledný průměr je pak hodnota vnitřního odporu R_{in} viz tabulka 7.

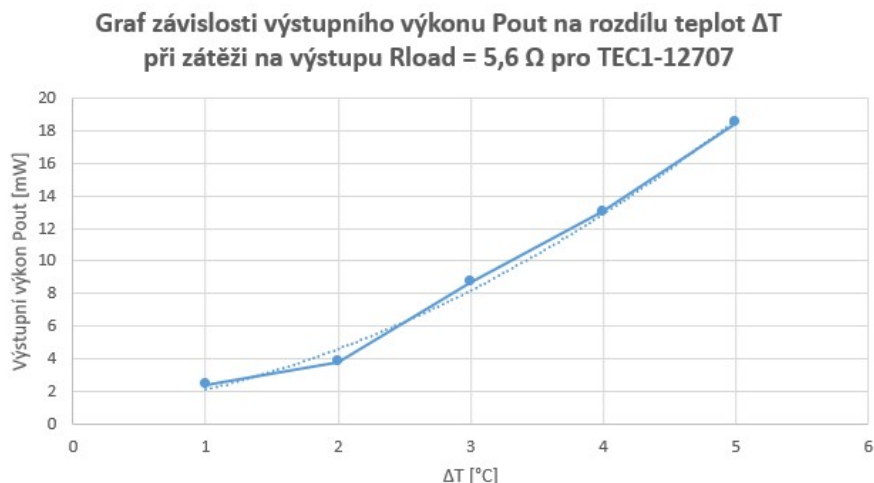
Tabulka 7: Hodnoty R_{in} pro baterii TEC1-12707

R_{in} měřené [Ω]	R_{in} průměr [Ω]
6,02	6,14
6,2	
6,45	
6,10	
5,94	

Jak je vidět, vypočítaný vnitřní odpor R_{in} se pohybuje kolem 6,14 Ω , což poměrně sedí s naměřenými daty, kdy byl nejvyšší výkon měřen na zátěži $R_{load} = 5,6 \Omega$.

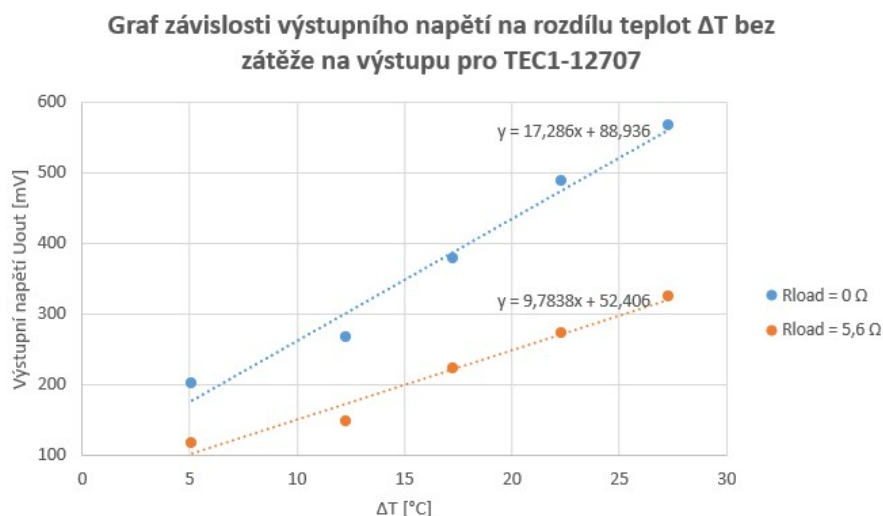
V dalším grafu 36 je vyneseno výstupní výkon P_{out} v závislosti na teplotním rozdílu ΔT . Vynesené hodnoty výkonu jsou právě pro zátěž, při které byl naměřen nejvyšší výkon, tedy $R_{load} = 5,6 \Omega$.

Je na snadě, že průběh výkonu bude opět narůstat s druhou mocninou. Body grafu jsou tedy znovu proloženy polynomem druhého řádu. Jak je vidět, body křivku poměrně dobře kopírují.



Obrázek 36: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-12707

Jako další charakterizující graf je graf závislosti výstupního napětí termoelektrického článku na rozdílu teplot 37. Napětí by mělo podle rovnice (1) narůstat lineárně s teplotním rozdílem a dále by mělo záviset na Seebeckových koeficientech charakterizujících celý článek.



Obrázek 37: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-12707

Jak je vidět, nárůst napětí je proložen lineární křivkou získanou pomocí metody nejmenších čtverců. Rovnice parametrizující přímkou je uvedena v grafu. V grafu jsou vyneseny dvě křivky, jedna je pro výstupní napětí bez zátěže a druhá pro zátěž, při které byl naměřen nejvyšší výstupní výkon.

Seebeckův koeficient pro TEC1-12707 zde můžeme získat z grafu jako směrnici přímkou. Výrobci bývá udáván právě pro nárůst napětí bez zátěže. Tedy nalezený Seebeckův koeficient pro tuto baterii je $\alpha = 17,286 \text{ mV/K}$. Graf je sice ve $^{\circ}\text{C}$, ale hodnota rozdílu teplot je pro $^{\circ}\text{C}$ i K stejná, takže lze jednotku zaměnit.

Pro kontrast je uvedena další přímka pro připojenou zátěž, která je nejbližší vnitřnímu odporu termoelektrického článku. Z grafu 37 je zřejmé, že nárůst napětí je podstatně nižší, tedy nižší by pak byl i Seebeckův koeficient, a to přibližně o polovinu.

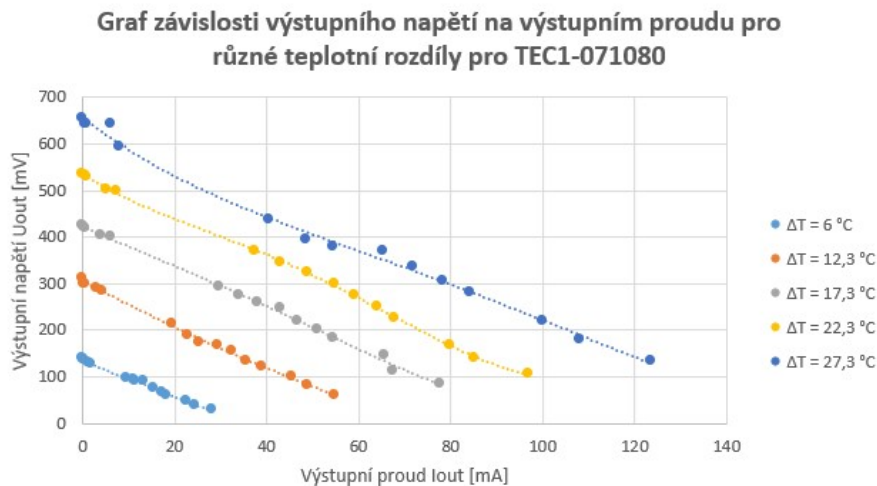
Pokud bychom chtěli vypočítat konkrétní hodnotu napětí na prázdko, kterou jsme schopni dosáhnout patřičným teplotním rozdílem na této křivce, tak by oproti rovnici (1) vypadala jako

$$U_{\text{out}} = 17,286\Delta T + 88,936 \quad (18)$$

kde U_{out} má jednotku mV. Rovnice (18) vychází z rovnice parametrizující křivku grafu 37.

7.4.2 TEC1-071080

První set dat je znovu vyneseno ve formě závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro různé teplotní rozdíly.



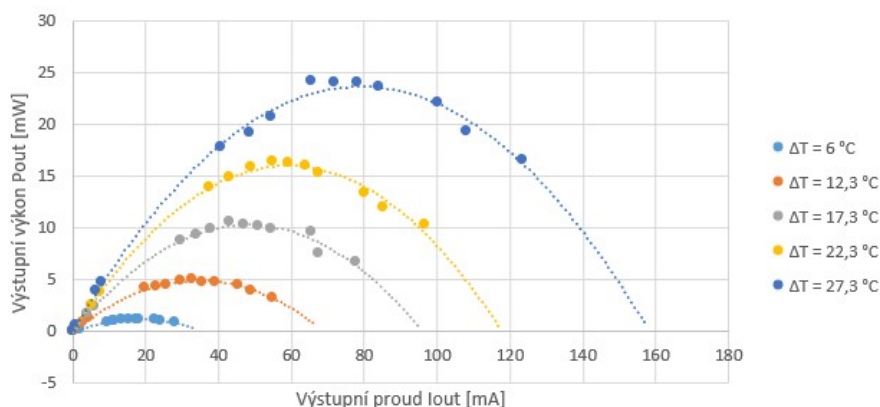
Obrázek 38: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-071080

Stejně jako tomu bylo v minulém případě, v grafu 38 je vidět, že dle předpokladů se se zvyšující teplotou zvyšuje výstupní napětí U_{out} . Body jsou proloženy křivkami a jeví se poměrně lineárně. Z toho lze znovu usuzovat, že vnitřní odpor termoelektrického článku R_{in} zůstává stejný.

V dalším kroku byl spočten výstupní výkon P_{out} z výstupního napětí U_{out} a výstupního proudu I_{out} podle vztahu (16).

Dle vztahu (17) lze opět očekávat kvadratickou závislost a parabolický průběh výkonu. To lze pozorovat v grafech 39 a 40. Evidentní je, že maximální výstupní výkon P_{out} je opět pro takovou zátěž, kdy vnitřní odpor R_{in} co nejvíce souhlasí s hodnotou zátěžového rezistoru R_{load} .

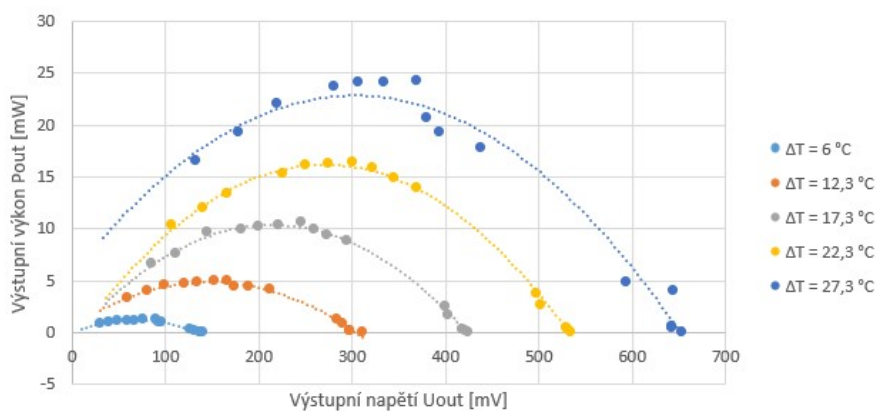
Graf závislosti výstupního výkonu na výstupním proudu pro
TEC1-071080



Obrázek 39: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEC1-071080

Na obou grafech se navíc opět potvrzuje, že s rostoucím rozdílem teplot ΔT roste výkon na výstupu. Body jsou taktéž znovu proloženy parabolou a křivku poměrně dobře respektují, čímž jsou opět potvrzeny předpoklady.

Graf závislosti výstupního výkonu na výstupním napětí pro
TEC1-071080



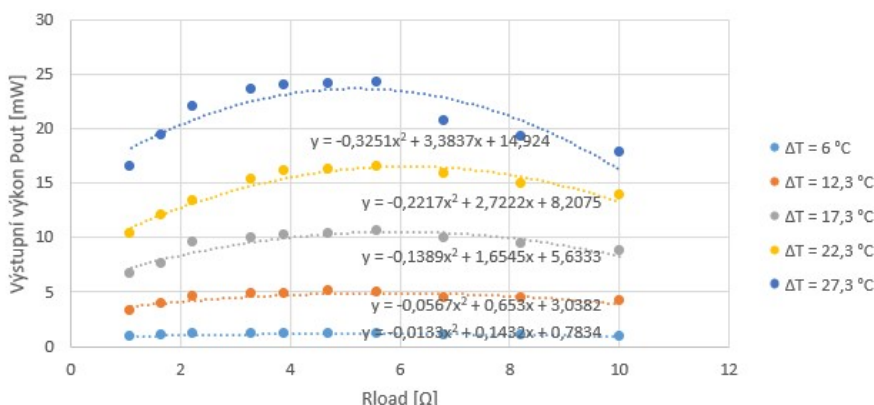
Obrázek 40: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEC1-071080

Další graf 41 zobrazuje vynesení hodnot výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} .

V grafu je dále osa x znovu redukovaná jen na část měřených hodnot, tedy konkrétně opět na 1,1 - 10 Ω .

Ze vzniklého grafu bude pomocí hledání lokálního maxima opět kalkulován vnitřní odpor termoelektrické baterie. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 8.

Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na zátěži pro TEC1-071080



Obrázek 41: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEC1-071080

Tabulka 8: Hodnoty R_{in} pro baterii TEC1-071080

R_{in} měřené [Ω]	R_{in} průměr [Ω]
5,38	5,69
5,76	
5,96	
6,14	
5,2	

Jak je vidět, vypočtený vnitřní odpor $R_{in} = 5,69 \Omega$, což se velmi shoduje s hodnotou zátěže $R_{load} = 5,6 \Omega$, při které byl naměřený nejvyšší výstupní výkon P_{out} .

Další graf 42 ukazuje závislost výstupního výkonu P_{out} na rozdílu teplot ΔT konkrétně pro hodnotu zátěže $R_{load} = 5,6 \Omega$.

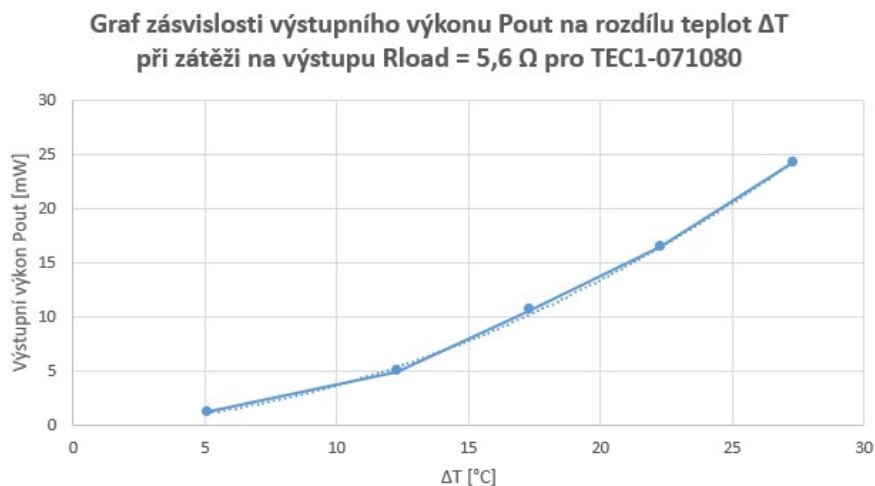
Body grafu jsou proloženy pomocí polynomu druhého řádu. Body prokládovou křivku velice dobře kopírují, což splňuje očekávání o nárůstu výkonu s druhou mocninou při zvyšování teplotního rozdílu ΔT .

Dalším a posledním grafem pro TEC1-071080 je graf 43 charakterizující nárůst výstupního napětí U_{out} v závislosti na teplotním rozdílu ΔT . V grafu jsou jako v případě zkoumání minulé baterie vyneseny dvě křivky, jedna pro napětí na prázdko a druhá pro napětí na zátěži s hodnotou $R_{load} = 5,6 \Omega$, při které je v měření dosaženo nejvyššího výstupního výkonu P_{out} .

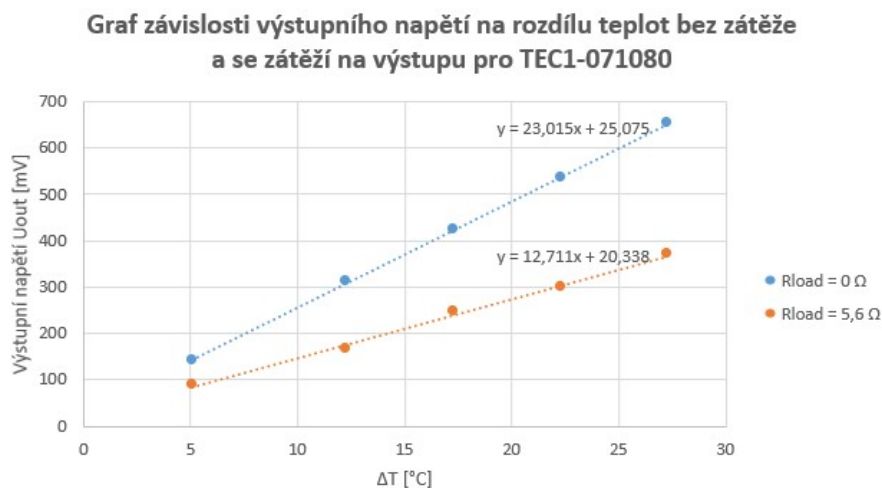
Body grafu jsou proloženy lineární křivkou zjištěnou pomocí metody nejmenších čtverců. Jak je vidět, body křivku téměř přesně kopírují, čímž je potvrzen předpoklad o lineárním nárůstu výstupního napětí U_{out} pro zvyšování teplotního rozdílu ΔT .

Z rovnic parametrizujících prokládové křivky, které jsou uvedeny v grafu 43 lze získat Seebeckův koeficient charakterizující článek. Opět Seebeckův koeficient je směrnici přímky, proto $\alpha = 23,015 \text{ mV/K}$. Znovu platí že při připojené zátěži je nárůst méně strmý. Pro výpočet výstupního napětí pro konkrétní teplotní rozdíl ΔT lze jako v minulém případě psát pro tuto křivku rovnici

$$U_{out} = 23,015\Delta T + 25,075 \quad (19)$$



Obrázek 42: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-071080



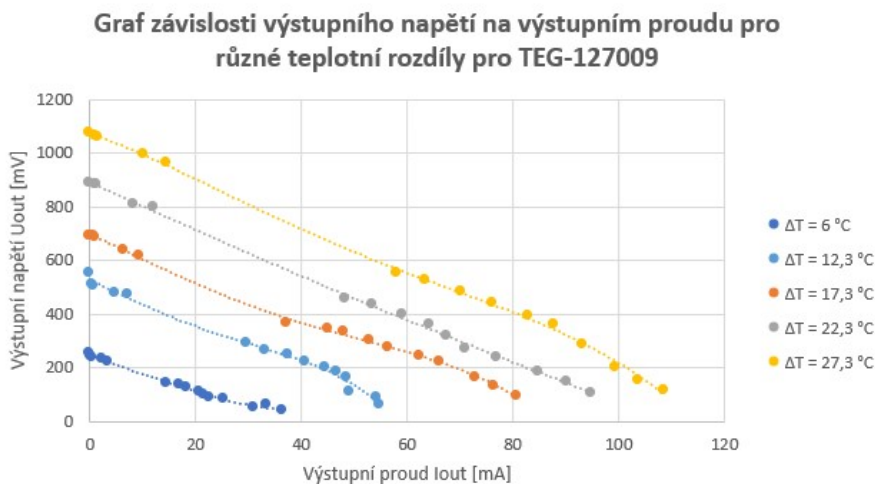
Obrázek 43: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEC1-071080

Jak je patrné z výše psaného textu, TEC1-071080 má vyšší Seebeckův koeficient α nežli TEC1-12707.

V další části následují termoelektrické baterie označené jako TEG.

7.4.3 TEG-127009

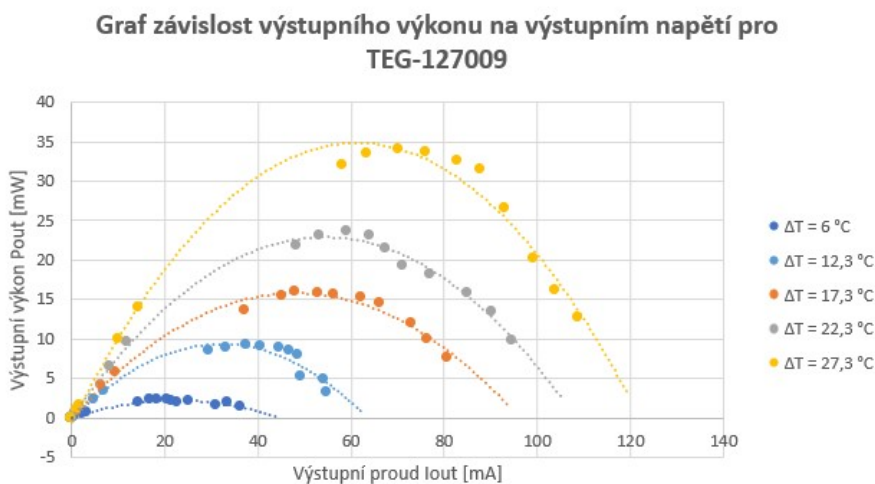
Vyhodnocení naměřených dat je ve shodném sledu jako u předchozích baterií. Jako první je vyneseno set dat jako graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro několik měřených teplotních rozdílů ΔT .



Obrázek 44: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127009

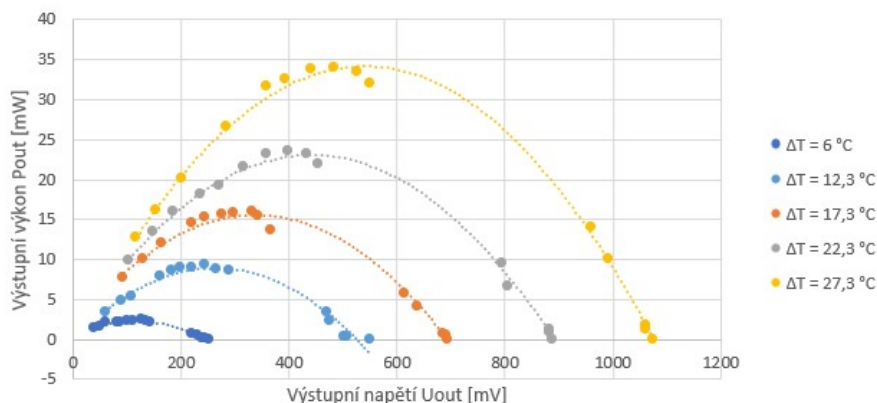
Jak je vidět z grafu 44, body jsou proloženy křivkami a znovu je potvrzen předpoklad o nárůstu výstupního napětí se zvyšujícím se teplotním rozdílem ΔT . Také lze opět konstatovat, že křivky mají stejný trend, jsou si velice podobné a průběhy jsou poměrně lineární. Proto je opět možné prohlásit, že vnitřní odpor termoelektrického článku R_{in} bude v tomto měření konstantní.

Po výpočtu výkonu jako v předchozích případech byly výsledky vyneseny do grafů stejných závislostí, tedy graf závislosti P_{out} na U_{out} a P_{out} na I_{out} . Grafy jsou uvedeny na obrázcích 45 a 46.



Obrázek 45: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127009

Graf závislosti výstupního výkonu na výstupním napětí pro TEG-127009

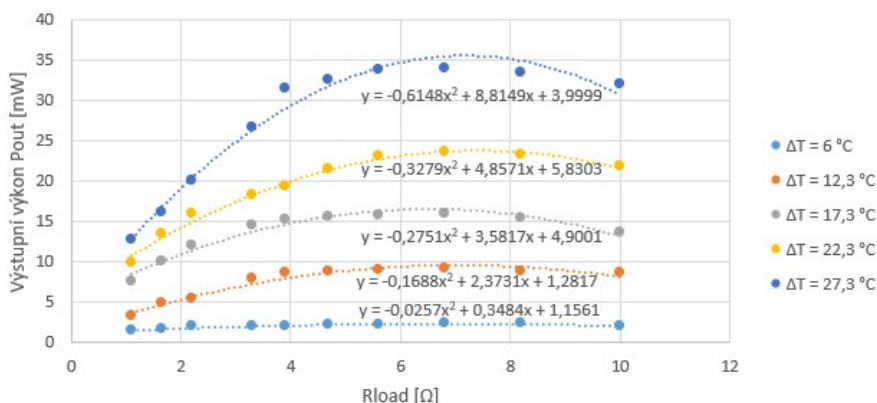


Obrázek 46: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127009

Body vynesené v obou předchozích grafech jsou znovu prokládány parabolou, kterou velice dobře kopírují. Maximálního výkonu je opět v bodě, kde se rovná R_{in} a R_{load} . S rostoucím ΔT také roste P_{out} .

Další graf 47 ukazuje závislost výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} . Jako v minulých případech je vodorovná osa omezena na část zátěžových odporů. S využitím předpokladu daném u prvního grafu lze takto opět spočítat vnitřní odpor článku.

Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na zátěži pro TEG-127009



Obrázek 47: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEG-127009

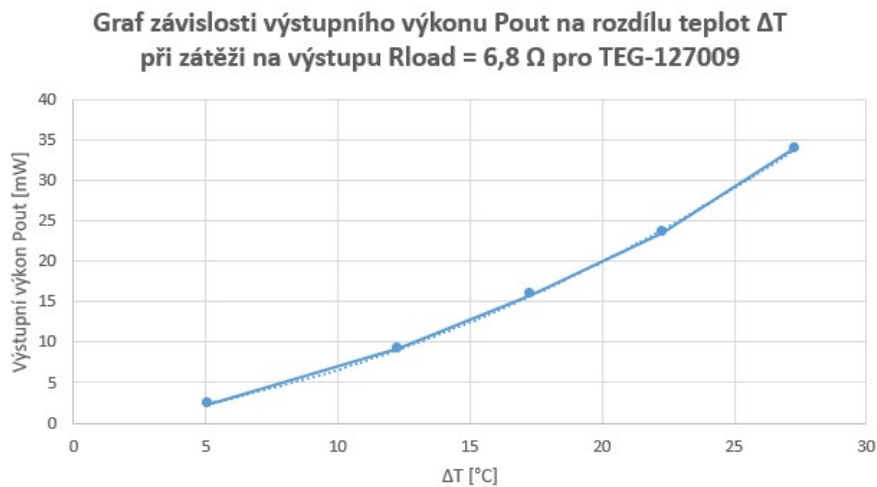
V následující tabulce 9 jsou uvedeny vypočtené hodnoty vnitřního odporu spočítané stejným způsobem jako u přechozích termoelektrických článků.

Jak je vidět, vypočítaná hodnota velikosti vnitřního odporu $R_{in} = 6,98 \text{ }\Omega$ se velmi přibližuje ohmické hodnotě zátěže $R_{load} = 6,8 \text{ }\Omega$, při které byl v experimentu měřen nejvyšší výkon na výstupu.

Tabulka 9: Hodnoty R_{in} pro baterii TEG-127009

R_{in} měřené [Ω]	R_{in} průměr [Ω]
6,78	6,98
7,03	
6,51	
7,40	
7,16	

Následující graf ukazuje závislost výstupního napětí U_{out} na rozdílu teplot ΔT . Graf 48 dále potvrzuje předpoklad o tom, že s rostoucím teplotním rozdílem narůstá výkon, a to tak že kvadraticky.



Obrázek 48: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127009

Graf je opět vyneseno pro hodnoty napětí naměřené na zátěži $R_{in} = 6,8 \Omega$, při které byl vypočten nejvyšší výkon na výstupu. Body grafu 48 jsou proloženy polynomem druhého řádu a jak lze vidět, prokladová křivka je prakticky překryta.

Posledním grafem charakterizujícím termoelektrický článek TEG-127009 je graf číslo 49. V tomto grafu je vynesena závislost výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT .

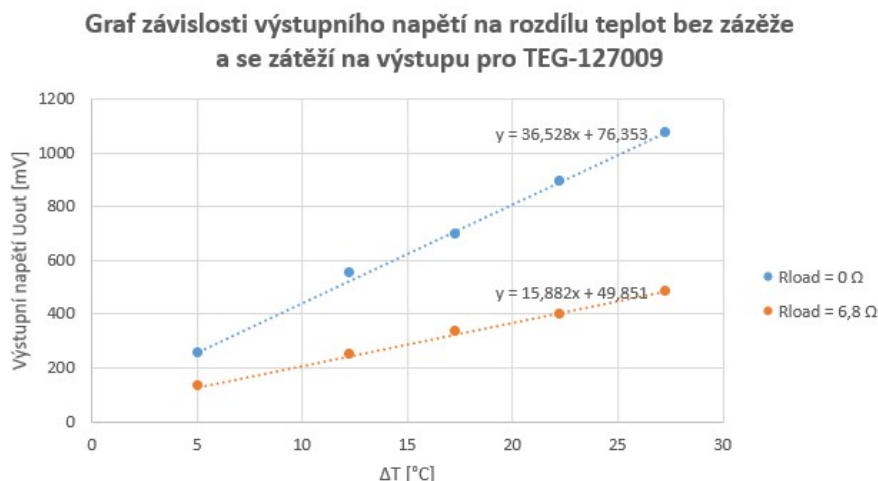
Do grafu jsou vyneseny dvě křivky, stejně jako u minulých článků. Jednotlivé body jsou proloženy přímkou, jejíž parametrizace byla spočtena pomocí metody nejmenších čtverců. Jelikož body poměrně přesně kopírují přímkou, je evidentní, že je potvrzen předpoklad o lineárním nárůstu napětí při změně teplotního rozdílu. Rovnice jsou uvedeny v grafu.

Z rovnic lze opět získat charakteristickou vlastnost termoelektrických článků, a to jeho Seebeckův koeficient. V tomto případě je $\alpha = 36,528 \text{ mV/K}$. Druhá přímkou je zde taktéž uvedena pro porovnání, že nárůst napětí není stejný s a bez zátěže na výstupu. Jako v předchozích případech je nárůst napětí pro hodnotu zátěže co nejbližší vnitřnímu odporu oproti stavu na prázdko přibližně poloviční.

Pro výpočet výstupního napětí pro konkrétní teplotní rozdíl na této křivce pak lze článek charakterizovat rovnicí

$$U_{\text{out}} = 36,528\Delta T + 76,352 \quad (20)$$

kde U_{out} má opět jednotku mV a celá rovnice vychází z rovnice přímky uvedené v grafu.



Obrázek 49: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127009

7.4.4 TEG-127020

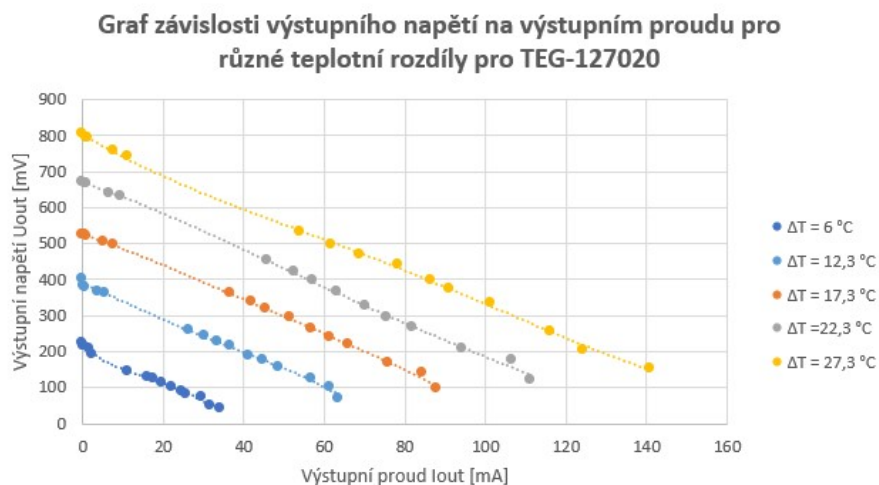
Pro poslední zkoumaný článek byla data zpracovávána a vyhodnocována opět stejným způsobem jako u článků minulých. První set dat byl vynesena jako volt-ampérová charakteristika závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} .

Dle předpokladu lze pozorovat v grafu 50, že s rostoucím teplotním rozdílem ΔT se zvyšuje napětí. Body grafu jsou proloženy křivkou a ta se jeví jako poměrně lineární. Trend všech křivek je stejný, a navíc jsou si křivky velice podobné. Z toho lze opět usuzovat, že v rámci měření zůstává vnitřní odpor R_{in} termoelektrického generátoru TEG-127020 stejný. Tohoto tvrzení bude opět dále využito.

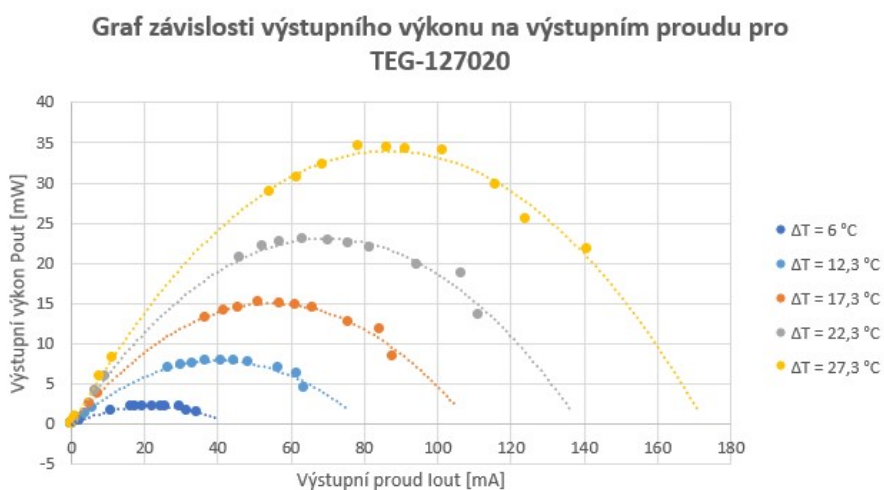
Následoval výpočet výstupního výkonu P_{out} z hodnot výstupního proudu I_{out} a napětí U_{out} . Vypočtené hodnoty se dále vynesli v závislosti právě na výstupním proudu I_{out} či výstupním napětí U_{out} do dvou grafů 51 a 52.

Je patrný stejný závěr, jako u předchozích případů, a to, že výstupní výkon má parabolický průběh, přičemž dosahuje svého maxima v bodě, kde se rovná hodnota zátěžového odporu R_{load} a vnitřního odporu TEG-127020 R_{in} . Zároveň se zvyšujícím se teplotním rozdílem ΔT samozřejmě také narůstá maximální dosažitelný výkon.

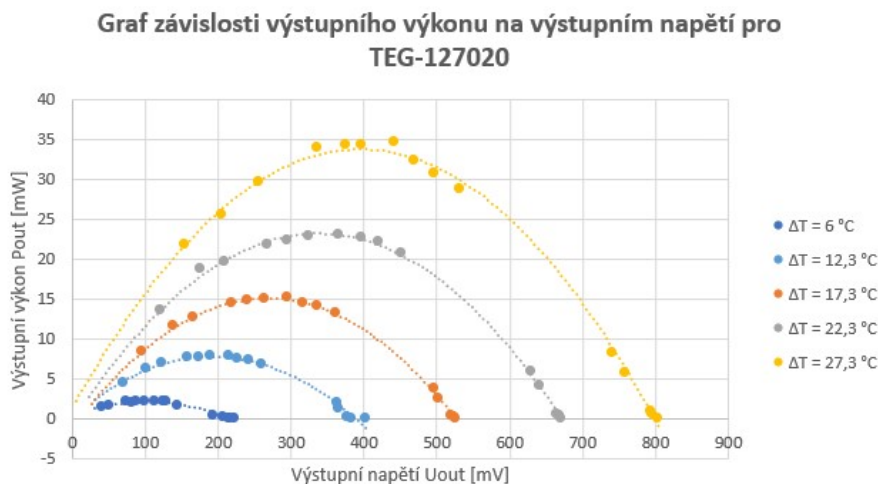
Další graf 53 je vynesení výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže. Osa vynášející zátěž je opět redukována na rozsah měřených hodnot 1,1 - 10 Ω . Při využití předpokladu daného u prvního grafu můžeme jako v předchozích případech z tohoto grafu vypočítat matematicky hodnotu vnitřního odporu R_{in} .



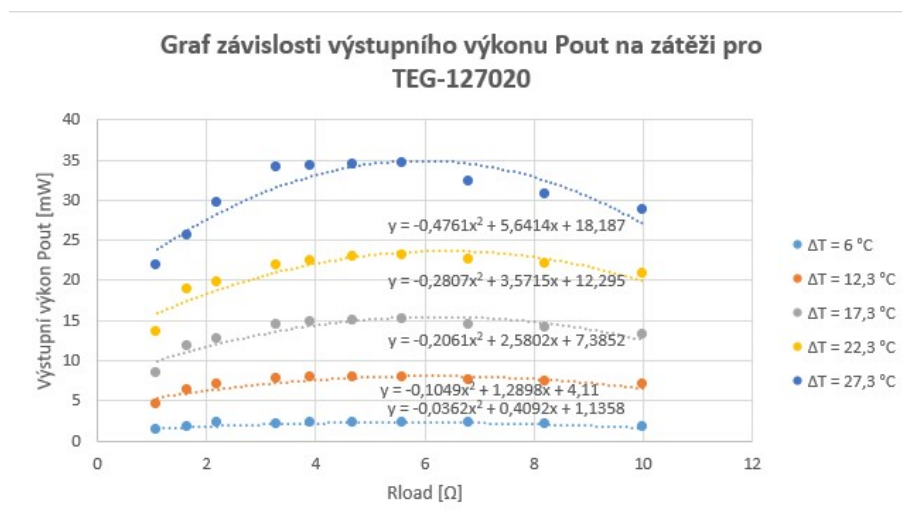
Obrázek 50: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127020



Obrázek 51: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním proudu I_{out} pro baterii TEG-127020



Obrázek 52: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na výstupním napětí U_{out} pro baterii TEG-127020



Obrázek 53: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na hodnotě zátěže R_{load} pro baterii TEG-127020

Jak je vidět, v grafu 53 jsou uvedeny rovnice, ze kterých byl matematicky zjišťován vnitřní odpor TEG-127020. Vypočtené hodnoty a konečná průměrná hodnota jsou uvedeny v tabulce 10.

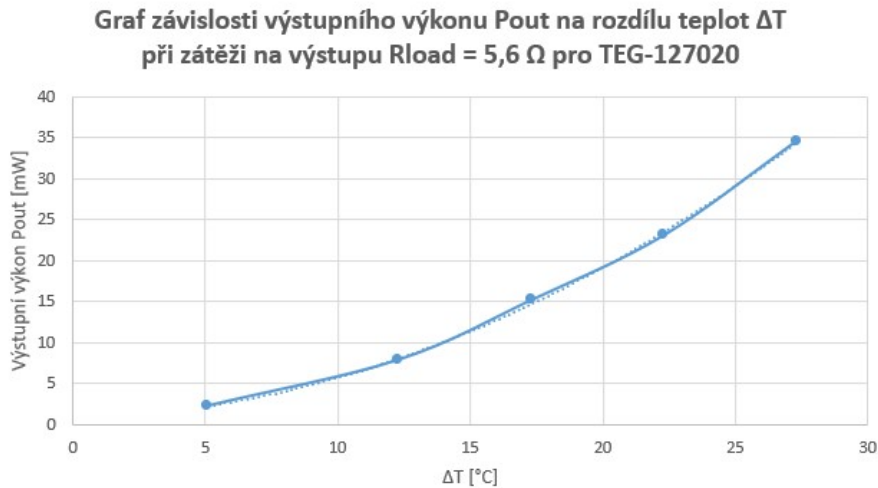
Výpočty bylo zjištěno $R_{in} = 6,07 \Omega$. To se shoduje s naměřenými hodnotami, kde nejvyšší hodnota výkonu byla měřena na zátěži $R_{load} = 5,6 \Omega$, což je nejbližší hodnota z hodnot testovaných.

V dalším grafu 54 je vynesena závislost výstupního výkonu P_{out} na rozdílu teplot ΔT . Hodnoty výkonu jsou pro zátěž, na níž byl měřen nejvyšší výstupní výkon P_{out} .

Body grafu jsou proloženy polynomem druhého řádu a jak je patrné, body prokládají velice dobře kopírují. Výkon na výstupu tedy se zvyšujícím se rozdílem teplot kvadraticky narůstá.

Tabulka 10: Hodnoty R_{in} pro baterii TEG-127020

R_{in} měřené [Ω]	R_{in} průměr [Ω]
5,65	6,07
6,15	
6,26	
6,36	
5,92	



Obrázek 54: Graf závislosti výstupního výkonu P_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127020

Poslední graf 55 charakterizující chování termoelektrického článku TEG-127020 ukazuje závislost výstupního napětí článku U_{out} na rozdílu teplot. Jak již bylo zmíněno a předpokládáno dříve, nárůst napětí by měl být dle rovnice (1) lineární.

V grafu jsou tedy body proloženy lineární křivkou, která je opět získána pomocí metody nejmenších čtverců. Rovnice tuto křivku parametrizující je uvedena v grafu. Je dále jasně vidět, že průběh je skutečně lineární a vynesené body velice přesně křivku kopírují.

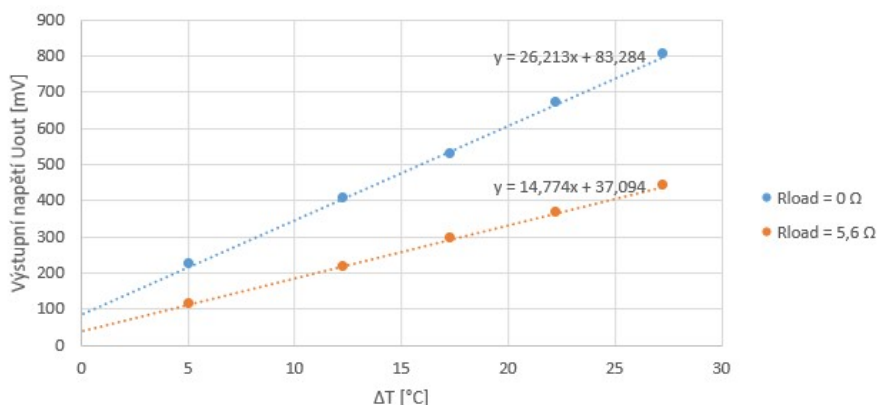
Z tohoto grafu je dále možné získat Seebeckův koeficient jako směrnici křivky. Potom $\alpha = 26,213 \text{ mV/K}$. Pro kontrast je v grafu také příčka ukazující nárůst napětí při připojení zátěži nejbližší vnitřnímu odporu baterie. Je evidentní, že nárůst napětí na 1 K je méně strmý, konkrétně je přibližně poloviční.

Pokud bychom chtěli zjistit konkrétní výstupní napětí pro daný teplotní rozdíl na křivce, kombinací rovnic (1) a rovnice uvedené v grafu získáme rovnici

$$U_{out} = 26,213\Delta T + 83,284 \quad (21)$$

kde U_{out} má jednotku mV.

Graf závislosti výstupního napětí na rozdílu teplot bez zátěže a se zátěží na výstupu pro TEG-127020



Obrázek 55: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterii TEG-127020

7.5 Vyhodnocení výsledků

V kapitole 7.4 byly předloženy hlavně grafickou formou naměřené výsledky parametrů čtyř termoelektrických článků. Nyní lze mezi sebou jednotlivé termoelektrické baterie porovnat a zvolit nejvhodnější pro další použití.

Podstatné je také říct, že data ohledně vnitřních odporů termoelektrických článků uváděná v datasheetech, ač pro mnohem větší teplotní rozdíly, jsou oproti zjištěným hodnotám poměrně hodně odlišná. To by mohlo při impedančním přizpůsobování bez předchozího měření způsobit podstatné problémy.

První ze zásadních věcí charakterizující činnost termoelektrického generátoru je Seebeckův koeficient α . Prvotně se tedy lze podívat na zjištěné výsledky tohoto parametru. Dle grafů 37, 43, 49 a 55 lze tyto hodnoty porovnat. Je dále evidentní, že hodnoty Seebeckova koeficientu α jsou pro baterie označené jako TEG lepší než pro označení TEC.

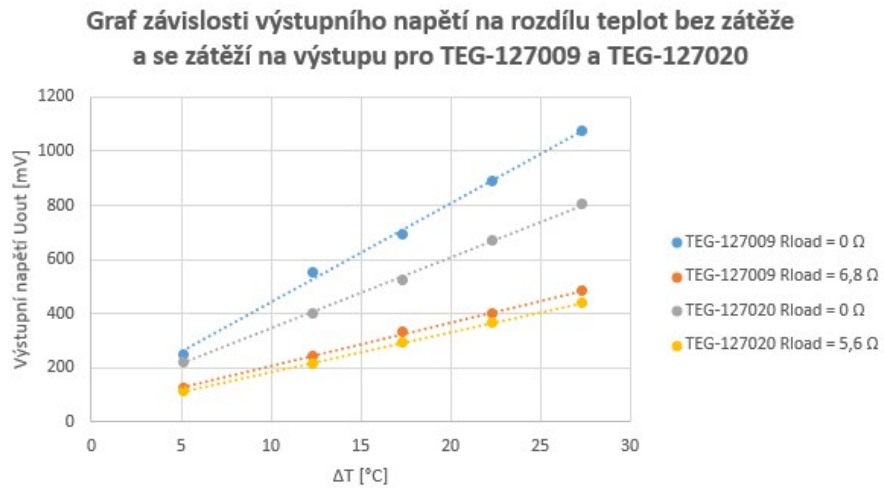
Obecně parametry naměřené pro peltierovy články označené jako TEC byly naměřené parametry horší nežli pro TEG, což potvrzuje předpoklad daný v sekci 7.1. Naměřeny byly nižší hodnoty proudu i napětí, čímž je jasné, že výstupní výkon článků s označením TEC bude taktéž menší. Tím je pro další práci na snadě, že bude voleno mezi dvěma články s označením TEG.

Články TEG-127009 a TEG-127020 mají přibližně stejné naměřené parametry. Oba dva dosahují přibližně stejného výstupního výkonu při stejných teplotních rozdílech. Pokud se blíže podíváme na graf 56, lze vidět, že ačkoliv má TEG-127009 vyšší Seebeckův koeficient pro napětí na prázdko, při připojení zátěže, která se nejvíce blíží vnitřnímu odporu článku je parametr dosti podobný baterii TEG-127020. Tím spíše, že pro TEG-127020 byla připojená zátěž, při níž byl naměřen nejvyšší výkon, vzdálenější od skutečného vnitřního odporu o více desetín Ohmu, což by teoreticky mohlo rozdíl smazat úplně.

Dále je brán v potaz vnitřní odpor článků. Žádoucí je spíše menší, a to z těchto dvou splňuje TEG-127020 s hodnotou téměř o 1Ω menší nežli TEG-127009. Podle grafů 48 a 54 lze vidět, že nárůst výstupního výkonu se zvyšujícím se teplotním

rozdílem má strmější také právě TEG-127020, ačkoliv pro menší teplotní rozdíly v tomto velký rozdíl není.

Jelikož jsou články označené TEG ve svém chování navzájem velmi podobné, rozhodl jsem se nakonec dále využít rozměrově větší termoelektrický článek s označením TEG-127020.



Obrázek 56: Graf závislosti výstupního napětí U_{out} na teplotním rozdílu ΔT pro baterie TEG-127009 a TEG-127020

8 Návrh obvodu pro management a ukládání získané energie, jeho realizace a testování na těle

V sekci 3 byla popsána důležitost využití managementu získané energie pro její další efektivní využívání. Ve stejné kapitole byly také uvedeny příklady obvodů sloužící pro zajištění této činnosti.

8.1 Návrh

Krom dvou popsaných integrovaných obvodů existuje několik dalších pracujících na podobném principu step-up měniče. Z uvedených byl pro další práci zvolen obvod s označením LTC3108 3.2.1. Jeho parametry a funkce velmi dobře vyhovují pro použití termoelektrického článku jako zdroje při nízkých teplotních rozdílech.

Vytvořené schéma je přiloženo v přílohách jako obrázek 61. Schéma je tvořeno z několika částí a je navrženo tak, aby ho bylo možné využít pro větší množství aplikací.

Na vstupu je umístěn DC-DC zvyšující transformátor označený 74488540070 s cívkami v poměru 1:100. Dle naměřených hodnot v předchozí kapitole je jasné, že TEG je schopen dodat napětí vyšší nežli 20 mV, čímž je zajištěno, že obvod bude mít dostatečné napájení. Za trafem je umístěno LTC3108. Sekundár transformátoru je připojen na step-up měnič pro zvýšení nízkého vstupního napětí.

Na vstupy C_1 a C_2 byly podle zapojení v datasheetu připojeny kondenzátory o hodně 1 nF a 330 pF. C_1 je kondenzátor připojený k nábojové pumpě a C_2 je připojen k rezonančnímu oscilátoru.

Výstupní napětí se nastavuje pomocí pinů VS_1 a VS_2 . Konkrétně připojení na zem nebo na napětí V_{AUX} . Připojením VS_1 na V_{AUX} a VS_2 na GND je na výstupu na pevně nastavené napětí 3,3 V. Na výstupu je dále připojen kondenzátor zajišťující pokrytí špiček při odběru. Byl zvolen kondenzátor A765KN567M0JLAE012 o kapacitě $C_{OUT} = 560 \mu\text{F}$.

Na výstup V_{STORE} je připojen superkondenzátor sloužící k ukládání získané energie a k jejímu případnému budoucímu využití. Zvolen byl pro demonstraci funkce superkondenzátor označený jako FYD0H473ZF. Jeho kapacita je $C_{STORE} = 47 \text{ mF}$.

Konkrétně možnosti akumulace energie se budu dále věnovat. Návrh ovšem obsahuje další části, kde je možné energii využívat ještě dalším způsobem.

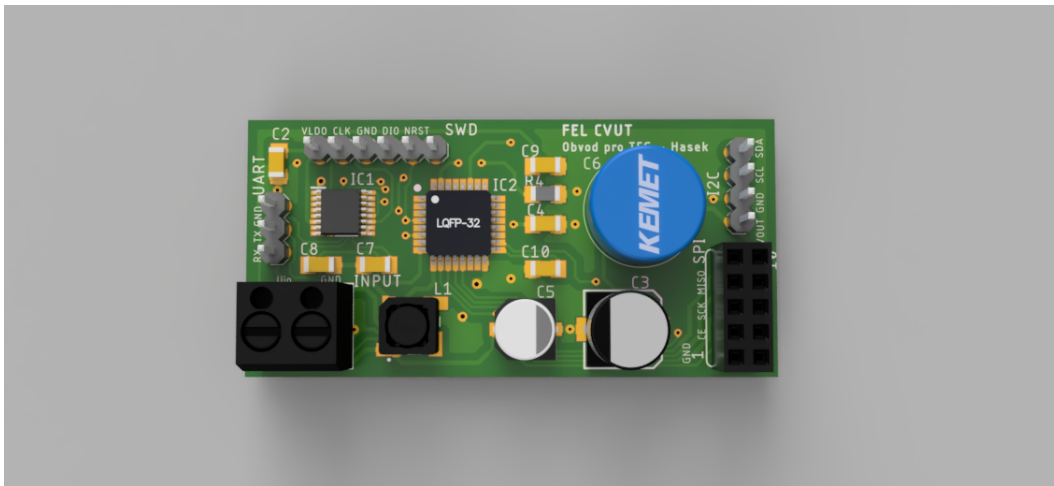
Pro umožnění dalších funkcí je nutné využít mikroprocesoru k řízení dalších kroků. Mikroprocesor musí být ideálně takový, který má velice nízkou spotřebu a lze ho uvést do režimu spánku, kde jde jeho spotřeba prakticky k nule. Takový procesor je například STM32L072KZT6. Rozsah napájecích napětí je 1,65 - 3,6 V. Lze ho tedy přímo připojit k výstupu LTC3108 nazvaném jako V_{LDO} , který drží stálé napětí 2,2 V. Spotřeba při spánkovém režimu, kdy je zachovávána paměť RAM je nižší nežli 1 μA .

Mikroprocesor je dále zapojen podle minimálních požadavků z datasheetu. Jako vstupních a výstupních periférií je využito sběrnic procesoru. Návrh počítá s tím, že na sběrnici I2C je připojen senzor teploty a vlhkosti označený jako HTU21D GY-21. Jeho odběr je velice malý a lze ho uvést do spánkového režimu.

Naměřená data jsou zpracována procesorem a po sběrnici SPI lze bezdrátově odeslat například pomocí komunikačního modulu s čipem NRF24L01+ a integrovanou anténou. Tento čip lze taktéž uvést do spánkového režimu pro snížení spotřeby.

8.2 Tvorba DPS

Ze schématu byl dále vytvořen layout. Jeho podobu lze vidět v příloze na obrázku 62 a 63. Při plném osazení by deska vypadala jako na obrázku 57 modelovaném pomocí programu Autodesk Fusion 360.



Obrázek 57: Model DPS vytvořený pomocí programu Autocad Fusion 360

Pro potřeby měření ukládání energie v superkondenzátoru není potřeba na desku pájet mikroprocesor.

Při samotném pájení a oživování obvodu nastala při práci jedna chyba, která byla způsobena nesprávným veřejně dostupným layoutem pro DC-DC transformátor. Po analýze problému došlo k závěru, že je celý layout pootočen o 90°, takže stačilo pouze trafo odpájet a připájet otočené o 90°.

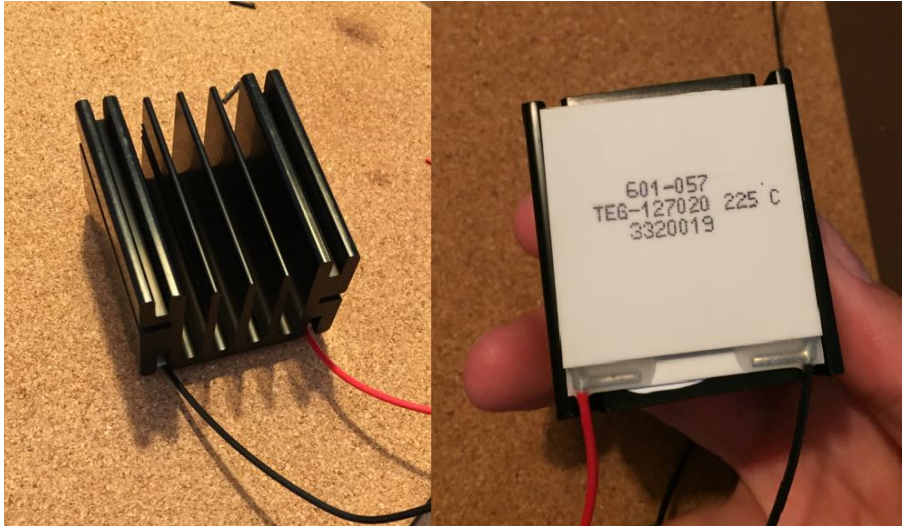
Po připojení všech komponentů na desku bylo možné započít s měřením.

8.3 Testování na lidském těle a měření

Jak bylo zmíněno, pro harvesting energie byl zvolen TEG-127020. Na studenou stranu článku byl pomocí teplovodivé pasty připevněn černý hliníkový chladič viz obrázek 58. Teplá strana je při používání těsně přiložena k předloktí. Celý systém je tedy závislý na okolních podmínkách. Jak bylo ovšem dokázáno v sekci 7.4, při měřených teplotních podmínkách TEG vždy přesahoval hranici minimálního napětí na vstupu LTC3108. LTC3108 navíc dokáže optimalizovat svůj vstupní odpor k dosažení maximálního výkonu.

Naměřená teplota v místnosti byla $T_c = 23,2$ °C. Teplota ruky je již dříve zjištěných $T_h = 32,2$ °C. Rozdíl teplot mezi rukou a okolím tedy činil 9 °C. Napětí na prázdko dosáhlo svého maxima na $U_{OUT} = 121,5$ mV. Oproti měření v ideálních podmínkách pomocí měřicího přípravku je takto napětí podstatně nižší.

Jelikož ostatní charakteristiky článku jsou známy, následovalo připojení do celého obvodu. Přesně podle popisu ze sekce 3.2.1 se nejprve začal nabíjet kondenzátor na výstupu. Čas potřebný pro nabití kondenzátoru z jeho nulové hodnoty napětí, tzv. studený start, trvá oproti dalšímu nabíjení nejvíce času.



Obrázek 58: TEG s hliníkovým chladičem

Naměřený čas od připojení TEGu do ustáleného stavu byl roven $t_{\text{cold}} = 36,4$ s. V tu chvíli se, ač by dle datasheetu mělo být na výstupu 3,3 V, napětí ustálilo na 3 V.

Energii, která se uložila v kondenzátoru na výstupu, lze spočítat jako

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 560 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 = 2,52 \text{ mJ} \quad (22)$$

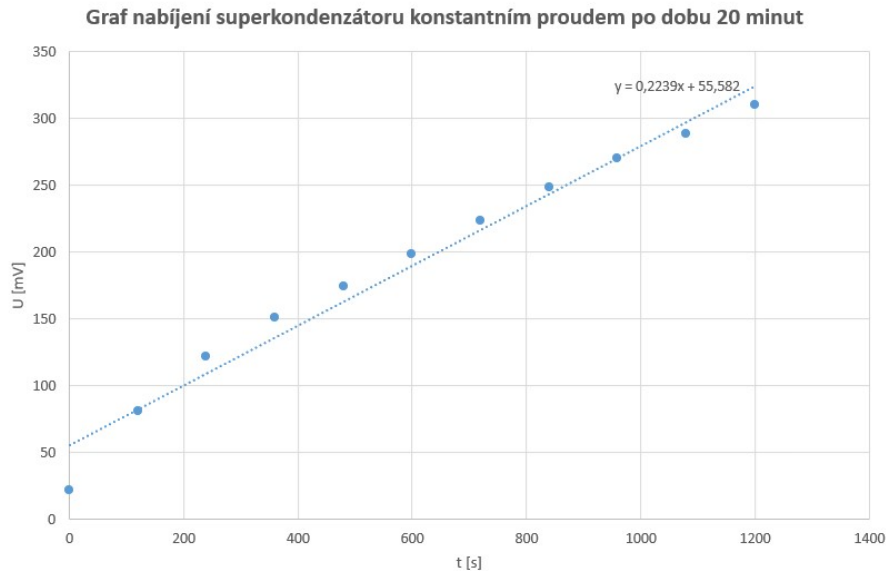
Pokud na výstup připojíme LEDku, je schopna začít trvale slabě svítit, přičemž na výstupním kondenzátoru klesne napětí na 2,54 V.



Obrázek 59: LED připojená na výstup obvodu

Jakmile je nabitý výstupní kondenzátor, tedy napětí na výstupu dosáhne nastavené hodnoty, LTC3108 začne ukládat energii do superkondenzátoru. Superkondenzátor může po odpojení zdroje tvořit záložní zdroj pro napájení celého obvodu.

Měření bylo provedeno ve dvacetiminutovém intervalu, kde byly po dvou minutách odečítány hodnoty napětí viz graf 60. Graf je proložen lineární křivkou, jelikož by napětí mělo při konstantním proudu narůstat lineárně s časem. Rovnice pro křivku zjištěna metodou nejmenších čtverců je uvedena v grafu.



Obrázek 60: Graf nabíjení superkondenzátoru

Ze směrnice prokladové křivky lze zjistit, za jakou dobu se superkondenzátor nabije na maximální hodnotu napětí 5,25 V.

$$t_{\text{store}} = \frac{5,25}{0,2239 \cdot 10^{-3}} = 23447,9 \text{ s} = 390,8 \text{ min} = 6,5 \text{ h} \quad (23)$$

Konstantní proud nabíjející superkondenzátor lze vypočítat jako

$$I_{\text{nab.}} = C \frac{\Delta U}{\Delta t} = 0,047 \cdot \frac{(269,9 - 80,9) \cdot 10^{-3}}{960 - 120} = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 10,6 \mu\text{A} \quad (24)$$

Energie uložená v superkondenzátoru po nabíjení po dobu 20 minut je

$$W_{20\text{min}} = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,047 \cdot 309,8 \cdot 10^{-3} = 0,00226 \text{ J} = 2,26 \text{ mJ} \quad (25)$$

Po nabití do maximální hodnoty bude v kondenzátoru uložena energie

$$W_{\text{full}} = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,047 \cdot 5,25^2 = 0,64771 \text{ J} = 647,71 \text{ mJ} \quad (26)$$

9 Návrh dalších vylepšení

Při měření a fyzické realizaci byly zjištěny body, které by šly udělat jinak a lépe pro zlepšení jak měřicího modelu, tak vytvořeného obvodu pro zpracovávání získané energie.

Nedostatkem vytvořeného přípravku pro měření na termoelektrických člancích je nastavování teploty. A to jak pro teplý, tak pro studený konec. Při nahřívání výkonových rezistorů je problémem jistý ofset. Ten mohl místy způsobovat méně přesné nastavení teploty. Pro co nejpřesnější měření by bylo optimální celý systém řídit například pomocí programu Labview, který umožňuje komplexní řízení systému se zpětnou vazbou. Tím by se zajistily přesnější výsledky.

V práci byl proveden návrh multifunkčního systému pro energy harvesting, ale fyzicky bylo realizováno pouze nabíjení superkondenzátoru, což je jen jedna částečná funkce. Jako vylepšení se tedy nabízí uvedení celého systému do provozu. Nutné by bylo napsat program pro mikrokontroler, který by byl schopen po sběrnici I2C přečíst data poskytovaná senzorem a následně je pomocí bezdrátového modulu odesílat. To celé dále řídit tak, aby byla data měřena a odesílána pouze ve chvíli, kdy bude mít systém naakumulovaný dostatek energie.

10 Závěr

V rámci této práce byla nejprve provedena rešerše na téma analýzy termoelektrických článků pro napájení v biomedicině. V práci bylo probráno obecné téma energy harvesting, které se následně zaměřilo na sběr energie z tepelných zdrojů. Jako konkrétní zdroj je vybráno lidské tělo.

Práce se dále zabývala návrhem měřicí metody, přípravku pro měření a následným výzkumem na vybraných termoelektrických člancích při nízkých teplotních rozdílech. Zkoumány byly parametry jako výstupní proud a napětí, maximální výstupní výkon nebo Seebeckův koeficient.

Po zhodnocení výsledků byl pro další práci zvolen TEG-127020, jehož naměřený vnitřní odpor $R_{in} = 6,07 \Omega$. Ač neměl nejvyšší Seebeckův koeficient pro napětí na prázdko z měřených baterií, po připojení zátěže nejbližší vnitřnímu odporu byl Seebeckův koeficient $\alpha = 14,7 \text{ mV/K}$ prakticky stejný jako u porovnávaného článku TEG-127009.

Dalším krokem byl návrh a realizace desky plošného spoje. Jako základní stavební kamen byl použit integrovaný odpor LTC3108, který umožňuje management získané energie. Před obvod bylo vřazeno DC-DC trafo umožňující obvod používat již od 20 mV na vstupu. Díky měření bylo potvrzeno, že TEG-127020 je schopen takového napětí dodat.

Pro ukládání energie byl použit superkondenzátor o kapacitě $C_{store} = 47 \text{ mF}$. Bylo zjištěno, že plného nabití dosáhne po 6,5 h a celkem v něm může být uloženo až 647,71 mJ. Tato uložená energie může následně sloužit pro napájení celého systému, pokud není dostupný primární zdroj.

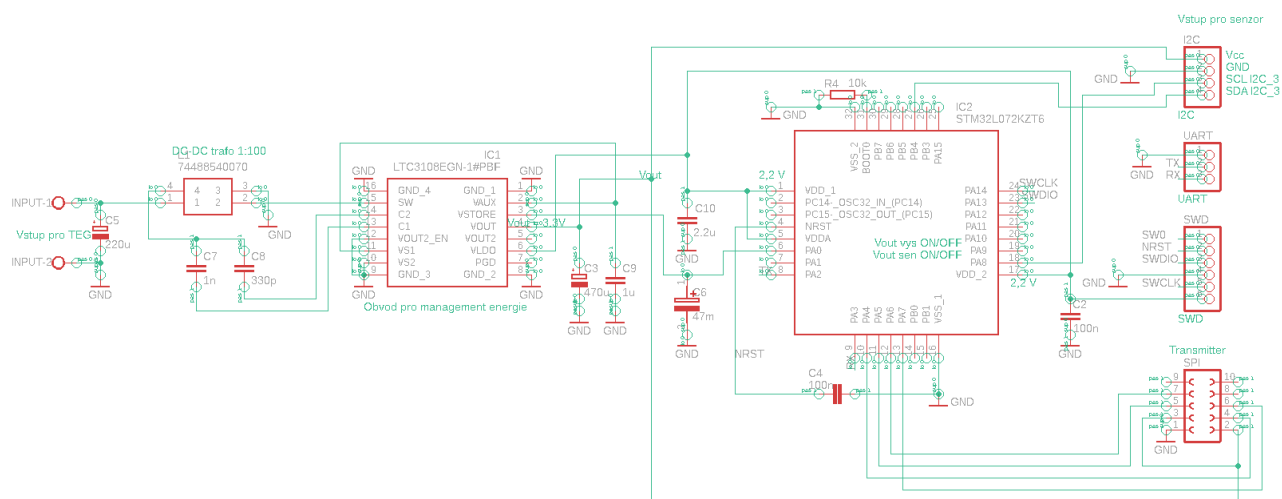
Literatura

- [1] R. Ahmed, Zeeshan, M. U. Mehmood, A. Mannan, J. Y. Lee, S. H. Lim, and W. Chun. Design and performance analysis of powering a wireless ear-phone by a thermoelectric generator. *IEEE Access*, 9:54457–54465, 2021. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062086.
- [2] Analog Devices. *LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*, 2019. Rev. D <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>.
- [3] O. Ando Junior, A. Maran, and N. Henao. A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:376–393, 2018. ISSN 1364-0321.
- [4] S. Beeby and N. White. *Energy harvesting for autonomous systems*. Artech House, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062, 2010. ISBN 978-1-59693-718-5.
- [5] C. Chen, T.-B. Xu, A. Yazdani, and J.-Q. Sun. A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic — system design and road test. *Applied Energy*, 299:117–331, 2021. ISSN 0306-2619.
- [6] R. Cope and Y. Podrazhansky. The art of battery charging. In *Fourteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference (Cat. No.99TH8371)*, pages 233–235, 1999. doi.org/10.1109/BCAA.1999.795996.
- [7] J. Fairbanks, N. B. Marriott, and M. Rockville. Vehicular thermoelectric applications. In *6th European Conference on Thermoelectrics July*, pages 2–4, 2008.
- [8] L. Ga, Z. Zhang, D. Xu, and W. Li. Performance of thermoelectric conversion device with power management module based on shallow soil-air temperature difference. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28:101582, 2021. doi.org/10.1016/j.csite.2021.101582. ISSN 2214-157X.
- [9] B. Gyselinckx, C. Van Hoof, J. Ryckaert, R. Yazicioglu, P. Fiorini, and V. Leonov. Human++: autonomous wireless sensors for body area networks. In *Proceedings of the IEEE 2005 Custom Integrated Circuits Conference, 2005.*, pages 13–19, 2005. doi.org/10.1109/CICC.2005.1568597.
- [10] M. Hyland, H. Hunter, J. Liu, E. Veety, and D. Vashaee. Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting. *Applied Energy*, 182:518–524, 2016. doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.150. ISSN 0306-2619.
- [11] F. Jacob. *Handbook of Modern Sensors : Physics, Designs, and Applications.*, volume Fifth edition. Springer, 2016. doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8. ISBN 978-3-319-19303-8.
- [12] S. Kim and P. H. Chou. *Energy Harvesting with Supercapacitor-Based Energy Storage*, pages 215–241. Springer International Publishing, Cham, 2015. doi.org/10.1007/978-3-319-14711-6_10. ISBN 978-3-319-14711-6.

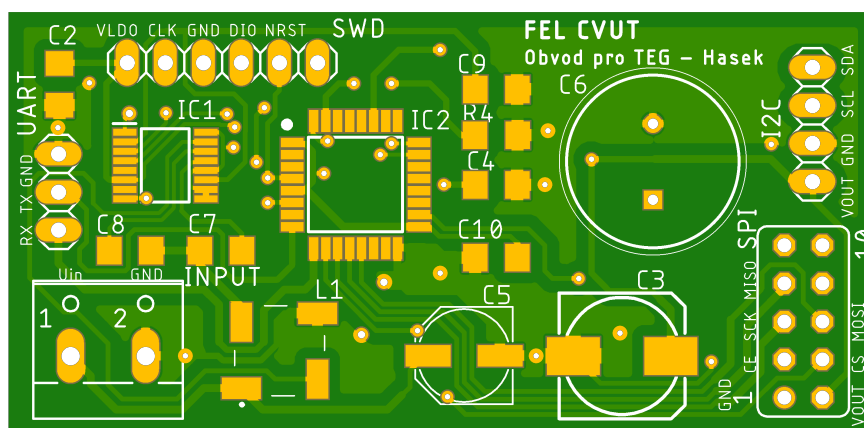
- [13] Linear Technology Corporation. *LTC3109 Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*, 2010. LT 0813 Rev. B <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3109fb.pdf>.
- [14] J. Martins, F. P. Brito, L. Goncalves, and J. Antunes. Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes. *Artigo*, 2011.
- [15] C. O. Mathúna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. *Talanta*, 75(3):613–623, 2008. Special Section: Remote Sensing. ISSN 0039-9140. doi.org/10.1016/j.talanta.2007.12.021.
- [16] P. D. Mitcheson. Energy harvesting for human wearable and implantable bio-sensors. In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pages 3432–3436, 2010. doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5627952.
- [17] H. Park, D. Lee, G. Park, S. Park, S. Khan, J. Kim, and W. Kim. Energy harvesting using thermoelectricity for IoT (internet of things) and e-skin sensors. *Journal of Physics: Energy*, 1(4):042001, aug 2019. doi.org/10.1088/2515-7655/ab2f1e.
- [18] J. Penders, B. Gyselinckx, R. Vullers, M. De Nil, V. S. R. Nimmala, J. van de Molengraft, F. Yazicioglu, T. Torfs, V. Leonov, P. Merken, and C. Van Hoof. Human++: From technology to emerging health monitoring concepts. In *2008 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors*, pages 94–98, 2008. doi.org/10.1109/ISSMDBS.2008.4575026.
- [19] prof. Ing. Miroslav Husák CSc. Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým principem. *DPS Elektronika od A do Z*, 2:4–11, 2014. ISSN 1805-5044.
- [20] prof. Ing. Miroslav Husák CSc. Napájecí management termoelektrických mikrogenerátorů. *DPS Elektronika od A do Z*, 5:4–11, 2014. ISSN 1805-5044.
- [21] prof. Ing. Miroslav Husák CSc. Napájecí management termoelektrických mikrogenerátorů II. *DPS Elektronika od A do Z*, 6:4–9, 2014. ISSN 1805-5044.
- [22] prof. Ing. Miroslav Husák CSc. Rf energie pro mikrogenerátory. *DPS Elektronika od A do Z*, 3:14–19, 2014. ISSN 1805-5044.
- [23] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:590–601, 2017. ISSN 1364-0321.
- [24] G. J. Snyder. Small thermoelectric generators. *The Electrochemical Society Interface*, 17(3):54–56, sep 2008. doi.org/10.1149/2.f06083if.
- [25] A. Van Herwaarden and P. Sarro. Thermal sensors based on the seebeck effect. *Sensors and Actuators*, 10(3):321–346, 1986. doi.org/10.1016/0250-6874(86)80053-1. ISSN 0250-6874.

- [26] Z. Wang, V. Leonov, P. Fiorini, and C. Van Hoof. Realization of a wearable miniaturized thermoelectric generator for human body applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 156(1):95–102, 2009. EUROSENSORS XXII, 2008. doi.org/10.1016/j.sna.2009.02.028. ISSN 0924-4247.
- [27] F. G. William. *Přehled lékařské fyziologie*, volume 20. Galén, 2005. ISBN 80-7262-3111-7.
- [28] G. Wu and X. Yu. System design on thermoelectric energy harvesting from body heat. In *2013 39th Annual Northeast Bioengineering Conference*, pages 157–158, 2013. doi.org/10.1109/NEBEC.2013.142.

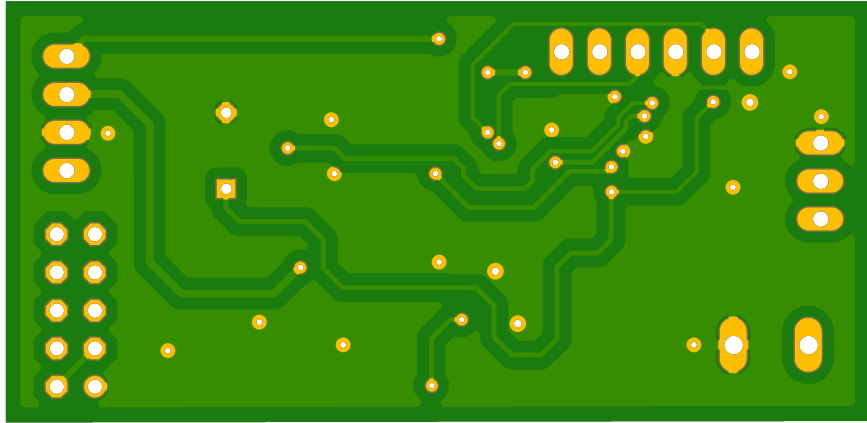
Přílohy



Obrázek 61: Schéma zapojení



Obrázek 62: Deska plošného spoje z vrchní strany



Obrázek 63: Deska plošného spoje ze spodní strany