

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Termoelektrický generátor

Thermoelectric Generator

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika.

Studijní obor: Aplikovaná elektronika.

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák CSc.

**David Kazák
Praha 2018**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kazák** Jméno: **David** Osobní číslo: **434765**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Termoelektrický generátor

Název bakalářské práce anglicky:

Thermoelectric Generator

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu poznatků řešení termoelektrických generátorů elektrické energie s výstupními výkony řádově jednotky až desítky uW.
2. Navrhněte a realizujte jednoduchý model termoelektrického generátoru, k realizaci struktury ve formě makromodelu zvolte vhodné dostupné materiály a mechanismus tepelného buzení (ohřevu), např. využitím ohřevu povrchem lidského těla.
3. Změřte a zhodnoťte dosažené elektrické parametry (výstupní napětí, výstupní proud, výstupní výkon v závislosti na zatěžovacím odporu a teplotní rozdíly, stanovení optimálního zatěžovacího odporu pro největší výstupní výkon a proud, stanovení optimálního teplotního rozdílu apod.), navrhněte možná vylepšení účinnosti systému
4. Navrhněte koncepci dalšího možného pokračování řešení práce.

Seznam doporučené literatury:

1. Neumann, P., Uhlíř, J.: Elektronické obvody a funkční bloky I, II, ČVUT.
2. Husák, M., Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým principem, DPS, 3-4/2014, str. 2, ISSN 1805-5044
3. Husák, M., Napájecí management termoelektrických mikrogenerátorů, DPS, 9-10/2014, str. 4, ISSN 1805-5044
4. Husák, M., Napájecí management termoelektrických mikrogenerátorů II, DPS, 11-12/2014, str. 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: **14.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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 předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 21. 5. 2018

.....
Podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu, panu prof. Ing. Miroslavu Husákovi CSc., za čas a rady, které mi při vypracování práce věnoval. Rodině, přátelům a všem kteří mě při tvorbě této práce podporovali.

Abstrakt

Tato práce se zabývá generováním elektrické energie pomocí termoelektrických generátorů založených na Seebeckově jevu. Cílem bylo vytvořit model termoelektrického generátoru, změřit a zanalyzovat jeho vlastnosti a navrhnout optimalizaci řešení.

Abstract

This work is focused on generating electrical energy with thermoelectric generator based on Seebeck effect. The goal was creating model of thermoelectric generator and measurement and analyses of its properties and suggest optimisation of solution.

Klíčová slova

Termoelektrický generátor, získávání energie, Seebeckův jev, termoelektrický článek, mikrogenerátor.

Key words

Thermoelectric generator, energy harvesting, Seebeck effect, thermocouple, microgenerator.

Obsah

Seznam tabulek	8
Seznam obrázků	9
Seznam použitých zkratk a symbolů	10
1 Úvod	12
2 Termoelektrická baterie jako generátor.....	13
2.1 Seebeckův jev	13
2.2 Termoelektrický generátor	13
2.2.1 Účinnost a výkon.....	14
2.3 Člověk jako zdroj tepla.....	17
3 Návrh a realizace modelu termoelektrického generátoru.....	19
3.1 Výběr termoelektrického článku	20
3.2 Návrh spínaného stabilizátoru	22
3.2.1 Výběr spínacího prvku	22
3.2.2 Návrh schématu zapojení měřicího přípravku	23
3.2.3 Výběr konkrétních diskrétních součástí	25
3.3 Návrh ohřevu při měření.....	30
4 Dosažené výsledky.....	31
4.1 Měření vnitřního odporu termoelektrického generátoru TGP-651.....	31

4.2	Měření závislosti výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot	32
4.3	Měření závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu	34
4.4	Měření minimálního vstupního napětí integrovaného obvodu BQ25570	36
4.5	Měření závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu.....	37
5	Návrh dalšího postupu.....	39
6	Závěr.....	41
7	Literatura	42
8	Přílohy	43

Seznam tabulek

Tabulka 1:	Parametry termoelektrického generátoru Micropelt MPG-D655 [7].....	20
Tabulka 2:	Parametry termoelektrického generátoru Micropelt TGP-651 [8].....	21
Tabulka 3:	Naměřené hodnoty závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.....	43
Tabulka 4:	Naměřené hodnoty závislosti výstupního napětí a proudu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$	43
Tabulka 5:	Naměřené hodnoty závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu.....	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: a) termoelektrický článek, b) termoelektrická baterie složená z článků [3].	14
Obrázek 2: Závislost teploty kůže na teplotě okolního vzduchu [5].	17
Obrázek 3: Závislost tepelného odporu lidského těla a tepelného toku na teplotě okolního vzduchu [5].	18
Obrázek 4: Generovaný výkon termoelektrického generátoru v závislosti na poloze. Bez chladiče na studené straně (kolečka) a s chladičem (trojúhelníky) [6].	18
Obrázek 5: Zvýšení generovaného napětí a výkonu po připojení chladiče na chladnou stranu generátoru vypočtená data z obrázku 4 [6].	19
Obrázek 6: Termoelektrický generátor Micropelt TGP-651 [8].	20
Obrázek 7: Měřené termoelektrické generátory TGP-651.	21
Obrázek 8: BQ25570 závislost účinnosti na vstupním napětí [9].	22
Obrázek 9: LTC3109 závislost účinnosti na vstupním napětí [10].	23
Obrázek 10: Blokové schéma integrovaného obvodu BQ25570 [9].	23
Obrázek 11: Schéma zapojení spínaného stabilizátoru.	24
Obrázek 12: Výsledný navržený plošný spoj.	25
Obrázek 13: Měřicí pracoviště.	30
Obrázek 14: Schéma zapojení pro měření vnitřního odporu termoelektrického generátoru TGP-651.	31
Obrázek 15: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.	32
Obrázek 16: Měřená závislost výstupního výkonu termočlánku TGP-651 na rozdílu teplot.	33

Obrázek 17: Měřená závislost výstupního napětí termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.	33
Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu.....	34
Obrázek 19: Měřená závislost výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Obrázek 20: Měřená závislost výstupního napětí a proudu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Obrázek 21: Hotová deska plošného spoje, pohled ze shora.	36
Obrázek 22: Hotová deska plošného spoje, pohled na spodní stranu.	36
Obrázek 23: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu.....	37
Obrázek 24: Měřená závislost výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu.....	38

Seznam použitých zkratk a symbolů

U	(V)	Napětí
U_{OUT}	(V)	Výstupní napětí
U_{OUT_MIN}	(V)	Minimální výstupní napětí
U_{OUT_MAX}	(V)	Maximální výstupní napětí
U_{BIAS}	(V)	Vnitřní referenční napětí integrovaného obvodu BQ25570
U_{BAT_OK}	(V)	Úroveň napětí na C_{BAT} , při kterém se vypíná výstup BQ25570
$U_{BAT_OK_HYST}$	(V)	Úroveň napětí na C_{BAT} , při kterém se zapíná výstup BQ25570
U_{BAT_OV}	(V)	Maximální napětí na kondenzátoru C_{BAT}
$U_{IN_MIN_CS}$	(V)	Minimální vstupní napětí pro „studený“ start BQ25570
α	($\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)	Seebeckův koeficient
α_1	($\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)	Seebeckův koeficient materiálu 1
α_2	($\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)	Seebeckův koeficient materiálu 2
T	(K) nebo ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota
ΔT	(K) nebo ($^{\circ}\text{C}$)	Rozdíl teplot $\Delta T = T_h - T_c$
T_h	(K) nebo ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota teplé strany termoelektrického generátoru
T_c	(K) nebo ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota studené strany termoelektrického generátoru
η	(-)	Účinnost
Q	(W)	Tepelný tok
Q_s	($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Tepelný tok na jednotku plochy

S	(m^2)	Plocha
d	(m)	Vzdálenost teplé strany termoelektrického generátoru od studené
ρ	$(\Omega \cdot \text{m})$	Rezistivita
g_{air}	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu
g_{te}	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu termočlánku
Z	(K^{-1})	Materiálový koeficient termoelektrického generátoru
R_h	$(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	Tepelný odpor mezi teplou stranou článku a okolím
R_c	$(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	Tepelný odpor mezi studené stranou článku a okolím
R_{TE}	$(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	Tepelný odpor termoelektrického generátoru
n	$(-)$	Počet termoelektrických článků v generátoru
δ	$(-)$	Poměrné otočení trimru, nabývá hodnot mezi nulou a jedničkou

Seznam zkratek

MPPT	Maximum Power Point Tracking
ESR	Ekvivalentní sériový odpor

1 Úvod

Termoelektrické baterie se dnes běžně používají k chlazení, od přenosných chladících boxů až po chlazení laserů a přesných měřicích přístrojů, kde dokážou ochladit chlazený předmět na přesně určenou teplotu i pod teplotu okolního vzduchu, což běžný kovový chladič s ventilátorem nedokáže, ale za cenu velké energetické náročnosti. Lze je také využít k ohřevu a poslední možné využití termoelektrické baterie je generování elektrické energie z rozdílů teplot. Toto využití se obzvláště v poslední době stává perspektivním, protože je můžeme využít k napájení různých mikrosenzorů nebo k prodloužení výdrže akumulátorů nositelné elektroniky jako jsou třeba chytré hodinky – smartwatch, jejichž hlavní nevýhodou je právě nízká výdrž na jedno nabití akumulátoru.

Generování elektrické energie se budeme věnovat v první části této práce, kde bude vysvětlena principiální činnost termoelektrického generátoru.

Druhá část se bude zabývat návrhem modelu termoelektrického generátoru schopného generovat z malých rozdílů teplot výkon řádově v desítkách mikro wattů. Ve třetí části se budeme věnovat měření námi navrženého generátoru.

2 Termoelektrická baterie jako generátor

2.1 Seebeckův jev

Princip termoelektrických generátorů popisuje Seebeckův jev, který objevil v 19. století německý fyzik Thomas Johann Seebeck. Někdy se tomuto jevu také říká Peltierův-Seebeckův jev, protože Peltierův a Seebeckův jev jsou k sobě jevy opačné. Seebeckův jev říká, že na spojení dvou vodičů, mezi kterými je teplotní gradient vznikne napětí. Teplo proudí od části s vyšší teplotou k části s nižší teplotou a volné nosiče náboje, elektrony a kladné díry, se pohybují ke chladné části, a tím vzniká napětí [1].

„Generované napětí a získaná energie závisí na rozdílu teplot a Seebeckově koeficientu použitých termoelektrických materiálů.“ [2].

$$U = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

kde U (V) je napětí vzniklé v termoelektrickém článku, α_1 a α_2 ($\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$) jsou Seebeckovy koeficienty, které definují termoelektrické vlastnosti materiálů, ze kterých se termoelektrický článek skládá, ΔT (K) je rozdíl teplot mezi částí s vyšší a nižší teplotou.

2.2 Termoelektrický generátor

Samotný termoelektrický článek (obrázek 1 a)) generuje podle vztahu (2.1) jen velmi malé napětí, proto termoelektrické články spojujeme do termoelektrických baterií. Elektricky jsou články spojeny sériově a pro tepelný tok jsou spojeny paralelně, aby všechny elementy pracovaly se stejným rozdílem teplot [1, 3].

Výsledné výstupní napětí je tedy:

$$U = n \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

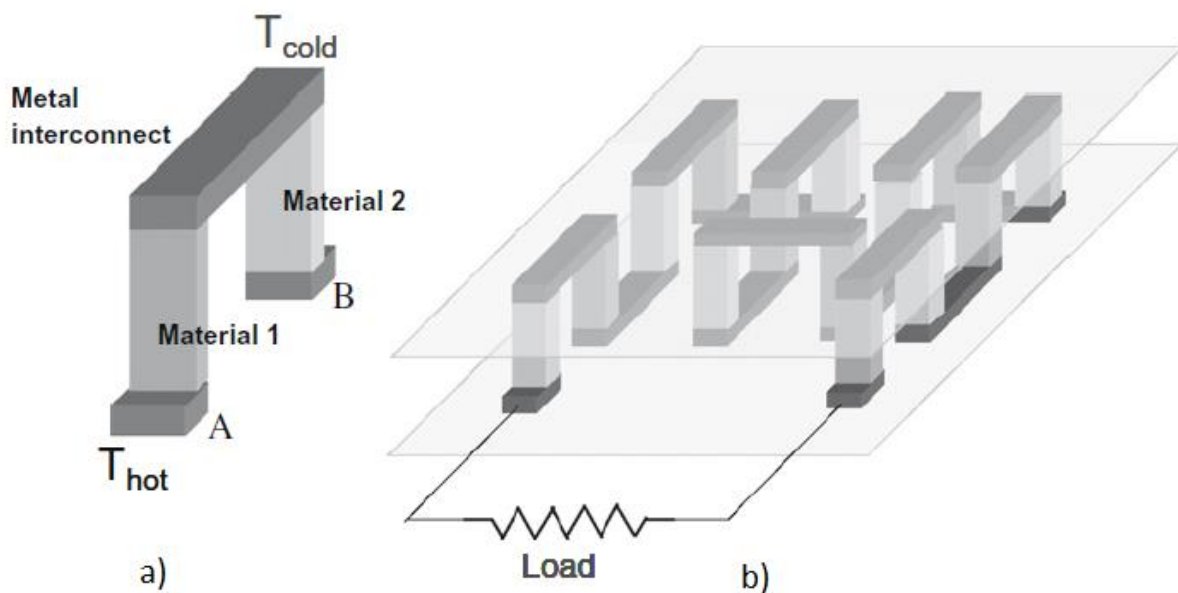
kde n je počet článků v baterii.

Ze vztahů (2.1) a (2.2) je patrné, že je potřeba najít na výrobu termoelektrických článků a z nich termoelektrického generátoru, takové materiály, které mají vysoký Seebeckův koeficient, ale zároveň mají Seebeckův koeficient s opačným znaménkem, abychom výsledný Seebeckův koeficient termoelektrického článku dostali co největší, a tím i co nejvyšší výstupní napětí [1].

Toto obvykle splňují polovodiče, mají vysoký Seebeckův koeficient. Polovodič typu P má také proti polovodiči typu N opačné znaménko Seebeckova koeficientu [3].

„Dobrý termoelektrický materiál má Seebeckův koeficient mezi $100 \mu V \cdot K^{-1}$ a $300 \mu V \cdot K^{-1}$.“ [1].

V současné době se nejčastěji na výrobu termoelektrických generátorů používá tellurid bismutitý (Bi_2Te_3), který dosahuje parametru $ZT = 0,9$, nebo také polykrystalický SiGe, který dosahuje $ZT = 0,12$ [2, 3]. Více o parametru ZT v následující kapitole.



Obrázek 1: a) termoelektrický článek, b) termoelektrická baterie složená z článků [3].

2.2.1 Účinnost a výkon

Termoelektrický generátor, stejně jako jiný tepelný stroj, nemůže pracovat s vyšší účinností, než má Carnotův cyklus. Tato účinnost je ještě dále snížena termoelektrickými vlastnostmi materiálu článku. Účinnost vypočteme [1, 2]:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2.3)$$

kde T_h (K) je teplota teplé části generátoru, T_c (K) je teplota studené části, ZT je úměrný termoelektrickým vlastnostem generátoru.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho g_{te}} \quad (2.4)$$

kde g_{te} je tepelná vodivost, ρ rezistivita materiálu článku α je Seebeckův koeficient [1, 2, 3].

Obvykle se udává bezrozměrná veličina ZT [2, 3].

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho g_{te}} \quad (2.5)$$

Výstupní výkon termoelektrického generátoru můžeme vypočítat z tepelného toku a jeho účinnosti:

$$P = \eta \cdot Q \quad (2.6)$$

kde P (W) je výstupní výkon, η (-) je účinnost článku a Q (W) tepelný tok.

Tepelný tok Q můžeme vypočítat podle [4]:

$$Q = \frac{T_h - T_c}{R_h + R_{TE} + R_c} \quad (2.7)$$

V rovnici (2.7) je R_h je tepelný odpor mezi teplou stranou termoelektrického generátoru a okolím, R_{TE} je tepelný odpor termoelektrického generátoru a R_c je tepelný odpor mezi chladnou stranou generátoru a okolím. Do jmenovatele se zahrnují všechny zúčastněné tepelné odpory, jako je například tepelný odpor připojeného chladiče.

Výkon termoelektrického můžeme také vypočítat z termoelektrických vlastností materiálu z kterého je vyroben [2, 3]:

$$P = \frac{1}{64} \cdot \frac{\alpha^2}{\rho g_{te}} \cdot \frac{Q_s^2 \cdot S \cdot d}{g_{air}} \quad (2.8)$$

kde Q_s je tepelný tok jednotkou plochy, S je plocha článku, d je vzdálenost mezi teplou a studenou stranou článku a g_{air} je součinitel tepelné vodivosti vzduchu.

Kromě termoelektrických vlastností vyjádřených prostředním zlomkem ve vztahu (2.8) neboli parametrem Z viz vztah (2.4), závisí výstupní výkon také na fyzických rozměrech termoelektrických článku v generátoru. Ze vztahu (2.8) je vidět že výkon je přímo úměrný ploše S a vzdáleností d teplé strany od chladné strany baterie. Výstupní napětí je také přímo úměrné vzdálenosti d ale je nepřímo úměrné druhé mocnině plochy S . Navíc poměr d ku S je limitován technologií výroby. Je tedy obtížné optimalizovat generátor na vysoký výstupní výkon a zároveň na velké výstupní napětí. V tomto směru je nutné udělat rozumný kompromis, protože potřebujeme z generátoru dostat co nejvyšší výstupní výkon, ale zároveň potřebujeme výstupní napětí alespoň kolem jednoho voltu abychom ho mohli efektivně zpracovat ve spínaném stabilizátoru, protože jak je vidět například na obrázku 8 pro nízká vstupní napětí účinnost stabilizátoru klesá. Optimální je dosáhnout tak vysokého výstupního napětí z termoelektrického generátoru, abychom nemuseli na vstupu stabilizátoru používat step-up měnič a vyhnuli se tak jeho ztrátám, ale toho obzvláště v aplikacích s malým rozdílem teplot není možné dosáhnout [2, 3].

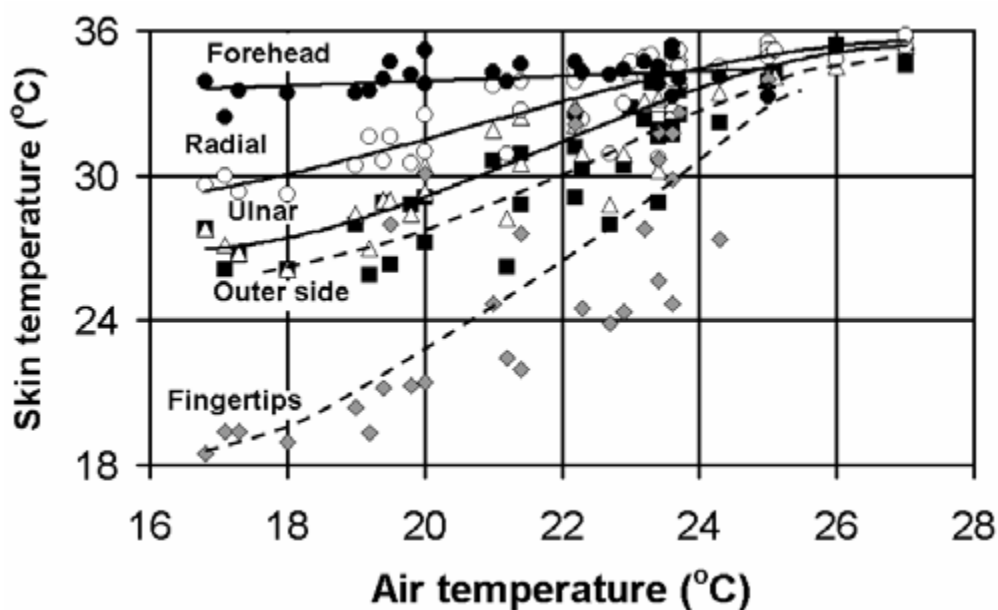
Zlepšovat výkon termoelektrického generátoru lze několika způsoby: využít materiál s lepšími termoelektrickými vlastnostmi, zvýšení koeficientu ZT , ale tady jsme zatím limitováni dostupnými materiály, zvýšením rozdílu teplot, efektivnější chlazení chladné strany baterie, například přidáním chladiče, nebo zvýšení teploty zdroje tepla na teplé straně generátoru, což nám ne vždy dovolí aplikace, kde budeme chtít termoelektrický generátor používat. Dále

je nutné navrhnout spínaný stabilizátor s co nejvyšší možnou účinností a vybrat úložný prvek s malými ztrátami abychom to malé množství energie, co získáme termoelektrickým generátorem z malého rozdílu teplot zbytečně neztratili v neefektivním spínaném zdroji.

2.3 Člověk jako zdroj tepla

Člověk ze svého těla vyzařuje přibližně $20 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ tepla. Současnými technologiemi jsme z této energie schopni maximálně získat kolem $0,03 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ výkonu [3]. Tento výkon je závislý na dalších vlivech, o kterých se budeme zmiňovat níže.

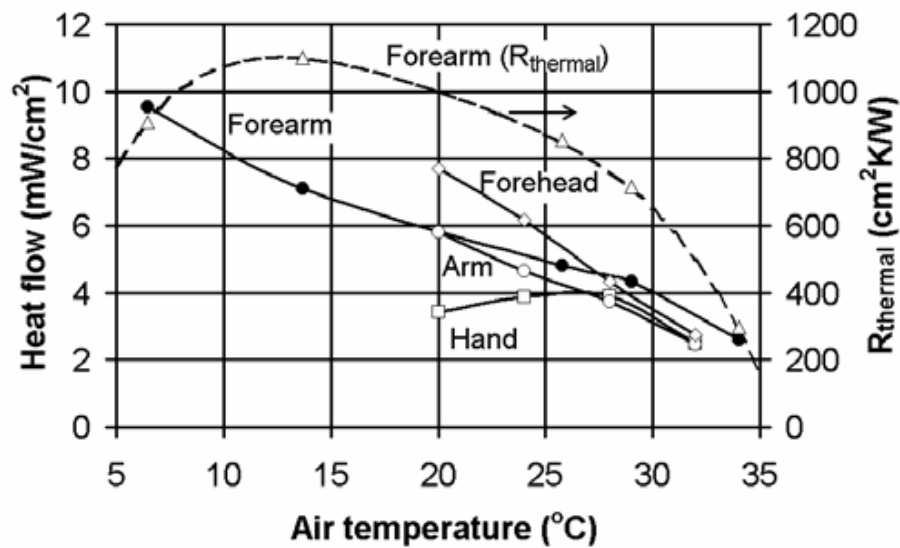
Základní parametr, který ovlivňuje získaný výkon je rozdíl mezi teplotou okolního vzduchu a teplotou lidské kůže. Teplota kůže není na každé části těla stejná. V oblasti hlavy a trupu je obvyklá teplota 33 až 36 °C, ale teplota končetin může klesnout na 25 až 30 °C i při relativně komfortních pokojových teplotách. Pokud je teplota vzduchu vyšší než 25 °C blíží se obvykle teplota kůže končetin teplotě kůže na hlavě. Při nižších teplotách vzduchu teplota kůže na končetinách klesá, jak je vidět na obrázku 2 [5].



Obrázek 2: Závislost teploty kůže na teplotě okolního vzduchu [5].

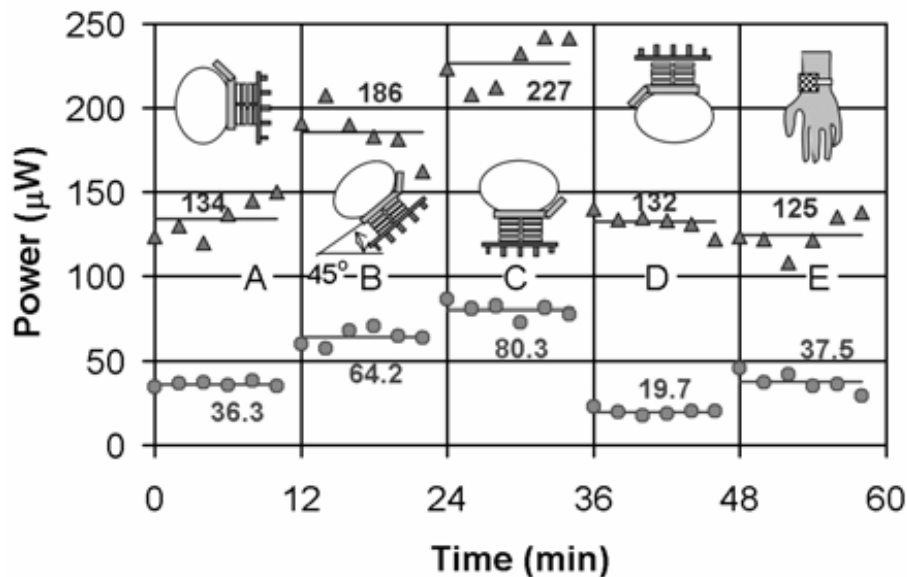
Při nízkých teplotách okolního vzduchu je v končetinách tělesným termoregulačním systémem omezováno prodění tepla zúžením cév a omezením průtoku krve. Zatímco v hlavě a trupu není tento systém takto řízen a tepelný tok z hlavy je proto vyšší. Obzvláště pokud je chladná strana termoelektrické generátoru osazena chladičem může dojít k nebezpečnému podchlazení mozku.

Tepelné toky z některých částí těla můžeme vidět na obrázku 3. Teplota krve, která ovlivňuje teplotu kůže, je silně závislá na fyzické aktivitě člověka [5].



Obrázek 3: Závislost tepelného odporu lidského těla a tepelného toku na teplotě okolního vzduchu [5].

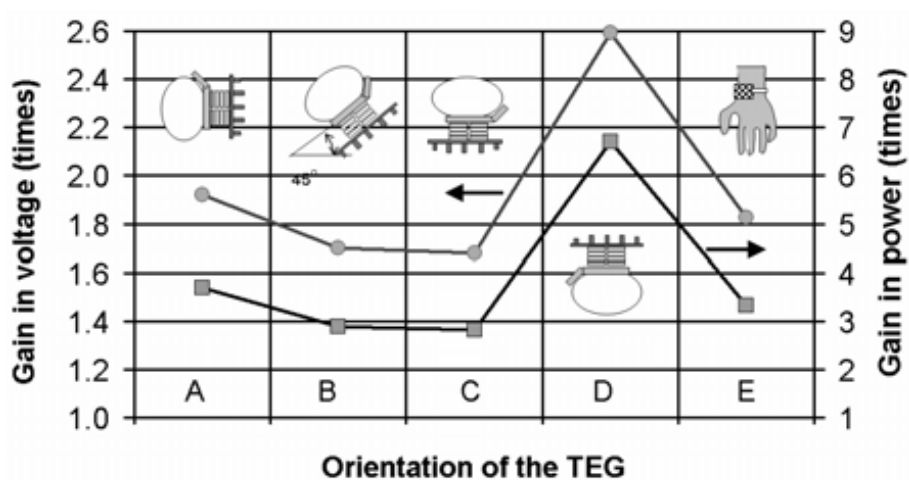
Pro modelování termoelektrických generátorů na lidech je zavedený lokální tepelný odpor těla, který ukazuje tepelný odpor mezi vnitřními orgány v těle a určeným místem na kůži. Tepelný odpor končetin může být za chladného počasí i vyšší než tepelný odpor vzduchu [5].



Obrázek 4: Generovaný výkon termoelektrického generátoru v závislosti na poloze. Bez chladiče na studené straně (kolečka) a s chladičem (trojúhelníky) [6].

Přidáním chladiče na chladnou stranu termoelektrického generátoru nejen že se sníží tepelný odpor mezi termoelektrickým generátorem a okolním vzduchem ale zároveň se sníží i lokální tepelný odpor těla a zvýší se i jeho tepelný tok a tím vzroste generovaný elektrický výkon [5].

Pokud budeme chtít napájet nějakou nositelnou elektroniku tepelnou energií lidského těla, budeme termoelektrický generátor pravděpodobně umisťovat na ruku v oblasti zápěstí, protože na tomto místě je velká část lidí zvyklá nosit hodinky, a proto pro ně bude nosit něco na tomto místě přirozené. Na obrázcích 4 a 5 můžeme vidět, jak se mění generovaný výkon a napětí při stálé teplotě v závislosti na poloze termoelektrického generátoru na zápěstí [6].



Obrázek 5: Zvýšení generovaného napětí a výkonu po připojení chladiče na chladnou stranu generátoru vypočtená data z obrázku 4 [6].

Polohy A až D byly měřeny při vodorovně nataženém předloktí, poloha E je s rukou dolů podobně jako má člověk ruku při chůzi, ale při chůzi je vlivem prouděním vzduchu generovaný výkon nejméně dvakrát větší. Polohy A až C se dají přirovnat k běžným aktivitám ve vnitřních prostorách. D je poloha přirovnatelná k chytání předmětů. Obrázek 5 znázorňuje zvýšení generovaného výkonu a napětí, které získáme připojením chladiče [6].

3 Návrh a realizace modelu termoelektrického generátoru

V této kapitole se podíváme na výběr termoelektrického generátoru a spínacího prvku a dalších součástí pro náš model termoelektrického generátoru. Proč byly vybrány z hlediska parametrů, ceny a dostupnosti.

3.1 Výběr termoelektrického článku

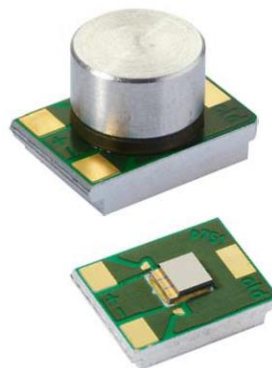
Termoelektrické baterie speciálně navržené pro generování elektrické energie vyrábí celá řada firem. Například jsou jimi: Laird Technologies, Tellurex Corporation, Marlow Industries, Micropelt, Hi-Z Technology, Kryotherm a další. Každý z výrobců nabízí celou řadu termoelektrických generátorů, které se od sebe liší, Seebeckovým koeficientem materiálu, z kterého jsou vyrobeny a parametrem ZT . Rozměry, a tím i plochou kterou mohou odebírat teplo na teplé straně generátoru, a jak je vidět ze vztahu (2.8) větší plocha při stejném tepelném toku na jednotku plochy a materiálu generátoru znamená vyšší výstupní výkon.

Bohužel výrobci vždy neudávají ve svých datasheetech všechny parametry generátorů a mezi výrobci nejsou udávané parametry stejné, což komplikuje porovnávání termoelektrických generátorů mezi sebou.

Z hlediska parametrů vycházel nejlépe termoelektrický generátor Micropelt MPG-D655 s jeho Seebeckovým koeficientem $\alpha = 80 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ a vysokým stupněm integrace 288 termoelektrických článků. Vysoký stupeň integrace je zároveň i jeho nevýhoda, protože celý generátor má rozměry $3300 \times 2425 \times 1090 \text{ }\mu\text{m}$. S takto malým generátorem by se nám přiměřeně špatně pracovalo [7].

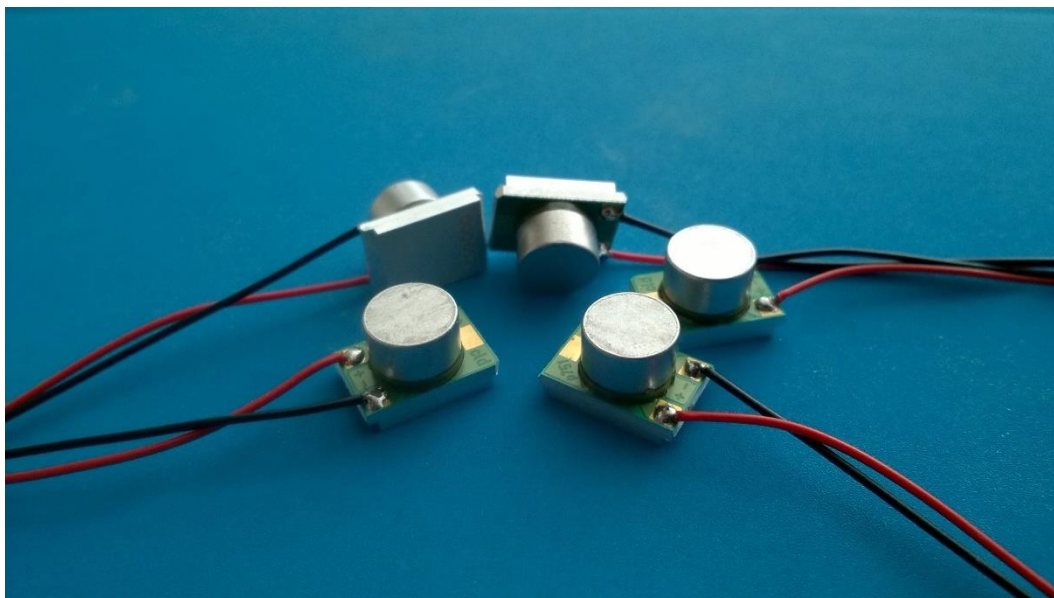
Tabulka 1: Parametry termoelektrického generátoru Micropelt MPG-D655 [7].

Micropelt MPG-D655	
Délka	3300 μm
Šířka	2425 μm
Výška	1090 μm
Seebeckův koeficient	80 $\text{mV}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektrický odpor	210 Ω
Tepelný odpor	22 $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Pracovní teplota	0 $^{\circ}\text{C}$ – 70 $^{\circ}\text{C}$



Obrázek 6: Termoelektrický generátor Micropelt TGP-651 [8].

Naštěstí si tuto nevýhodu uvědomuje i výrobce, a proto nabízí i termoelektrický generátor Micropelt TGP-651. Ten obsahuje termoelektrický generátor z řady Micropelt MPG-D65X osazený na malém kusu desky plošného spoje a z každé strany článku je ještě osazen kus hliníku, aby se lépe přenášelo teplo mezi okolím a termoelektrickým generátorem. Generátor můžete vidět na obrázcích 6 a 7 [8].



Obrázek 7: Měřené termoelektrické generátory TGP-651.

Parametry, které můžete vidět v tabulce 2, termoelektrický generátor TGP-651 nějak výrazně nezaostává za MPG-D655 (parametry v tabulce 1). Proto jsme pro náš model termoelektrického generátoru použili TGP-651, s kterým se nám bude přiměřeně snáze manipulovat.

Tabulka 2: Parametry termoelektrického generátoru Micropelt TGP-651 [8].

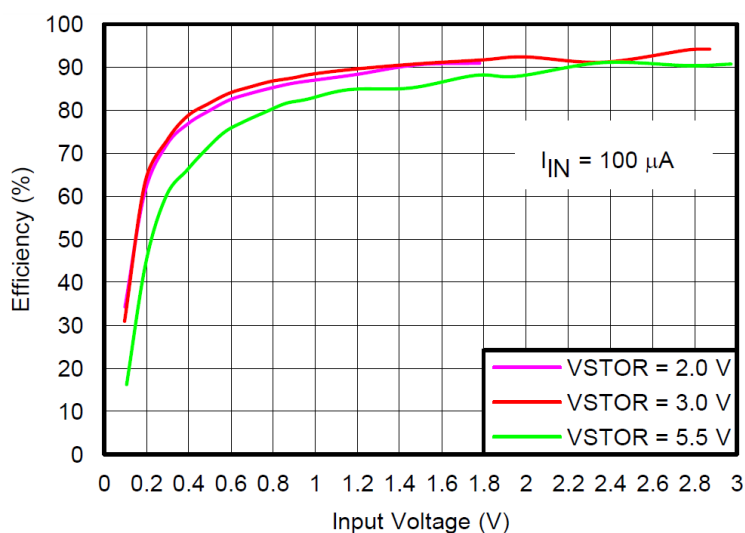
Micropelt TGP-651	
Délka	15 mm
Šířka	10 mm
Výška	9,5 mm
Seebeckův koeficient	60 mV·K ⁻¹
Elektrický odpor	210 Ω
Tepelný odpor	28 K·W ⁻¹
Pracovní teplota	0 °C – 85 °C

3.2 Návrh spínaného stabilizátoru

3.2.1 Výběr spínacího prvku

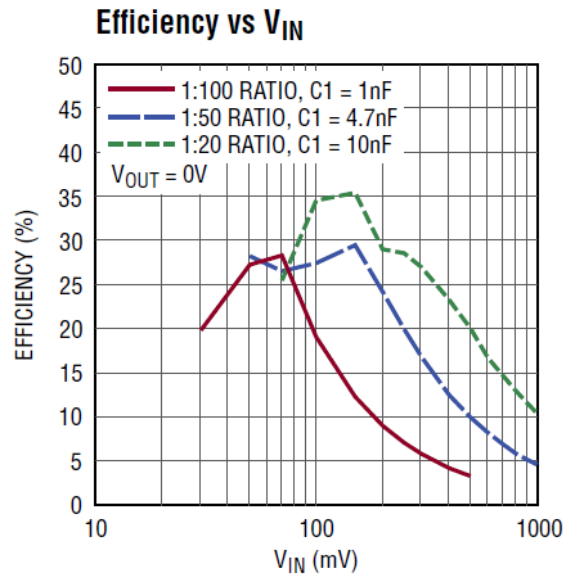
Většina výrobců zabývajících se výrobou integrovaných obvodů pro spínané zdroje, Linear Technology, Maxim Integrated, Texas Instruments, má své vlastní řešení pro energy harvesting. Porovnávali jsme je hlavně z hlediska účinnosti a nejmenšího vstupního napětí, při kterém obvod ještě schopný pracovat. Tento parametr ovlivňuje, jak s malými rozdíly teplot budeme schopni pracovat.

Porovnáním parametrů jednotlivých řešení vyvstali dvě potencionálně nejlepší. První Texas Instruments BQ25570, jedná se o měnič s externím induktorem s účinností až 93 % schopný pracovat od 100 mV (studený start s vybitými kondenzátory od 330 mV) což u vybraného generátoru odpovídá přibližně rozdílu teplot $\Delta T = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (pro studený start $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$) [9]. Druhou možností je Linear Technology LTC3109, s maximální účinností okolo 50 % minimální vstupní napětí 30 mV, to odpovídá rozdílu teplot $\Delta T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$ [10]. Oba dva jsou navrženy tak aby z termoelektrického generátoru dokázaly dostat maximum energie, mají velice malý klidový proud (7 μA pro LTC3109 a 488 nA pro BQ25570). Hlavní rozdíl je v účinnosti těchto řešení [9, 10].

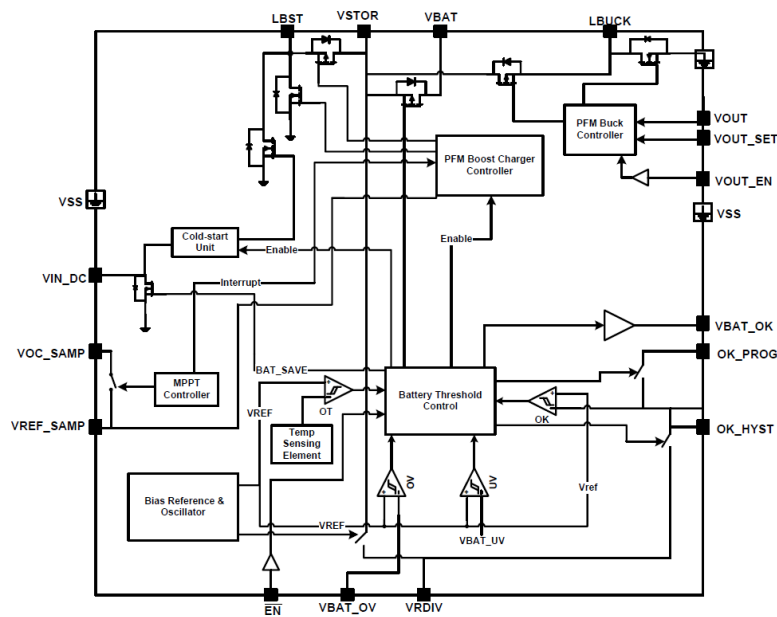


Obrázek 8: BQ25570 závislost účinnosti na vstupním napětí [9].

Pro náš měřicí přípravek jsme zvolili řešení od společnosti Texas Instruments integrovaný obvod BQ25570, a to z důvodu vyšší účinnosti, nižší ceny a snadnější dostupnosti na českém trhu.



Obrázek 9: LTC3109 závislost účinnosti na vstupním napětí [10].

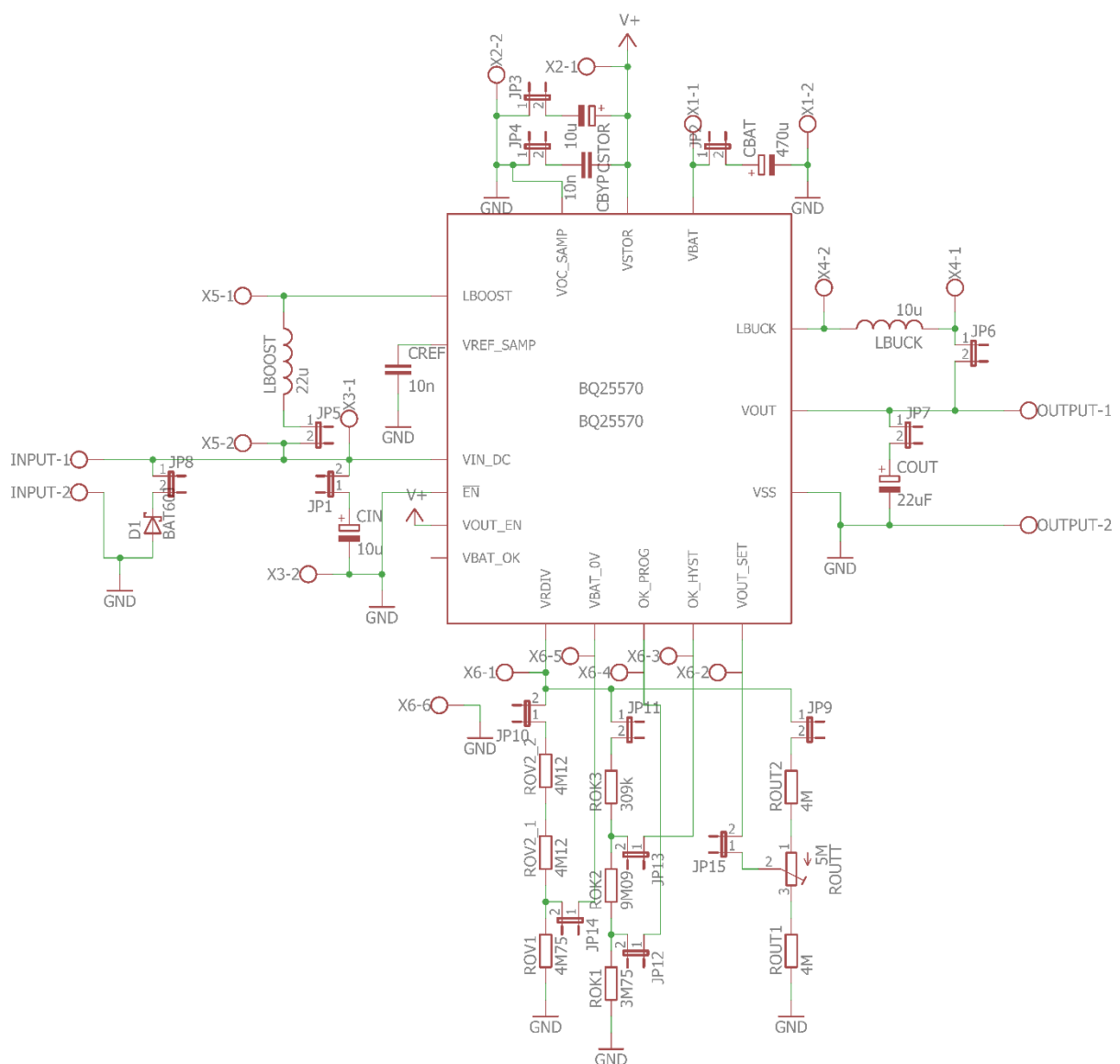


Obrázek 10: Blokové schéma integrovaného obvodu BQ25570 [9].

3.2.2 Návrh schématu zapojení měřicího přípravku

Při návrhu zapojení měřicího přípravku jsme vycházeli z předpokladu, že po realizaci návrhu zapojení na desku plošného spoje může být potřeba upravovat parametry obvodu, tedy měnit součástky tak, aby se v případě nutnosti dala opravit nesprávná funkčnost obvodu nebo zlepšit vlastnosti zapojení.

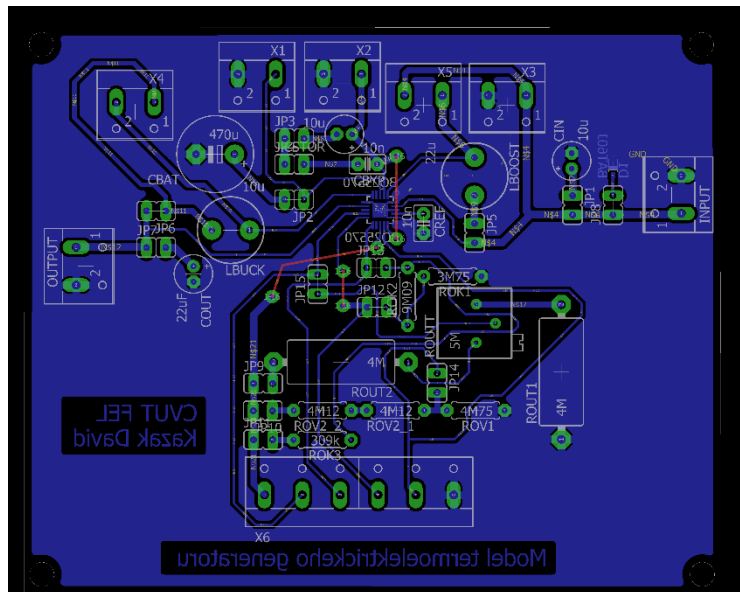
Abychom se v těchto případech vyvarovali zbytečné tvorbě nových prototypů, navrhli jsme obvod jako částečně modulární. Vyměnitelnost součástek je řešena kombinací konektorů a zkratovacích propojek. Každá součástka v obvodu, kromě integrovaného obvodu BQ25570 a kondenzátoru C_{REF} , který jak je zmíněno níže má pevně definovanou kapacitu nutnou pro správnou funkci BQ25570, má k sobě paralelně připojený konektor. Díky tomu je možné například přes kontaktní nepájivé pole připojit náhradní součástku. Sériově je ke každé součástce připojena zkratovací propojka, jejím rozpojením můžeme v případě potřeby odpojit součástku, která je připájená na desce plošného spoje a využívat tu, která je připojená přes konektory. Zapojení konektorů a propojek je vidět ve schématu zapojení viz obrázek 11.



Obrázek 11: Schéma zapojení spínaného stabilizátoru.

Integrovaný obvod BQ25570 by mohl být vkládán do patice, ale z důvodu vysoké ceny patice pro tento typ pouzdra integrovaného obvodu je cenově výhodnější v případě nefunkčnosti integrovaného obvodu zakoupit nový a desku plošného spoje vyrobit znovu.

Rozmístění součástek na plošném spoji bylo navrženo s ohledem na snadné měření. Na minimalizaci plochy plošného spoje nebyl brán velký ohled, protože se jedná jen o přípravku k měření.



Obrázek 12: Výsledný navržený plošný spoj.

3.2.3 Výběr konkrétních diskretních součástek

Výběr kondenzátoru C_{IN}

Kondenzátor se nachází na vstupu obvodu mezi piny V_{IN_DC} a V_{SS} v obvodu slouží k dočasnému uložení energie z termoelektrického článku před dalším využití ve vstupním step-up měniči. Výrobce integrovaného obvodu BQ25570 doporučuje kondenzátor, který má nízký ekvivalentní sériový odpor neboli low ESR a nízký ztrátový proud neboli low leakage s minimální kapacitou $4,7 \mu F$ [9]. My jsme použili kondenzátor Nichicon UPS1C100MDD, který má kapacitu $10 \mu F$, který nám dokáže v okamžiku sepnutí step-up měniče dodat dostatečný proud pro funkci vstupního step-up měniče.

Výběr kondenzátoru C_{REF}

Kondenzátor C_{REF} je připojen mezi piny V_{REF_SAMP} a V_{SS} udržuje vzorek napětí na prázdnou termoelektrického generátoru pro obvod MPPT – Maximum Power Point Tracking integrovaný v BQ25570. Pro správnou funkci obvodu je nutné použít nízko ztrátový kondenzátor s kapacitou 10 nF proto jsme použili kondenzátor TDK FG18C0G2A103JRT06 [9].

Výběr kondenzátoru C_{OUT}

Kondenzátor C_{OUT} je připojen mezi piny V_{OUT} a V_{SS} na výstupu obvodu jako filtrační, na jeho kapacitě závisí zvlnění výstupního napětí a změna napětí při prudké změně odebíraného proudu [9]. My jsme zvolili kondenzátor Nichicon UPW0J220MDD s kapacitou 22 μ F.

Výběr kondenzátoru C_{STOR} a C_{BYP}

Kondenzátory jsou připojeny mezi pinem V_{STOR} a společnou zemí přípravku – GND. Kondenzátor C_{STOR} se nabíjí zvýšeným napětím ze step-up měniče je z něho následně nabíjen kondenzátor C_{BAT} a step-down měnič. C_{BYP} je zapojen paralelně k C_{STOR} kvůli vysokým frekvencím, kterými spínají měniče [9].

Jako C_{STOR} jsme zvolili Nichicon UPS1C100MDD a jako C_{BYP} jsme použili TDK FG18C0G2A103JRT06.

Výběr C_{BAT}

V době, kdy termoelektrický generátor dodává do obvodu menší množství energie, než odebíráme na výstupu, například zmenšením rozdílu teplot mezi teplou a studenou stranou generátoru, dodává se energie úložného prvku. Úložný prvek může být například akumulátor, superkondenzátor nebo kondenzátor [9]. My jsme pro jednoduchost a z cenových důvodů zvolili kondenzátor s kapacitou 470 μ F Nichicon UKL0J471MPD, který se vyznačuje nízkými ztrátami.

Výběr cívek L_{BOOST} a L_{BUCK}

Pro optimální činnost obvodu BQ25570 je potřeba použít cívky s nízkým stejnosměrným sériovým odporem. Pro L_{BOOST} je doporučena cívka s indukčností $22 \mu\text{H}$, my jsme proto použili cívku Sumida RCH875NP-220K, a pro L_{BUCK} je doporučena indukčnost $10 \mu\text{H}$, my jsme využili Sumida RCH895NP-100M [9].

R_{OUT1} , R_{OUT2} a R_{OUTT}

Rezistory R_{OUT1} , R_{OUT2} a trimer R_{OUTT} nastavují výstupní napětí U_{OUT} . Trimerem R_{OUTT} lze měnit výstupní napětí podle vztahu (3.1) [9],

$$U_{OUT} = U_{BIAS} \cdot \frac{R_{OUT1} + R_{OUT2} + R_{OUTT} \cdot (1 - \delta)}{R_{OUT1} + R_{OUTT} \cdot \delta} \quad (3.1)$$

kde U_{BIAS} je $1,21 \text{ V}$ a δ je poměrné otočení trimera a je mezi nulou a jedničkou.

Zároveň by celkový odpor neměl být větší jak $13 \text{ M}\Omega$ [9].

$$R_{OUT1} + R_{OUT2} + R_{OUTT} = 13 \text{ M}\Omega \quad (3.2)$$

My jsme chtěli výstupní napětí přibližně od 1 V do 4 V , proto jsme podle rovnic (3.1) a (3.2) zvolili $R_{OUT1} = R_{OUT2} = 4 \text{ M}\Omega$, rezistor Vishay CMF654M0000FKBF a $R_{OUTT} = 5 \text{ M}\Omega$, trimer Bourns 3386P-1-505LF. Maximální výstupní napětí je dáno vztahem (3.3) a nejmenší výstupní napětí je určeno vztahem (3.4).

$$\begin{aligned} U_{OUT_MAX} &= U_{BIAS} \cdot \frac{R_{OUT1} + R_{OUT2} + R_{OUTT}}{R_{OUT1}} \\ &= 1,21 \cdot \frac{4 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6} = 3,93 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$U_{OUT_MIN} = U_{BIAS} \cdot \frac{R_{OUT1} + R_{OUT2}}{R_{OUT1} + R_{OUTT}} = 1,21 \cdot \frac{4 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^6} = 1,08 \text{ V} \quad (3.4)$$

R_{OK1}, R_{OK2} a R_{OK3}

Tyto rezistory ovlivňují, při jakých hodnotách napětí na kondenzátoru C_{BAT} se bude připojovat a odpojovat zátěž, neboli při jakých hodnotách napětí na C_{BAT} se zapne a vypne výstupní step-down měnič.

Napětí, při kterém se odpojí zátěž určíme ze vztahu (3.5):

$$U_{BAT_OK} = U_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}}\right) \quad (3.5)$$

Napětí, při kterém se připojí zátěž určíme ze vztahu (3.6):

$$U_{BAT_OK_HYST} = U_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}}\right) \quad (3.6)$$

Zároveň celkový odpor:

$$R_{OK1} + R_{OK2} + R_{OK3} = 13 \text{ M}\Omega \quad (3.7)$$

Minimální napětí U_{BAT_OK}, při kterém ještě pracuje step-down měnič, musí být alespoň o 0,2 V větší než U_{OUT_MAX}. U_{BAT_OK_HYST} musí být o něco vyšší než U_{BAT_OK}, aby mezi vypnutím a zapnutím byla hystereze a nedocházelo tak k častému vypínání a zapínání výstupu zdroje [9]. Když vezmeme tyto předpoklady, rovnice (3.5), (3.6) a (3.7) a současnou dostupnost rezistorů na trhu dostaneme se k R_{OK1} = 3,74 MΩ (Yageo MFR-25F52-3M74), R_{OK2} = 9,09 MΩ (Yageo MFR-25FRF52-9M09) a R_{OK3} = 309 kΩ (KOA Speer MF1/4DC3093F).

To odpovídá $U_{BAT_OK} = 4,15 \text{ V}$ a $U_{BAT_OK_HYST} = 4,25 \text{ V}$.

Jako R_{OK2} by bylo lepší využít rezistor s odporem $9 \text{ M}\Omega$, bohužel v době návrhu byl nejbližší dostupný námi vybraný rezistor s odporem $9,09 \text{ M}\Omega$.

R_{OV1} a R_{OV2}

Rezistory R_{OV1} a R_{OV2} určují, podle vztahu (3.8), maximální napětí na C_{BAT} a C_{STOR} , po dosažení tohoto napětí se vypne vstupní step-up měnič, než napětí opět poklesne [9]. Jak je napsáno v kapitole „Výběr C_{BAT} “, jako úložný prvek používáme kondenzátor, takže jsme limitováni maximálním napětím kondenzátoru ($6,3 \text{ V}$) a integrovaného obvodu BQ25570 $5,5 \text{ V}$, proto budeme navrhovat U_{BAT_OV} na přibližně 5 V .

$$U_{BAT_OV} = \frac{3}{2} \cdot U_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}}\right) \quad (3.8)$$

Zároveň celkový odpor:

$$R_{OV1} + R_{OV2} = 13 \text{ M}\Omega \quad (3.9)$$

Z rovnic (3.8), (3.9) a s přihlédnutím k dostupnosti rezistorů se dostaneme k $R_{OV1} = 4,75 \text{ M}\Omega$ (KOA Speer RK1/4DCT52R4754F) a $R_{OV2} = 8,24 \text{ M}\Omega$ složený ze sériové kombinace $R_{OV2_1} = R_{OV2_2} = 4,12 \text{ M}\Omega$ (Vishay CMF554M1200FKEK), abychom získali požadovaný odpor.

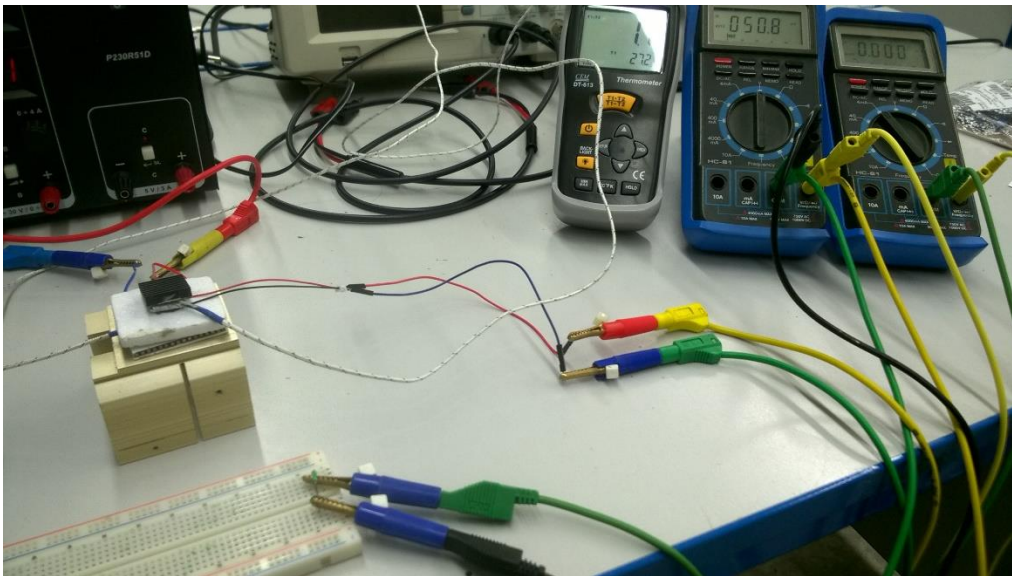
Dioda D_1

Dioda D_1 (STMicroelectronics BAT60JFILM) je antiparalelně připojen ke vstupu a slouží jako ochrana proti prohození kladného a záporného vodiče termoelektrického generátoru nebo pro případ opačného tepelného gradientu, kdy termoelektrický článek generuje záporné napětí.

3.3 Návrh ohřevu při měření

Pro aplikace v reálném prostředí je vhodné volit jako zdroj tepla například teplo lidského těla nebo ztrátové teplo z nějakého zařízení. Pro změření charakteristik modelu termoelektrického generátoru je potřeba zvolit aktivní ohřev, protože potřebujeme měřit ve větším rozsahu rozdílů teplot mezi teplou a studenou stranou generátoru, kterých bychom v předchozích případech jen obtížně dosahovali.

Proto jsme pro ohřev použili termoelektrickou baterii Marlow Industries TG12-6-01L, jejíž teplota se dá relativně snadno regulovat pomocí napájecího napětí.



Obrázek 13: Měřicí pracoviště.

Pro měření charakteristik termoelektrického generátoru je důležitý rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou. Proto bychom potřebovali vložit přímo mezi měřený generátor (TGP-651) a baterii sloužící jako zdroj tepla (TG12-6-01L) K sondu digitálního teploměru CFM DT-613, který jsme používali pro přesné měření teploty. Bohužel K sonda ve tvaru kuličky s průměrem přibližně milimetr a přívodními kabely by způsobovala vzduchovou mezeru, která by negativně ovlivnila přenos tepla mezi bateriemi. Generátor TGP-651 má na své teplé straně hliníkový válec s průměrem 9,5 mm a výškou 5 mm [8]. Díky vysoké tepelné vodivosti hliníku toho můžeme využít a umístit K sondu digitálního teploměru na stěnu hliníkového válečku, tak aby přenos tepla mezi bateriemi nebyl ovlivněn. Izolaci K sondy od okolního vzduchu jsme provedli pomocí destičky pěnového polystyrenu, do kterého byl vyříznut otvor pro hliníkový válec

generátoru TGP-651, viz obrázek 13 vlevo. V opačném případě bez izolace by odkrytá část K sondy vlivem okolního vzduchu chladla a způsobovala by zbytečně velkou chybu měření.

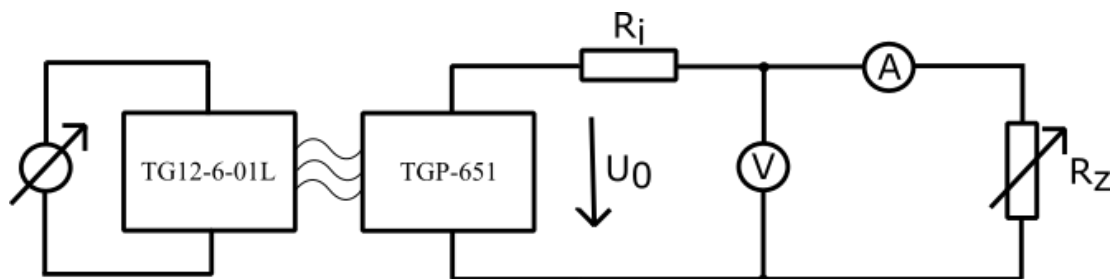
Na studenou stranu generátoru jsme umístili malý chladič (19 x 19 x 5 mm). Mezi generátor a chladič jsme umístili druhou K sondu, na této straně jsme nemohli udělat podobnou izolaci jako na teplé straně, protože na chladné straně potřebujeme co nejlepší přenos tepla do okolí, aby byla, pokud možno co nejchladnější. Na spoj mezi studenou stranou generátoru a chladičem jsme použili teplo-vodivou pastu Arctic MX-2, abychom měli dobrý přenos tepla a co nejvíce eliminovali vzduchovou mezeru která tam vložním sondy na měření teploty vznikla.

4 Dosažené výsledky

Nejdříve jsme měřili parametry samotného termoelektrického generátoru Micropelt TGP-651, poté jsme měřili již i s námi navrženým DC-DC měničem, který můžete vidět na obrázcích 21 a 22.

4.1 Měření vnitřního odporu termoelektrického generátoru TGP-651

Vnitřní odpor je důležitý kvůli přenosu výkonu, protože maximální výkon se mezi zdrojem a zátěží přenesou, když jsou k sobě impedančně přizpůsobeny. Toho budeme využívat v kapitole 4.2, abychom z termoelektrického generátoru dostali maximální výkon. Když je ke generátoru připojený námi navržený spínaný zdroj, tak se o maximalizaci přeneseného výkonu z generátoru stará obvod MPPT (Maximum Power Point Tracking) integrovaný v čipu BQ25570.



Obrázek 14: Schéma zapojení pro měření vnitřního odporu termoelektrického generátoru TGP-651.

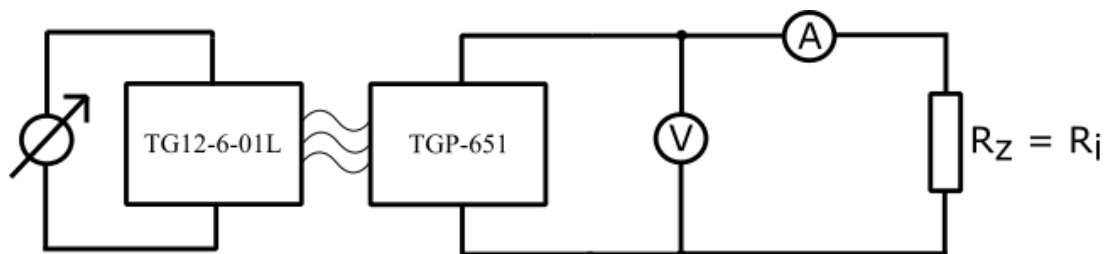
Použili jsem zapojení na obrázku 14, měřili jsme při rozdílu teplot $\Delta T = 7,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ve dvou krocích. V prvním kroku jsme změřili napětí naprázdno U_0 , v druhém kroku jsme připojili zátěž R_Z a získali napětí U na zátěži a proud I tekoucí zátěží. Z těchto hodnot jsme (4.1) určili R_i .

$$R_i = \frac{U_0 - U}{I} = \frac{0,41 - 0,255}{584 \cdot 10^{-6}} = 265 \text{ } \Omega \quad (4.1)$$

Výrobce udává odpor termoelektrického generátoru v rozmezí $170 \text{ } \Omega$ až $245 \text{ } \Omega$, typicky $210 \text{ } \Omega$ [9].

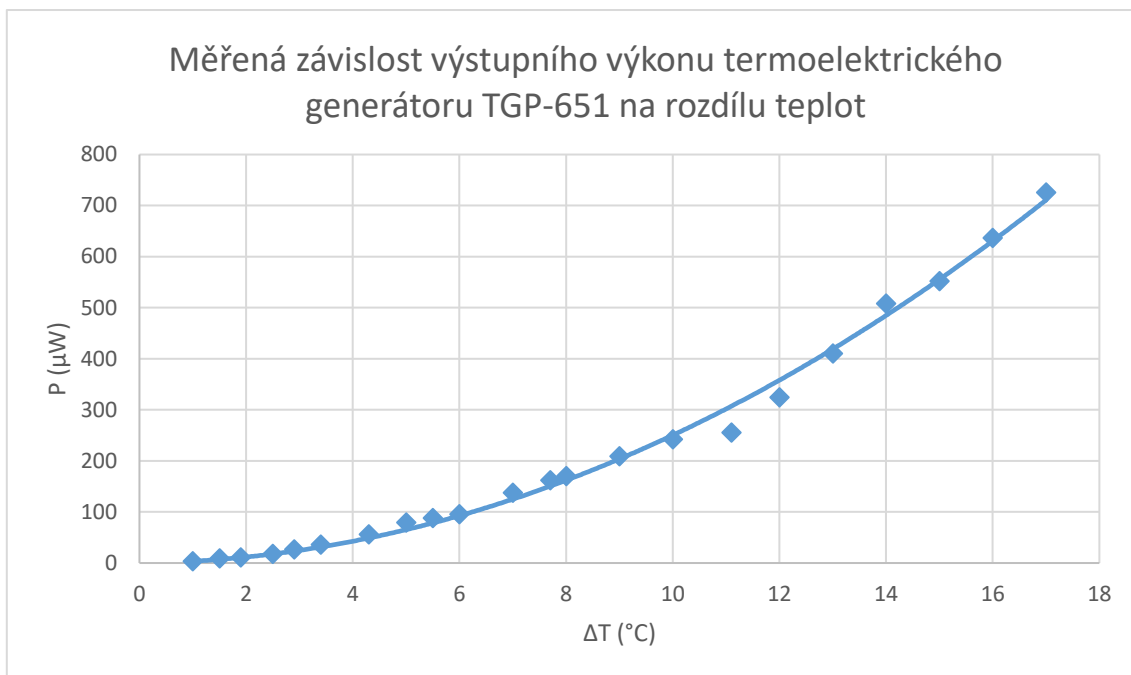
4.2 Měření závislosti výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot

Ze závislostí výstupního výkonu, napětí a proudu termoelektrického generátoru na rozdílu teplot, mezi teplou a studenou stranou generátoru, můžeme určit minimální rozdíl teplot, který je potřebný pro funkčnost námi navrženého modelu. Dále jaký rozdíl teplot je potřebný pro nějakou konkrétní aplikaci, případně s jakou periodou můžeme například vysílat signál u nějaké energeticky náročnější aplikace.



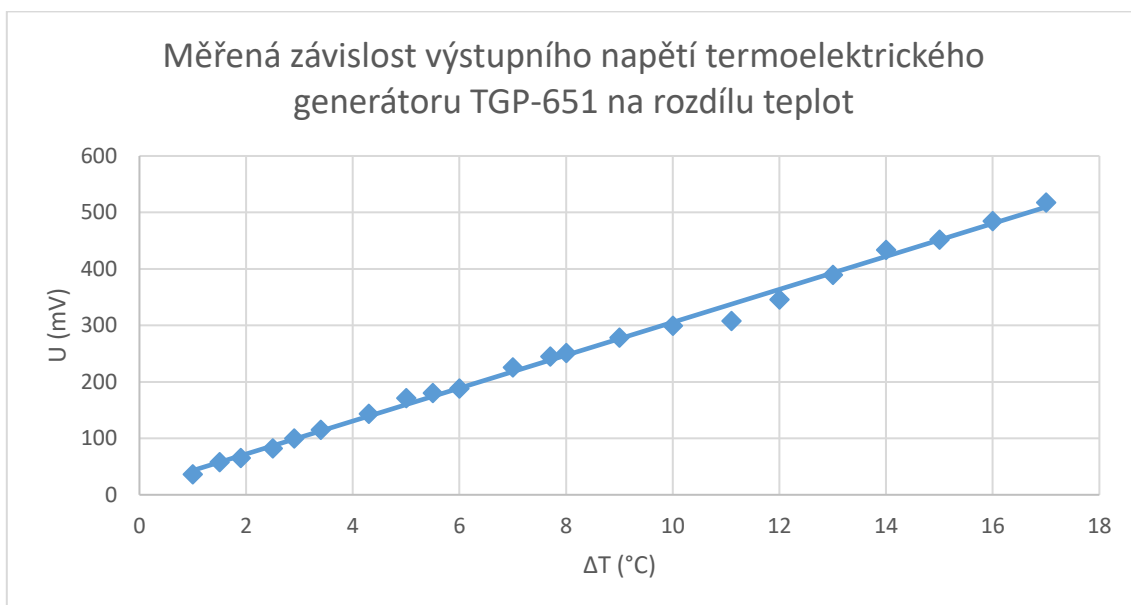
Obrázek 15: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.

Měření jsme prováděli v zapojení na obrázku 15. Jako zátěž jsme použili odpor $267,5 \text{ } \Omega$, abychom se co nejvíce přiblížili k vnitřnímu odporu generátoru (4.1), který jsme vypočítali v kapitole 4.1 a měli jsme tak zdroj a zátěž impedančně přizpůsobeny a dosáhli jsme tak co největšího výstupního výkonu.



Obrázek 16: Měřená závislost výstupního výkonu termočlánku TGP-651 na rozdílu teplot.

Měřili jsme od rozdílu teplot $\Delta T = 1$ °C s krokem přibližně 1 °C až do $\Delta T = 17$ °C. Naměřené hodnoty můžete vidět v přílohách v tabulce 3.



Obrázek 17: Měřená závislost výstupního napětí termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.

Ze směrnice grafu na obrázku 17 se dá určit Seebeckův koeficient $\alpha = 29$ mV·°C⁻¹. Porovnáním hodnoty s datasheetem, zjistíme že jsme dosáhli pouze poloviční hodnoty. Výrobce udává Seebeckův koeficient $\alpha = 60$ mV·°C⁻¹ [8]. Tato interpretace výsledku měření by ale byla chybná,

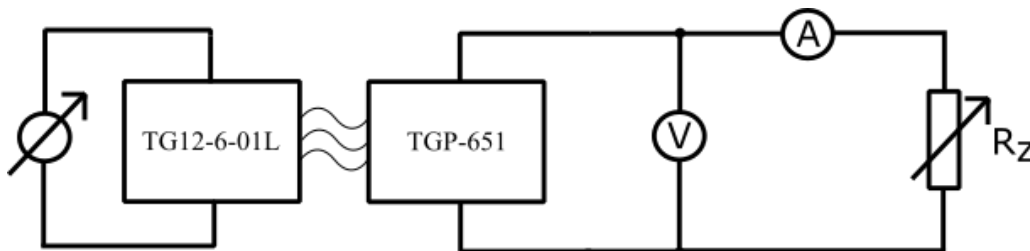
protože hodnota v datasheetu byla stanovena naprázdno a my jsme měřili s připojenou zátěží $267,5 \Omega$, kdy bychom měli z generátoru dostávat maximální výkon.

Jaký nejmenší rozdíl teplot potřebujeme k provozu našeho spínaného zdroje se podíváme v kapitole 4.4 až změříme minimální vstupní napětí našeho obvodu.

4.3 Měření závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu

Tato charakteristika nám ukazuje, jak se bude měnit výstupní výkon generátoru při konstantním $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ pro různou zátěž. Zároveň jde tímto měřením ověřit správnost měření v kapitole 4.1, protože maximum grafu závislosti výstupního výkonu na zátěži musí vyjít pro zatěžovací odpor o velikosti vnitřního odporu generátoru.

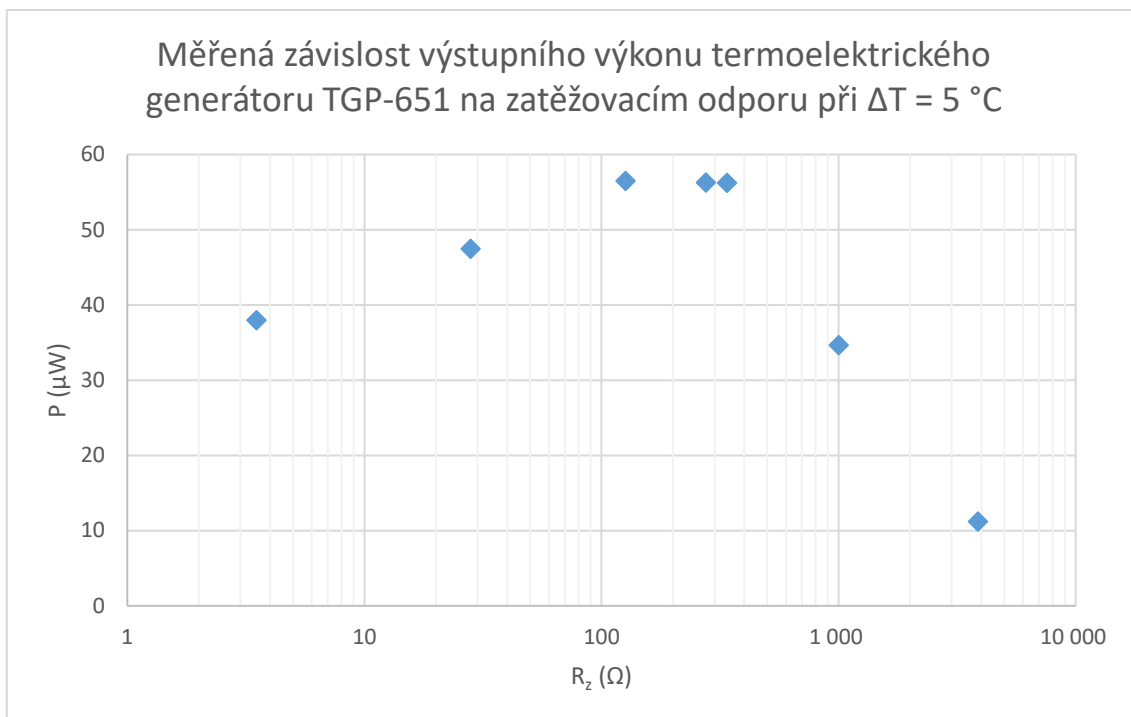
Termoelektrický generátor jsme měli zapojený podle schématu na obrázku 18. Rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou generátoru jsme udržovali celou dobu konstantní $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, protože změna rozdílu teploty by v měření způsobovala velkou chybu.



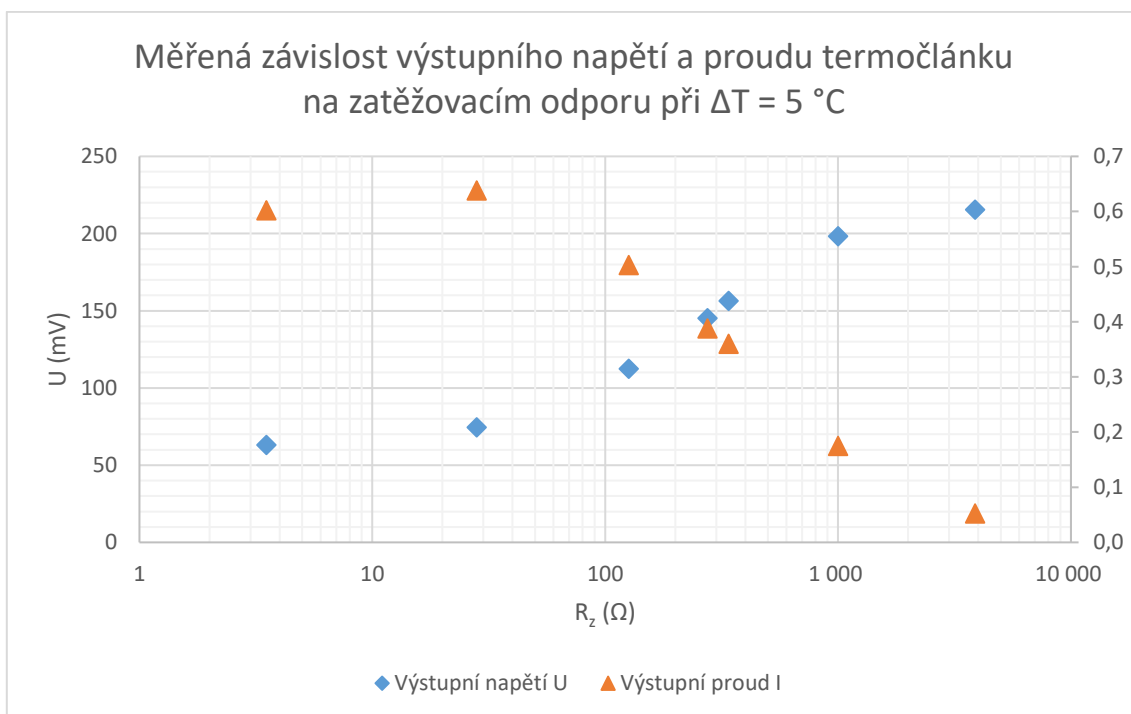
Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu.

Výsledný graf, který je na obrázku 19, má maximum přibližně v oblasti 100 až 300Ω , čímž se dostáváme do stejné oblasti jakou udává výrobce a jakou jsme naměřili v bodě 4.1. Abychom maximální výkon mohli určit přesněji, potřebovali bychom v této části grafu mít změřeno více bodů. Proto jako optimální zatěžovací odpor budeme brát hodnotu 265Ω , určenou vztahem (4.1) v kapitole 4.1 jako vnitřní odpor generátoru.

V přílohách v tabulce 4 můžete vidět naměřená data, které grafy zobrazují.



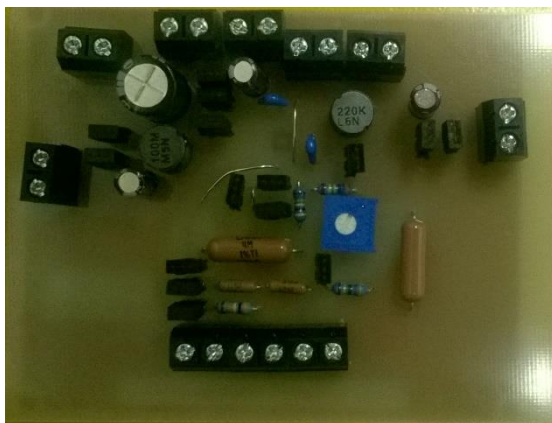
Obrázek 19: Měřená závislost výstupního výkonu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 20: Měřená závislost výstupního napětí a proudu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$.

4.4 Měření minimálního vstupního napětí integrovaného obvodu BQ25570

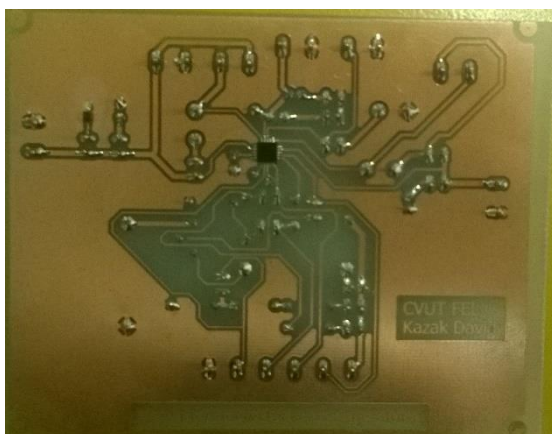
Toto měření jsme prováděli ve dvou variantách. Jednou s vybitým kondenzátorem C_{STOR} jako tzv. studený start a podruhé již s nabitým C_{STOR} na více jak 2 V, čímž jsme získali minimální napětí, se kterým je obvod schopný ještě pracovat, když už běží.



Obrázek 21: Hotová deska plošného spoje, pohled ze shora.

Měřili jsme na části spínaného zdroje našeho modelu (viz obrázek 21 a 22), který byl napájen z laboratorního zdroje stabilizovaného napětí.

Jemně jsme zvyšovali vstupní napětí do spínaného zdroje a měřili jsme napětí na kondenzátoru C_{STOR} . Sledovali jsme, jestli je vstupní step-up měnič schopný s určitým vstupním napětím kondenzátor nabíjet. Studený start zdroje můžeme brát za ukončený poté co napětí na C_{STOR} přesáhne 1,8 V. Zdroje je plně připraven k dodávání proudu do zátěže poté co napětí na C_{STOR} přesáhne hodnotu $U_{\text{BAT_OK_HYST}}$, která je v našem případě nastavena na 4,25 V.



Obrázek 22: Hotová deska plošného spoje, pohled na spodní stranu.

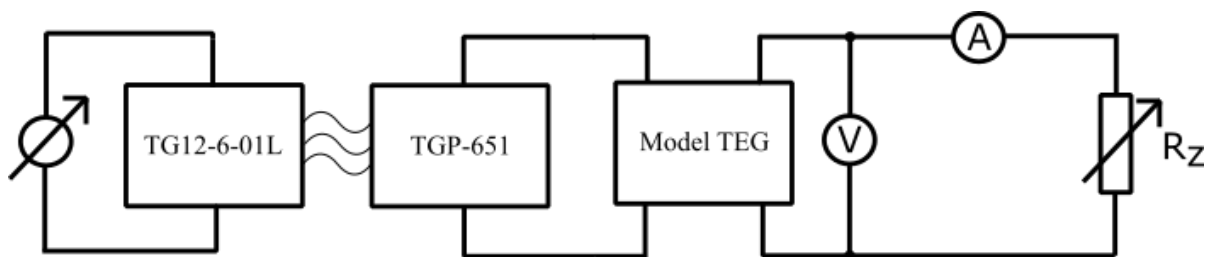
Opakovaným měřením jsme určili $U_{IN_MIN_CS} = 334 \text{ mV}$, výrobce udává pro tento parametr hodnotu 330 mV . vstupní proud byl až $96 \text{ }\mu\text{A}$, což odpovídá vstupnímu výkonu $32 \text{ }\mu\text{W}$, je důležité brát na vědomí že v případě takového vstupního výkonu trvá start zdroje několik minut. Rychlejšího startu můžeme dosáhnout tím, že zvýšíme vstupní napětí a tím i proud nebo snížením napětí $U_{BAT_OK_HYST}$.

Minimální napětí, při kterém je obvod ještě schopný pracovat, jsme naměřili 86 mV , výrobce integrovaného obvodu BQ25570 udává 100 mV .

Když tyto hodnoty porovnáme s výsledky měření z kapitoly 4.2 dostaneme se k tomu, že náš model termoelektrického generátoru potřebuje ke svému startu rozdíl teplot $\Delta T = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a nejmenší rozdíl teplot ze kterého dokáže ještě vyrábět elektrickou energii je $\Delta T = 2,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

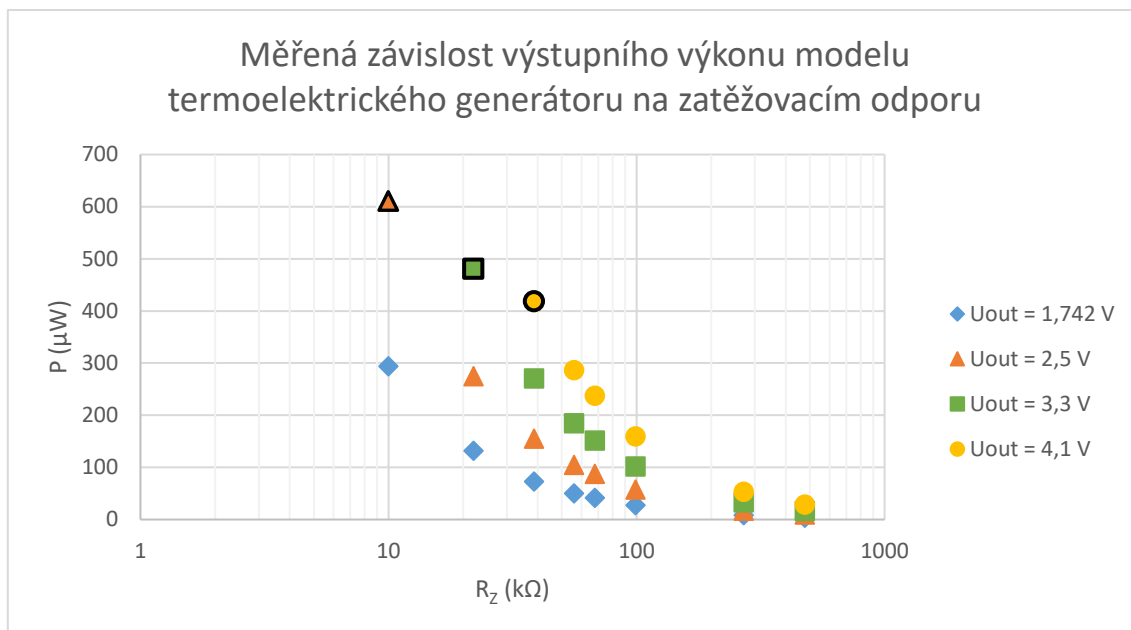
4.5 Měření závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu

V této kapitole se podíváme na měření výkonu celého modelu termoelektrického generátoru, termočlánek TGP-651 a k němu připojeného námi navrženého obvodu s DC-DC měničem a uchováváním energie pro dobu kdy článek nedodává dostatečný výkon. Tato charakteristika nám ukazuje, jaké výkony, a tedy jakou zátěž můžeme obvodem napájet.



Obrázek 23: Schéma zapojení pro měření závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu

Měřili jsme při rozdílu teplot $\Delta T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, model jsme zapojili podle schématu na obrázku 23. Měření jsme opakovali pro výstupní napětí $U_{OUT} = 1,742 \text{ V}$, což je minimální výstupní napětí obvodu, dále pro $2,5 \text{ V}$, $3,3 \text{ V}$ a pro $U_{OUT} = 4,1 \text{ V}$, které je maximální výstupní napětí, který je obvod schopný dodat.



Obrázek 24: Měřená závislost výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu

Obvod dokázal při rozdílu teplot $\Delta T = 12$ °C kontinuálně dodávat přibližně 300 μ W, to odpovídá výstupnímu výkonu generátoru TGP-651 při rozdílu teplot $\Delta T = 12$ °C, který jsme změřili v kapitole 4.2, viz obrázek 16 a tabulka 3.

Jak je vidět na grafu na obrázku 24, spínaný měnič byl schopný dodávat i vyšší výkony, ale pouze krátkodobě v závislosti na aktuálním nabití kondenzátoru C_{BAT} . Ten slouží jako zásoba energie, protože v těchto okamžicích je z našeho obvodu odebírán vyšší výkon, než do něj dodává termoelektrický generátor TGP-651. V grafu jsou tyto hodnoty označeny černým rámečkem. Doba, po kterou dokáže obvod dodávat špičkový výkon je omezena napětím $U_{BAT_OK} = 4,15$ V (viz kapitola 3.2.3), pokud napětí na C_{BAT} klesne pod tuto hodnotu výstup zdroje se automaticky odpojí. Nastavením tohoto napětí na nižší bychom mohli vyšší než dodávaný výkon do článku odebírat delší dobu, ale zároveň bychom přišli o možnost nastavit vyšší výstupní napětí, protože napětí na C_{BAT} musí být vždy trochu vyšší, než je výstupní napětí U_{OUT} .

Na naměřené hodnoty se můžete podívat v přílohách v tabulce 5.

5 Návrh dalšího postupu

Při měření a následném vyhodnocení jsme přišli i na několik nedostatků, které je v rámci dalšího pokračování práce na modelu potřeba vylepšit.

Jeden z nedostatků je dlouhý studený start modelu, který trvá v případě malého vstupního napětí i několik minut. Tento čas by šel zkrátit, pokud by se zároveň s regulací výstupního napětí U_{OUT} provedla i změna $U_{BAT_OK_HYST}$ a U_{BAT_OK} . Tyto dvě napětí jsou určeny soustavou rovnic (3.5), (3.6) a (3.7), kde jsou jako proměnné odpory R_{OK1} až R_{OK3} . Měnit bychom je mohli například tandemovým potenciometrem nebo trimrem, který by nahradil trimer R_{OUTT} a zároveň by měnil poměr mezi odpory R_{OK} . $U_{BAT_OK_HYST}$ je napětí na kondenzátoru C_{BAT} , při kterém se zapne výstupní step-down měnič a začne se na napájet zátěž. V současné době je na pevně nastavena hodnota $U_{BAT_OK_HYST} = 4,25$ V, proto musíme i při minimálním výstupním napětí $U_{OUT_MIN} = 1,742$ V čekat na nabití C_{BAT} na 4,25 V. $U_{BAT_OK} = 4,15$ V je také pevná hodnota napětí na C_{BAT} , při kterém se výstup obvodu vypne a zátěž se přestane napájet. To způsobuje problém, protože při nižších výstupních napětí nevyužijeme všechnu energii z kondenzátoru C_{BAT} , kterou bychom teoreticky mohli. Hodnoty napětí $U_{BAT_OK_HYST}$ a U_{BAT_OK} byly voleny takto vysoké, abychom mohli dosáhnout výstupního napětí až 4,1 V.

Další problém je to, že nám v kapitole 4.4 vyšel minimální rozdíl teplot pro studený start modelu $\Delta T = 11,5$ °C. To je hodnota, které lze za běžných podmínek jen obtížně dosáhnout, pokud budeme jako zdroj tepelného buzení brát lidské tělo. Po ukončení studeného startu už modelu stačí jen rozdíl teplot $\Delta T = 3$ °C, kterého není problém dosáhnout. To bychom mohli vyřešit například, tím že bychom studený start provedli nějakým externím zdrojem a místo kondenzátoru C_{BAT} bychom museli použít akumulátor s dostatečně vysokou kapacitou abychom, za běžných podmínek nemuseli studený start znovu provádět.

V kapitole 3.2.1 jsme určili minimální rozdíl teplot pro studený start $\Delta T = 5,5$ °C, protože jsme počítali se Seebeckovým koeficientem na prázdno, který udává výrobce v datasheetu termoelektrického generátoru TGP-651. Hodnota $\Delta T = 11,5$ °C z kapitoly 4.4, je určena z měření při připojené zátěži, které se přibližně rovnala vnitřnímu odporu generátoru.

Dále bychom měli provést rešerši dalších zdrojů tepla, protože lidské tělo není jediný zdroj odpadního tepla a zároveň jeho používání přináší problémy, například moderní výpočetní

technika produkuje desítky až stovky wattů ztrátového tepla, a mezi heatspreaderem čipu a okolním vzduchem je rozdíl teplot obvykle 20 až 30 °C. V tomto prostředí bychom mohli dosáhnout výrazně vyšších výkonů, než se nám podařilo dosáhnout s naším modelem. I tak by byl dosažený výkon moc malý na to, aby se takové zařízení ekonomicky vyplatilo provozovat v běžných počítačích. Zajímavé by to ale mohlo být ve velkých datacentrech kde jsou tisíce počítačů vedle sebe a kde by vyrobené energie mohlo být tolik aby instalace zařízení s termoelektrickými generátory dávala ekonomický smysl. Jako další možnost můžeme uvést koncept společnosti BMW, který vyrábí elektrickou energii z tepla výfuku. Takový automobil pak může ušetřit až 10 % paliva [1]. Například konvenční zdroje elektrické energie vypouští více jak 50 % vyrobené energie ve formě tepla do atmosféry a i toto teplo by se dalo za určitých podmínek částečně zpracovat a zvýšit tak celkovou účinnost tepelných elektráren. Potencionálních zdrojů tepla pro termoelektrické generátory máme všichni kolem sebe velké množství a je jen potřeba vybrat ten správný, jehož použití bude technicky tak i ekonomicky realizovatelné, protože největší nevýhoda termoelektrických generátorů je cena na jednotku výkonu.

6 Závěr

V této práci jsme se zabývali návrhem modelu termoelektrického generátoru. Náš návrh se skládal ze dvou částí: první část modelu je samotný termoelektrický generátor, druhá část je spínaný DC-DC měnič s kondenzátorem místo akumulátoru na uchovávání energie.

Měřením se nám podařilo ověřit funkčnost modelu, který dokázal při rozdílech teplot vyšších jak 10 °C generovat až stovky mikro wattů výkonu.

V kapitole 5 jsme se zabývali nedostatky, nad kterými je potřeba se před dalším postupem práce zamyslet a vyřešit je. Poté se můžeme pustit do přetvoření modelu termoelektrického generátoru na zdroj pro konkrétní reálnou aplikaci.

7 Literatura

- [1] G. J. Snyder, „Small Thermoelectric Generators,“ *The Electrochemical Society Interface*, Fall 2008.
- [2] prof. Ing. Miroslav Husák CSc., „Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým principem,“ *DPS, ISSN 1805-5044*, pp. 2-8, 3-4 / 2014.
- [3] R. Vullers, R. v. Schaijk, I. Doms, C. V. Hoof a R. Mertens, „Micropower energy harvesting,“ v *Solid-State Electronics* 53, 2009.
- [4] V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini a C. V. Hoof, „Thermoelectric Converters of Human Warmth for Self-Powered Wireless Sensor Nodes,“ *IEEE Sensors Journal*, pp. 650-656, 6. 2007.
- [5] V. Leonov a R. J. M. Vullers, „Thermoelectric Generators on Living Beings,“ 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228995659_Thermoelectric_generators_on_living_beings.
- [6] V. Leonov, T. Torfs, C. V. Hoof, R. Vullers a V. N. Kukhar, „Small-size BiTe Thermopiles and a Thermoelectric Generator for Wearable Sensor Nodes,“ 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/242387617>.
- [7] Micropelt, „MPG-D655 - Thin Film Thermogenerator,“ [Online]. Available: http://www.micropelt.com/downloads/datasheet_mpg_d655.pdf.
- [8] Micropelt, „ThermoGenerator in Package TGP-651 (Ver. 3),“ 12. 11. 2014. [Online]. Available: http://www.micropelt.com/fileadmin/user_upload/_PDF_TGP_UK.pdf.
- [9] Texas Instruments, „bq25570 Nano Power Boost Charger and Buck Converter for Energy Harvester Powered Applications (Rev. E),“ 6. 3. 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf>.
- [10] Linear Technology, „LTC3109 - Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager,“ [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3109fb.pdf>.

8 Přílohy

Tabulka 3: Naměřené hodnoty závislosti výstupního výkonu (napětí a proudu) termoelektrického generátoru TGP-651 na rozdílu teplot.

ΔT (°C)	U (mV)	I (mA)	P (μW)
1,0	36,4	0,10	3,49
1,5	58,0	0,16	9,11
1,9	65,2	0,18	11,41
2,5	82,6	0,22	18,42
2,9	100,0	0,27	27,00
3,4	115,4	0,31	36,00
4,3	143,4	0,39	56,07
5,0	171,3	0,47	79,65
5,5	180,6	0,49	88,13
6,0	188,4	0,51	95,90
7,0	225,6	0,61	137,84
7,7	244,9	0,66	162,12
8,0	251,2	0,68	170,56
9,0	278,4	0,75	209,64
10,0	299,4	0,81	242,51
11,1	308,0	0,83	255,64
12,0	346,3	0,94	324,48
13,0	389,5	1,05	410,53
14,0	434,0	1,17	508,65
15,0	452,0	1,22	552,34
16,0	485,0	1,31	636,81
17,0	518,0	1,40	726,24

Tabulka 4: Naměřené hodnoty závislosti výstupního napětí a proudu termoelektrického generátoru TGP-651 na zatěžovacím odporu při $\Delta T = 5$ °C.

R_Z (Ω)	U (mV)	I (mA)	P (μA)
4	63,1	0,60	37,99
28	74,4	0,64	47,47
126	112,3	0,50	56,49
275	145,1	0,39	56,30
338	156,3	0,36	56,27
1 000	198,2	0,18	34,69
3 870	215,4	0,05	11,20

Tabulka 5: Naměřené hodnoty závislosti výstupního výkonu modelu termoelektrického generátoru na zatěžovacím odporu.

$U_{out} = 1,742 \text{ V}$				$U_{out} = 2,5 \text{ V}$			
$R_Z \text{ (k}\Omega\text{)}$	$U \text{ (V)}$	$I \text{ (mA)}$	$P \text{ (}\mu\text{W)}$	$R_Z \text{ (k}\Omega\text{)}$	$U \text{ (V)}$	$I \text{ (mA)}$	$P \text{ (}\mu\text{W)}$
9,98	1,740	0,169	294,1	9,98	2,503	0,244	610,7
21,96	1,741	0,076	132,3	21,96	2,500	0,110	275,0
38,60	1,740	0,042	73,1	38,60	2,501	0,062	155,1
55,90	1,739	0,029	50,4	55,90	2,501	0,042	105,0
67,90	1,739	0,024	41,7	67,90	2,501	0,035	87,5
99,00	1,739	0,016	27,8	99,00	2,501	0,023	57,5
270,20	1,740	0,005	8,7	270,20	2,501	0,007	17,5
476,00	1,741	0,002	3,5	476,00	2,503	0,004	10,0
$U_{out} = 3,3 \text{ V}$				$U_{out} = 4,1 \text{ V}$			
$R_Z \text{ (k}\Omega\text{)}$	$U \text{ (V)}$	$I \text{ (mA)}$	$P \text{ (}\mu\text{W)}$	$R_Z \text{ (k}\Omega\text{)}$	$U \text{ (V)}$	$I \text{ (mA)}$	$P \text{ (}\mu\text{W)}$
21,96	3,296	0,146	481,2	21,96	-	-	-
38,60	3,299	0,082	270,5	38,60	4,1	0,102	418,2
55,90	3,298	0,056	184,7	55,90	4,1	0,070	287,0
67,90	3,297	0,046	151,7	67,90	4,1	0,058	237,8
99,00	3,297	0,031	102,2	99,00	4,1	0,039	159,9
270,20	3,298	0,010	33,0	270,20	4,1	0,013	53,3
476,00	3,298	0,005	16,5	476,00	4,1	0,007	28,7