

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ENERGY HARVESTING A JEHO MOŽNOSTI VYUŽITÍ PŘI MONITOROVÁNÍ LETECKÝCH KONSTRUKCÍ

ENERGY HARVESTING AND ITS CAPABILITIES FOR USE IN AIRCRAFT STRUCTURE HEALTH
MONITORING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Dvořáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Košťál, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Zdeněk Dvořáček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Rostislav Košťal, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Energy Harvesting a jeho možnosti využití při monitorování leteckých konstrukcí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Trendem dnešní doby je zavádění systémů monitorování konstrukcí „Structure Health Monitoring“ (SHM), kde jsou vybrané konstrukce monitorovány pomocí senzorů. Inspekce či údržba probíhá jen v případech, kdy dojde ke změně monitorovaných parametrů. Avšak jedním z problémů použití více senzorů na konstrukci je nutnost jejich napájení a přivedení kabeláže k samotným senzorům. Jedním ze způsobů, jak eliminovat nutnost přivádění kabeláže k senzorům je použití energy harvestingu.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše a aplikace energy harvestingu založeném na termoelektrickém principu v letectví.
- Popis fyzikálního principu energy harvestingu založeného na termoelektrickém principu.
- Analýza výkonu termoelektrického generátoru (TEG) pro zadané podmínky.

Seznam doporučené literatury:

STOJMENOVIC, Ivan. Handbook of sensor networks: algorithms and architectures. Hoboken, NJ: Wiley, 2005. ISBN 9780471684725.

NIU, Michael Chun-Yung. Airframe structural design. 2nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmililit Press Ltd. ISBN 9627128090.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá analýzou termoelektrického generátoru pro napájení bezdrátových senzorů pro monitorování leteckých konstrukcí. Teoretická část obsahuje řešení problematiky termoelektrického jevu a současná řešení. Součástí praktické části je laboratorní výukový model pro analýzu výkonů různých typů konvenčních termoelektrických generátorů.

Klíčová slova:

Termoelektrický generátor, energy harvesting, seebeckův jev, Structure Health Monitoring, TEG, Scilab

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis is to analysis of thermoelectric generator as power supply for wireless sensors in aircraft structures monitoring system. The theoretical part contains a research of thermoelectric phenomenon and current solutions. In practical part is a goal to build laboratory teaching model for the analysis of the performance of various types of conventional thermoelectric generators.

Key words:

Thermoelectric generator, energy harvesting, Seebeck effect, Structure Health Monitoring, TEG, Scilab

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁČEK, Zdeněk. *Energy Harvesting a jeho možnosti využití při monitorování leteckých konstrukcí*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. 49 s. Vedoucí práce Ing. Rostislav Košťál, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Rostialava Koštiala, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou součástí bibliografických citací uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval Ing. Rostislavu Košťalovi, Ph.D. za vstřícný přístup při měření a poskytnutí klimatické komory pro vypracování závěrečné práce. Děkuji také svým rodičům za to, že mi umožnili studovat a poskytli mi finance nejen pro vypracování této bakalářské práce.

podpis

OBSAH

1	ÚVOD.....	13
2	Cíl práce.....	15
3	Monitorování skutečného provozu a predikce únavového poškození.....	16
4	Energy harvesting.....	17
	4.1 Historie objevování termoelektrického jevu.....	18
	4.2 Seebeckův jev.....	19
	4.3 Peltiérův jev.....	21
5	Existující řešení v letectví.....	22
	5.1 EADS 2013.....	22
	5.2 EADS 2016.....	23
	5.3 Energy harvesting na VUT.....	24
	5.4 Další aplikace mimo letectví.....	25
	5.4.1 Automobilka BMW.....	25
	Nabíjecí zařízení firmy BioLite.....	26
6	Elektronika pro napájení SHM senzoru.....	27
	6.1 Snižovač napětí.....	27
	6.2 Zvyšovač napětí.....	27
	6.3 Invertor.....	28
	6.4 Blokující měnič.....	28
7	Elektronika pro napájení SHM senzoru.....	29
8	Teoretická analýza výkonu.....	30
	8.1 Teoretický model obsahující ztráty na kontaktech.....	30
	8.2 Zjednodušený model.....	32
9	Praktická část.....	34
	9.1 Měřicí sestava.....	34
	9.2 Rozbor měřicí podsestavy.....	34
	9.3 Elektronika pro vyhřívání.....	35
	9.4 Měření naprázdno.....	38
	9.5 Měření při zatížení.....	39
	9.6 Další komponenty použité pro měření.....	40
	9.6.1 Thermocouple M0503.....	40
	9.6.2 Zdroj pro ohřívání teplé strany.....	40

10	Programy použité k návrhu a simulaci.....	41
10.1	KiCad.....	41
10.2	Scilab.....	41
10.3	Solidworks.....	41
	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	47
	SEZNAM TABULEK.....	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá analýzou termoelektrického článku jako zdroje elektrické energie. Dnes existuje celá řada termoelektrických článků o velkém rozsahu výkonů lišících se podle použití, rozměry a materiálem pro danou aplikaci. Při dodání teplotního rozdílu na deskách termočlánku můžeme vytvářet elektrickou energii. Výhodou takového zdroje je absence jakýchkoli pohyblivých částí, vysoká spolehlivost a bezporuchovost.

V leteckém průmyslu jsou kladeny vysoké požadavky právě na jakost, spolehlivost a bezpečnost celého letounu. Navržené zařízení přitom musí být schopno odolávat náročným pracovním podmínkám. Každé zařízení má předem daný počet hodin, po jejichž uplynutí je nutno provést jeho kontrolu. Těchto prohlídek je několik typů a při střední nebo generální opravě je nutné letoun odstavit na několik týdnů. Trendem dnešní doby je zavádění systémů monitorování konstrukcí „Structure Health Monitoring“, kde jsou vybrané konstrukce monitorovány pomocí sítě senzorů. K inspekci dochází jen v případě dosažení kritických hodnot monitorovaných parametrů. To umožňuje zkrátit kontrolní dobu a tím i dobu kdy letoun není v provozu. Jedním z problémů použití tohoto zařízení je jeho nutnost napájení řídicího systému a přivedení kabeláže k jednotlivým senzorům. Jedním ze způsobů, jak eliminovat nutnost kabeláže je použití energy harvesting založeném právě na termoelektrickém principu. O rozdílu teplot mezi vnitřkem trupu, kde je udržována pokojová teplota pro pasažéry a povrchem pláště letounu ve vyšších nadmořských výškách lze uvažovat jako o možném zdroji energie pro alespoň část z celkové sítě senzorů na letounu.

2 Cíl práce

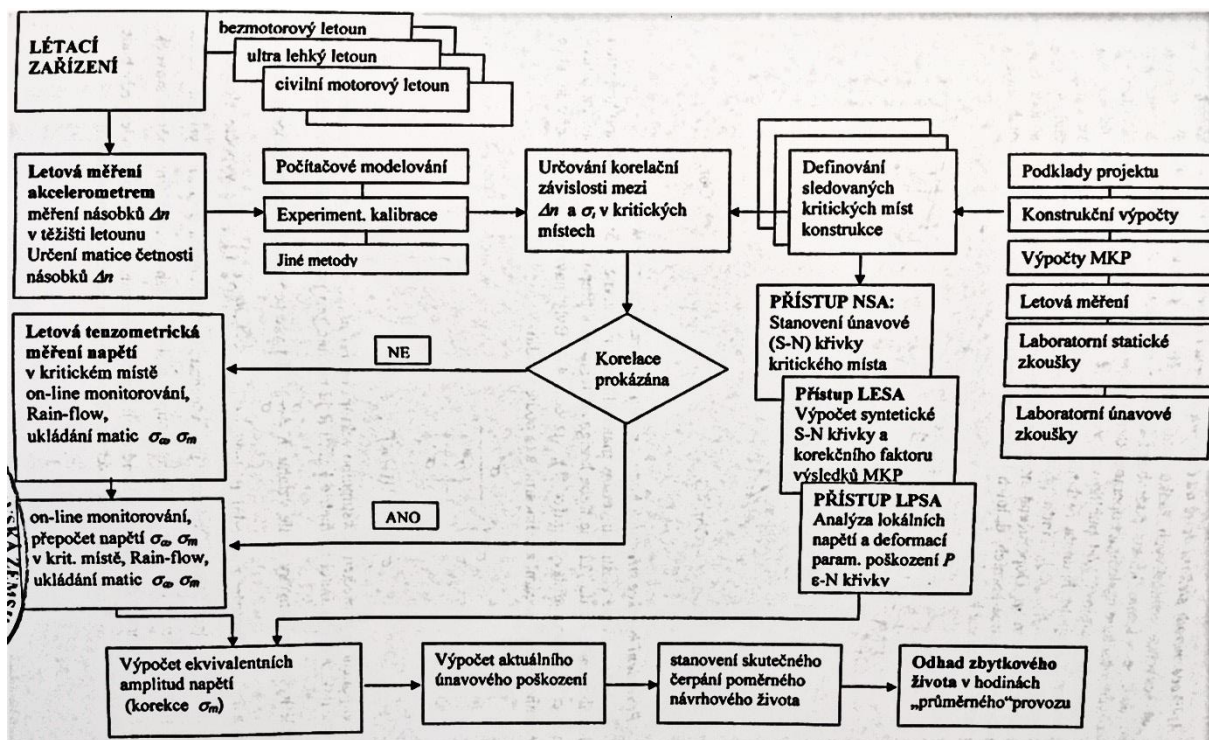
Cílem této práce je prozkoumat oblast současných řešení termoelektrických energy harvesterů a zpracovat rešerši. Dalším krokem je výpočet výkonů při integrování termoelektrického generátoru na trup letounu pro modelový příklad letu civilního dopravního letounu. Mimo to je třeba navrhnout měřicí stanici pro ověření výkonů peltierových článků.

Hlavní výzvou pro mne bylo navrhnout co nejuniverzálnější řešení pro praktické měření různých peltierových článků a následně jej podrobit testování v klimatické komoře.

3 Monitorování skutečného provozu a predikce únavového poškození

Pro správné hodnocení konstrukce podle reálného stavu je důležité znát provozní podmínky a stupeň degradace kritických míst na letounu. Jako vstupní hodnoty nám slouží velikosti provozních zatížení konkrétně časově proměnné napětí v posuzovaných místech konstrukce. Vstupní data jsou získávána monitorováním pomocí snímačů deformace, např. tenzometricky. Další vstupní informací je popis únavových vlastností kritického místa na konstrukci. Ty jsme schopni vyčíst z únavových zkoušek prováděných na samotném konstrukčním dílu, které jsou potřeba pro certifikaci každého stroje s výjimkou ultralehkých letadel. Z průběhů zkoušek lze vytvořit S-N křivky jednotlivých dílů leteckých konstrukcí. Další úrovní vstupních parametrů tvoří kritická únavová místa zjištěná často metodou konečných prvků (MKP).

Projekt sledování životnosti je založen na měření zatížení v reálném čase při letu letounu, jeho okamžitém zpracování a následné sumaci únavových poškození po přistání letounu. Zatímco za letu je letoun off-line, po přistání a zpracování signálu z letu je možno monitorovat stav flotily letadel on-line. Diagram chodu systému na vojenském letounu L59 je na Obr. 3.1. Při realizaci takového systému analýzy poškození kritických míst na konstrukci lze on-line sledovat únavu každého letounu sledované flotily a tím přispět ke zvýšení bezpečnosti leteckého provozu. [1]



Obr. 1 Diagram sledování životnosti aplikovaný na vojenském letounu [1]

4 Energy harvesting

V první řadě je třeba formulovat co to energy harvesting je, k čemu slouží a jaké zdroje lze při současném poznání účinně používat. Energy harvesting je proces získávání energie z prostředí, a okolních zařízení a následný převod na elektrickou energii. Tím, že se v podstatě jedná o nevyužitou, odpadní energii jde o ekologický způsob získávání elektrické energie. Velkou výhodou použití takového zařízení využívající energy harvesting pro napájení je absence konvenčního typu zdroje elektrické energie – baterie. Tím odpadá nutnost její výměny ve špatně přístupných místech a také nutnost vedení kabeláže od baterie k spotřebiči. Díky rozšíření bezdrátových technologií a internetu věcí (IoT – Internet of Things), miniaturizaci a vývoji stále více nízko - energetických elektrických komponent nabývají energy harvesting technologie v posledních letech nebývalého rozmachu.

Existuje mnoho způsobů převodu okolní energie na elektrickou. Mezi nejvýznamnější patří [2]:

- Sluneční energie
 - fotovoltaické články
- Teplotní gradient
 - termočlánky
- Mechanická energie
 - Lidská činnost
 - Proudění vzduchu a kapalin
 - Vibrace
 - Tlakové změny
- Elektromagnetická energie

4.1 Historie objevování termoelektrického jevu

V roce 1821 objevil Thomas Johann Seebeck, že v uzavřeném obvodu skládajícího se ze dvou různých kovových vodičů a v němž mezi místem styku obou vodičů a jejich volnými konci je teplotní rozdíl ΔT , vzniká napětí ΔU . Později, v roce 1834 nezávisle na Seebeckovi objevil Jean Charles Peltier jev, který spočívá v uvolňování nebo pohlcování tepla při průchodu stejnosměrného proudu místem styku dvou vodičů. Množství tohoto tepla Q_p , které nazval po sobě teplem Peltiérovým je úměrné procházejícímu proudu I místem styku a na směr závisí, zda je v místě styku obou vodičů teplo uvolňováno nebo pohlcováno. Oba jevy jsou prakticky stejné, pouze inverzního charakteru. William Thomson (lord Kelvin) studoval oba zmíněné jevy na základě termodynamických zákonů a potvrdil jejich vzájemnou souvislost, a navíc objevil další jev, který byl po něm nazván jev Thomsonův. Zjistil totiž, že pokud prochází stejnosměrný proud I homogenním vodičem, ve kterém je teplotní spád (teplotní gradient), uvolňuje nebo pohlcuje se ještě další množství tepla Q_T , nezvaného teplem Thomsonovým. Z toho je zřejmé, že Thomsonův a Peltierův jev jsou jevy které spolu úzce souvisí.

Carl Axel Frederick Benedicks oznámil v letech 1920-1921 objev dalšího termoelektrického jevu, který je kvantitativně určován jen velikostí teplotního gradientu ve vodiči. Pokud se ve vodiči nachází teplotní gradient, přestože teploty obou konců vodiče jsou stejné, vznikne mezi konci vodiče rozdíl potenciálů. Ten je velmi malý a u kovů prakticky neměřitelný. Právě proto nebyla existence Benedicksova jevu dlouho experimentálně prokázána. Byl prokázán Z. Trousillem na vzorcích z germania, který změřil rozdíl potenciálů.

Všechny výše uvedené jevy Seebeckův, Peltierův, Thomsonův a Benedicksův označujeme souhrnným názvem jevy termoelektrické. Podstata daných jevů spočívá buď v vzniku elektromotorického napětí nebo v uvolňování a pohlcování tepla. Tehdy byly k pokusům použity výhradně kovy, ty ale nejsou k těmto účelům vhodné. Průlom v této oblasti přinesly až polovodiče, jejichž poznání umožnilo zkonstruovat A. F. Ioffovi v roce 1925 první chladicí zařízení (TEC) založené na Peltierovu jevu. Účinnost tohoto zařízení byla však jen 4 %. [3]

4.2 Seebeckův jev

Seebeckův jev je založen na difuzi elektronů mezi dvěma odlišnými materiály – vodiči či polovodiči. Je-li izolovaný vodivý materiál vložen do teplotního gradientu vznikne elektrické napětí. Tento jev se označuje jako absolutní Seebeckův jev a vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.

Absolutní Seebeckův koeficient α je definován jako okamžitý poměr změny Seebeckova napětí U_s a změny teploty T při dané teplotě.

$$\alpha = \frac{dU_s}{dT} \quad 4.1$$

kde:

α Seebeckův koeficient [V/K],

dU_s Napětí [V],

dT Teplotní změna [K].

Komplikovanější situace nastává, když se elektricky spojí dva různé vodiče A a B, které jsou umístěny do teplotního gradientu tak, že spoj je na jiné teplotě než oba konce. Mezi kontakty vznikne relativní Seebeckovo elektrické napětí U_{AB} . Relativní Seebeckův koeficient je pak definován:

$$\alpha_{AB} = \frac{dU_{AB}}{dT} \quad 4.2$$

kde:

α_{AB} Relativní Seebeckův koeficient [V/K],

dU_{AB} Relativní Seebeckovo napětí [V],

dT Teplotní změna [K].

Mezi absolutním a relativním Seebeckovým koeficientem platí vztah:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad 4.3$$

kde:

α_{AB} Seebeckův koeficient [V/K],

α_A Seebeckův koeficient materiálu A [V/K],

α_B Seebeckův koeficient materiálu B [V/K].

Pro výsledné napětí platí vztah:

$$U = \alpha_{AB} \cdot (T_h - T_s) \quad 4.4$$

kde:

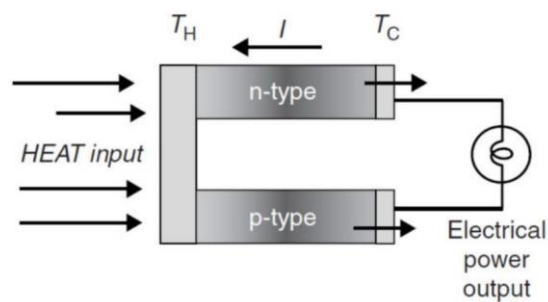
α_{AB} Relativní Seebeckův koeficient [V/K],

U Napětí [V],

T_h Teplota teplé strany [K],

T_s Teplota studené strany [K],

Přičemž princip je vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Princip Seebeckova jevu [4]

Seebeckovo napětí nevzniká v důsledku existence přechodu dvou odlišných vodičů, ale je dáno pouze teplotním gradientem na vodičích. Nejstarší aplikace tohoto jevu je v termoelektrické termometrii k přesnému měření teploty. [4]

4.3 Peltiérův jev

Prochází-li elektrický proud spojem dvou materiálově odlišných A, B, na přechodu těchto vodičů se uvolňuje nebo pohlcuje teplo. Skutečnost, zda je teplo uvolňováno nebo pohlcováno je dáno směrem proudu. Jev lze také sledovat na nehomogenním vodiči v přítomnosti koncentračního gradientu nebo na rozhraní dvou fází ve dvou a více fázových materiálech. Relativní Peltiérův koeficient je definován jako poměr absorbovaného tepla a proudu:

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad 4.5$$

kde:

π_{AB} Peltiérův koeficient [V],

Q Teplo na přechodu [W],

I Elektrický proud [A].

Vztah mezi relativním Peltiérovým koeficientem a relativním Seebeckovým koeficientem stanovuje Kelvinův vztah:

$$\alpha_{AB} = \frac{\pi_{AB}}{T} \quad 4.6$$

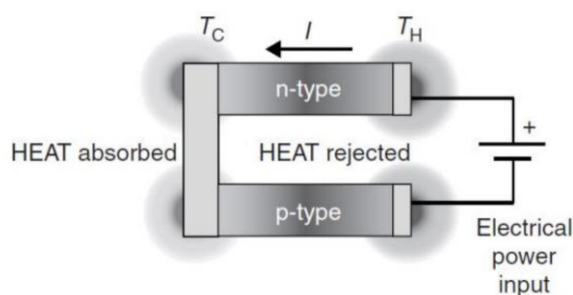
kde:

α_{AB} Relativní Seebeckův koeficient [V/K],

π_{AB} Peltiérův koeficient [V],

T Teplota [K].

Princip Peltiérova jevu je na Obr. 3.



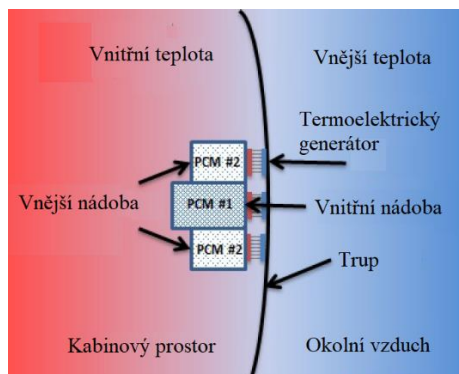
Obr. 3 Princip Peltierova jevu [4]

Uvolňování a pohlcování tepla na přechodu je reverzibilní proces. Při konstantním proudu je Peltiérův jev přímo úměrný relativnímu Seebeckovu koeficientu a při každé teplotě je přímo úměrný proudu. [4]

5 Existující řešení v letectví

5.1 EADS 2013

Studie EADS publikovaná inovačním oddělením v roce 2013 se zabývá praktickou realizací energy harvesting aparaturou, která je připojena k vnitřní části trupu letounu (Obr. 4). Přístroj zde popsán se skládá ze dvou soustředných nádob (Obr. 4), uvnitř kterých je destilovaná voda a materiál s fázovou změnou (PCM) což je látka, která při změně z kapalného skupenství na skupenství pevné a obráceně uvolňuje nebo naopak absorbuje velké množství energie [5].



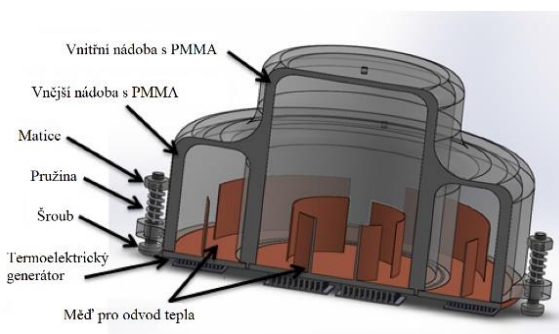
Obr. 4 Průřez přístroje upevněného na vnitřní stranu trupu (upraveno z [6])

Ve studii je použit materiál známý pod označením E-11, který mění skupenství při $-11,6^{\circ}\text{C}$. Fyzikální vlastnosti vody a materiálu E-11 jsou v Tab. 1.

Materiál	Voda	E-11
Teplota změny skupenství	0	-11,6
Uvolněná energie [kJ/kg]	333	301

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti použitých materiálů uvnitř nádob

Nádoby jsou tvořeny z polymethylmethakrylátu (PMMA) s tepelnou vodivostí $0.167 - 0.25 \text{ W/mK}$ [7]. Spodní část je vyrobena z mědi (Obr. 5) s tepelnou vodivostí 385 W/mK [8]. Z toho vyplývá, že většina tepla proudí skrz měď a termoelektrický generátor směrem do trupu a naopak.

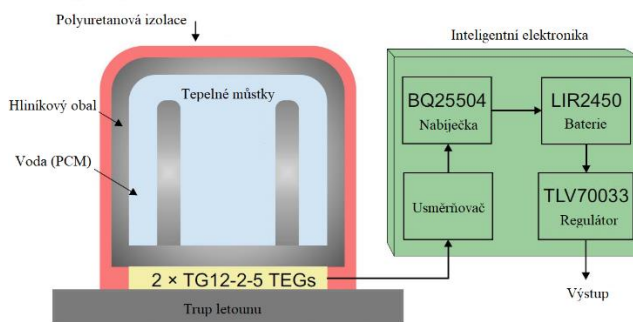


Obr. 5 Průřez 3D modelu přístroje (upraveno z [6])

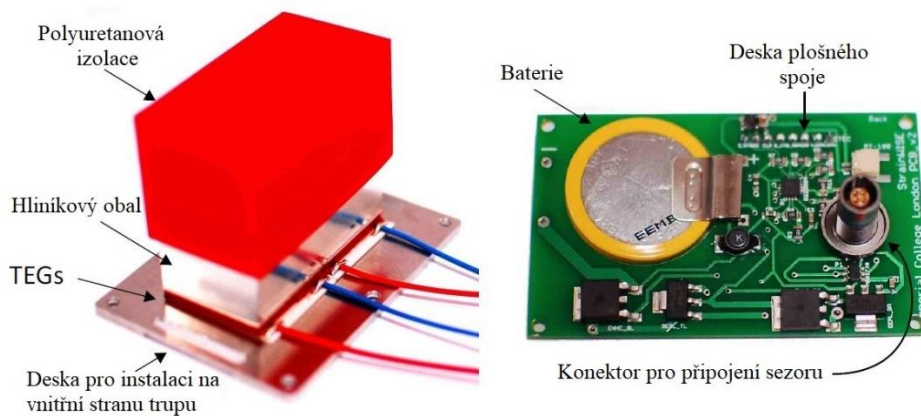
Celkově zařízení obsahuje dvanáct kusů TEG článků, váží 95 gramů disponuje hustotou výkonu 0.079 W/kg .

5.2 EADS 2016

V roce 2016 byla publikována studie obsahující možné energy harvesting řešení pro structure health monitorig (SHM) spolu s řídicí elektronikou. Maximální spotřeba jednoho uzlového bodu tohoto řešení činí 113 mW. V uspaném stavu spotřeba činí pouhých 0,04 mW. Koncept je tvořen jednou nádobkou z polyuretanu tloušťky 2 mm obsahující PCM, dvěma TEG od firmy Marlow Industries o rozměrech 34.01 mm x 30.00 mm x 3.94 mm. Nádobka obsahuje hliníkový box s vyfrézovanými tepelnými mosty pro správný odvod energie na jednu z ploch termočláнку. Studie se neobešla bez lithuom-iontového akumuláru LIR2450 s kapacitou 120 mAh. [9]



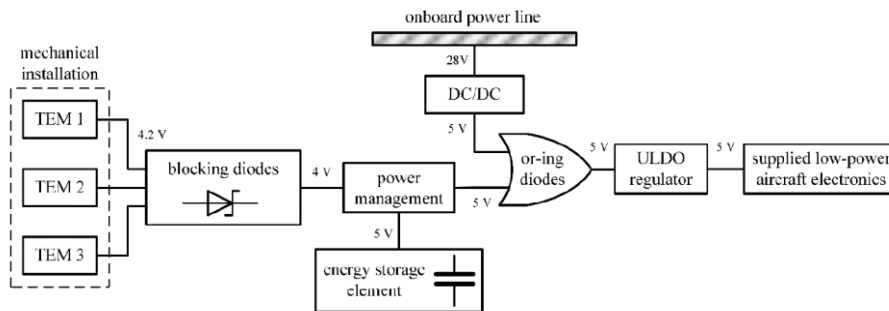
Obr. 6 Průřez 3D modelu přístroje (upraveno z [9])



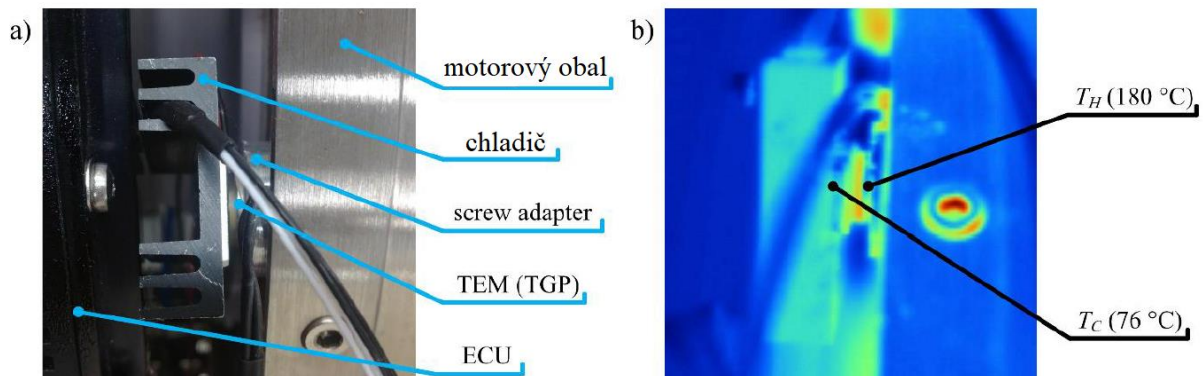
Obr. 7 Celkové řešení (vlevo) a DPS řídicí elektroniky(vpravo) (upraveno z [9])

5.3 Energy harvesting na VUT

Výzkum v oblastech energy harvestingu probíhá i na Vysokém učení technickém v brně. Zkoumány jsou především: vibrační a termoelektrické systémy. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky ve spolupráci s UNIS, a. s. testoval termoelektrické generátory Micropelt TGP – 751. Finální testy probíhaly na jednom termočlánku umístěném na tělo turbohřídelového motoru PBS TS100 s maximálním výkonem 180 kW, jenž je vhodný pro lehké vrtulníky do hmotnosti 1000 kg. Blokový diagram spolu s řídicí elektronikou je na Obr. 8.



Obr. 8 Blokový diagram sestávající se z 3 ks TEM a řídicí elektroniky [10]



Obr. 9 Termoelektrický generátor upevněný na PBS TS100 (upraveno z [10])

5.4 Další aplikace mimo letectví

5.4.1 Automobilka BMW

Experimenty s termočládky probíhají i v automobilovém průmyslu. Vždy je zde snaha snížit uhlíkovou stopu pro splnění stále se zpřísnující normy v Evropské unii. Samotný termogenerátor je v případě značky BMW umístěn ve spodní části vozidla mezi výfukové potrubí a chladicí okruh viz Obr. 10.



Obr. 10 Umístění termogenerátoru v automobilu BMW řady 5 [11]

Současný systém disponuje výkonem 200 W. Nevýhodou použití termočládků v automobilovém průmyslu může být výrazné snížení životnosti při otřesech a nestálosti mezi prostředími. Energie odebraná plynům opouštějící výfukový prostor ve formě tepla na výrobu elektrické energie by mohla zapříčinit nezanedbatelné snížení kinetické energie spalin a následný pokles výkonu spalovacího motoru. Naopak při umístění katalyzátoru blíže k motoru mají spálené plyny příliš vysokou teplotu pro účinný chod dnešních typů katalyzátorů umístěných za filtrem pevných částic. Vývoj katalyzátorů i filtrů pevných částic by mohl nepřímo kladně ovlivnit oblast získávání energie termoelektrickou cestou. [11]

Nabíjecí zařízení firmy BioLite

Firma BioLite se mimo jiné zabývá výrobou přenosných stanic používající termoelektrický generátor. Na trh dodává Biolite CampStove 2 a Biolite BaseCamp (Obr. 11). V případě BioLite Camp Stove 2 se jedná o cestovní uzavřenou výheň, ve které lze rozdělávat oheň a následně vařit vodu či jídlo. Na boku je připevněn termoelektrický generátor. Zařízení disponuje jedním USB portem a baterií o kapacitě 2600 mAh. Výrobce udává získávaný výkon z termoelektrického generátoru ve výši 3 W. Biolite BaseCamp je v podstatě gril s integrovaným termoelektrickým generátorem. Jako palivo slouží dřevo. Zařízení disponuje opět jedním nabíjecím USB portem a baterií, tentokrát o kapacitě 2200 mAh. Výrobce udává výkon na termoelektrickém generátoru ve výši 5 W. [12]



Obr. 11 Biolite CampStove 2 (vlevo) a Biolite BaseCamp (vpravo) [12]

6 Elektronika pro napájení SHM senzoru

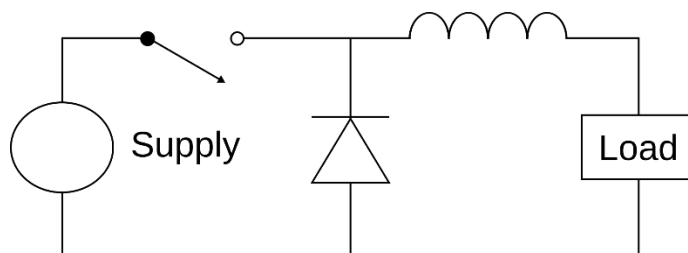
Napětí dodané termoelektrickým generátorem má často jinou hodnotu, než je potřebné pro správný chod řídicí elektroniky. K dosažení požadované hodnoty slouží DC/DC měniče. Jako DC/DC měnič se označuje elektronický měnič napětí určený pro změnu velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu mezi dvěma různými napájecími soustavami. Pro spínání jsou použity tranzistory a diody, jako zásobníky energie při převodu jsou použity cívky a kondenzátory, pro galvanické oddělení jsou použity pulzní transformátory. [13]

Nejčastější aplikace principu DC/DC měniče jsou:

- Snižovač napětí – (angl. step-down nebo také buck-converter)
- Zvyšovač napětí – (angl. step-up nebo také boost-converter)
- Invertor (angl. buck-boost) – umožňuje zvyšování i snižování napětí, obrací polaritu napětí.
- Blokující měnič – (ang. Flyback converter)

6.1 Snižovač napětí

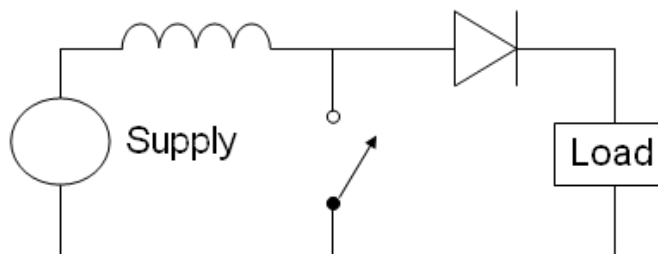
Typické zapojení snižovače napětí, též buck convertoru je na Obr. 12. Výstupní napětí na výstupu je vždy nižší než na vstupu.



Obr. 12 Schéma zapojení buck convertoru [14]

6.2 Zvyšovač napětí

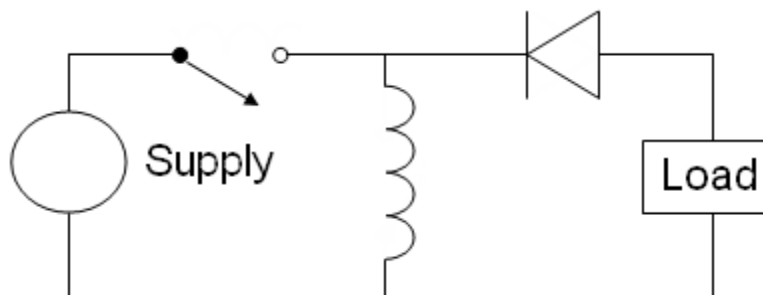
Zapojení je na Obr. 13. Výstupní napětí je vyšší, než vstupní. Jedná se o nejdůležitější prvek pro energy harvesting aplikace založeného na termoelektrickém jevu, kde je vyrobené napětí téměř vždy nižší než požadované pro napájení elektroniky senzoru.



Obr. 13 Schéma zapojení boost convertoru [15]

6.3 Invertor

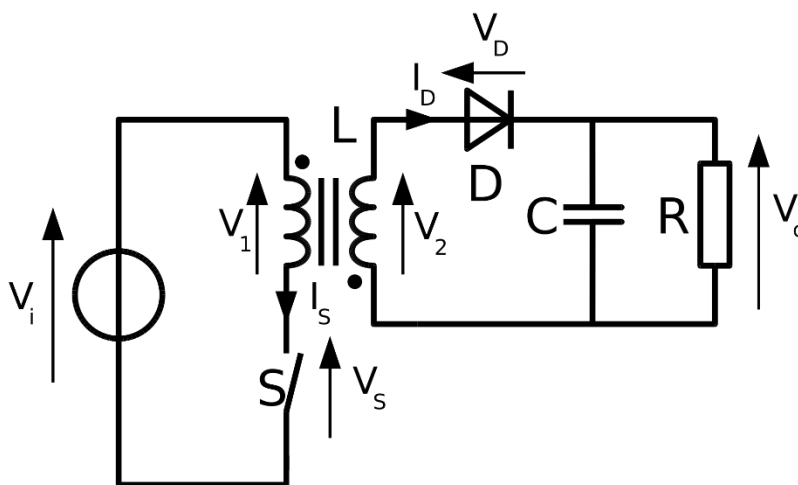
U invertoru, též buck-boost convertoru má výstupní napětí opačnou polaritu než napětí na vstupu. Výstupní napětí je nastavitelné na základě pracovního bodu spínacího tranzistoru. Dokud je spínač na počátku cyklu v sepnutém stavu blokovácí dioda zamezuje proudění proudu do pravé větve obvodu a všechny proud musí projít skrz cívku. Po rozepnutí je proud odebírán zátěží. [18]



Obr. 14 Schéma zapojení buck - boost convertoru [16]

6.4 Blokovácí měnič

Blokovácí měnič je schopen dodat na výstupu nižší i vyšší napětí, než je na vstupu. Vstup a výstup je galvanicky oddělen transformátorem. V sepnutém stavu se energie přenáší ze zdroje vstupního napětí na transformátor a kondenzátor dodává energii výstupní zátěži. V nesepnutém stavu se energie přenáší z transformátoru na výstupní zátěž a kondenzátor. [19]



Obr. 15 Schéma zapojení blokovácího měniče [17]

7 Elektronika pro napájení SHM senzoru

Zadání úlohy:

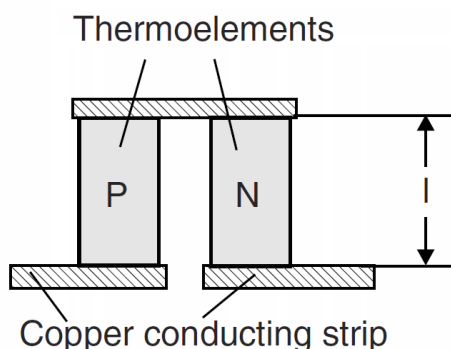
Pro zajištění běhu řídicí elektroniky včetně bezdrátového přenosu informací jednoho senzoru je nutné splnit následující požadavky:

- Vstupní napětí: 5 V
- Spotřeba: 100 mW (odpovídá proudu 20 mA)
- Garance souvislého v průběhu min. 30 min
- Teplotní rozsah v rozmezí: -56 °C až 85 °C

8 Teoretická analýza výkonu

8.1 Teoretický model obsahující ztráty na kontaktech

Základní stavební jednotkou termoelektrického generátoru či chladícího zařízení je termoelektrická dvojice. Ta se skládá z polovodiče typu N a polovodiče typu P zapojených do série za použití tenkých vodivých pásků. Ty jsou obvykle z mědi. Nicméně tato základní dvojice může být použita pro návrh termoelektrického modulu obsahující mnoho termoelektrických dvojic zapojených sériově z hlediska elektrického a paralelně z hlediska teplotního mezi dvěma keramickými deskami. Termoelektrické moduly – články jsou vyráběny ve velké škále rozměrů podle typu aplikace a požadovaného výkonu.



Obr. 16: Nákres termoelektrické dvojice

Termoelektrické moduly převádějí teplo na elektřinu právě tehdy když pracují v Seebeckovu módu. Elektrický výkon závisí na počtu termoelektrických dvojic materiálu, z něhož jsou vyrobeny, tepelných a elektrických vlastnostech kontaktních vrstev a na teplotním rozdílu napříč modulem. Pokud jsou brány v úvahu i kontaktní a elektrické ztráty výstupní napětí U a proud jsou dány vztahy:

$$I = \frac{A\alpha(T_h - T_c)}{2\rho(n+1)(1 + 2rl_c/l)} \quad 8.1$$

- N Počet termoelektrických dvojic,
- α Seebeckův koeficient [V/K],
- ρ Měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$],
- T_h Teplota teplé strany [K],
- T_c Teplota chladné strany [K],
- A Průřez jednoho thermoelementu [m^2],
- l Délka termoelektrického členu [m],
- l_c Tloušťka kontaktní vrstvy.

$$n = \frac{2\rho_c}{\rho} \quad 8.2$$

$$r = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad 8.3$$

Kde:

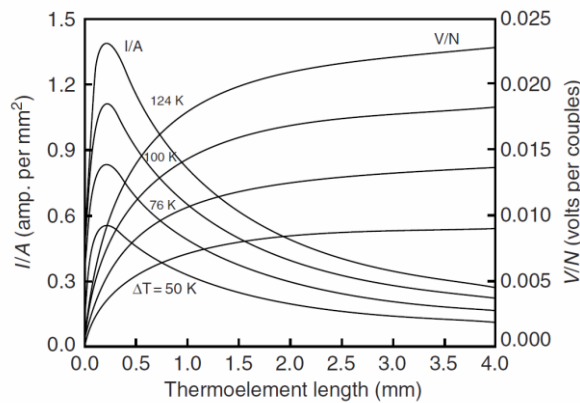
ρ_c Měrný elektrický odpor na kontaktu [$\Omega \cdot m$],

ρ Měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$],

λ Tepelná vodivost termoelektrické dvojice [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

λ_c Kontaktní tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Komerčně používaným peltiérovým článkům odpovídají hodnoty: $n \sim 0,1$ mm a $r \sim 0,2$. Na Obr. 17 jsou znázorněny charakteristiky závislosti proudu na průřezu a napětí pro odpovídající délku l pro různé teplotní rozdíly. [4]



Obr. 17 Závislost proudu na průřezu a napětí na délce l

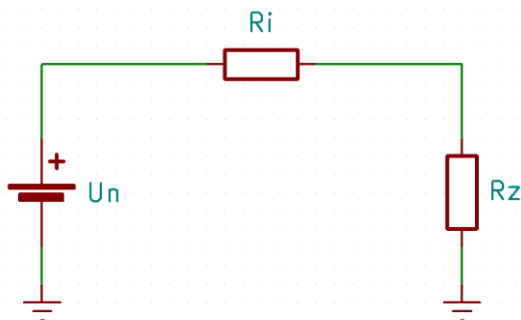
Výstupní výkon P a účinnost termoelektrického modulu η jako termoelektrického generátoru jsou vyjádřeny vztahy:

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho} \frac{AN(T_h - T_c)^2}{(n + 1) \left(1 + \frac{2rl_c}{l}\right)^2} \quad 8.4$$

$$\eta = \frac{(T_h - T_c)/T_h}{\left(1 + \frac{2rl_c}{l}\right)^2 \left(2 - \frac{1}{2} \left(\frac{T_h - T_c}{T_h}\right) + \left(\frac{4}{ZT_h}\right) \left(\frac{l + n}{l + 2rl_c}\right)\right)} \quad 8.5$$

8.2 Zjednodušený model

V případě zjednodušeného modelu neuvažujeme teplotní ztráty na keramice, mezi teplovodivou pastou a v neposlední řadě únik tepla skrz izolaci. Schéma je na Obr. 18.



Obr. 18 Zjednodušený model termoelektrického generátoru

Proud procházející termoelektrickým generátorem je dán vztahem:

$$I = \frac{U_n}{R_c} = \frac{N\alpha(T_h - T_c)}{(R_i + R_z)} \quad 8.6$$

kde:

- I Elektrický proud [A],
- U_n Napětí naprázdno [V],
- R_c Celkový odpor [Ω],
- N Počet termoelektrických dvojic,
- α Seebeckův koeficient [V/K],
- T_h Teplota teplé strany [K],
- T_c Teplota chladné strany [K],
- R_i Vnitřní odpor [Ω],
- R_z Odporová zátěž [Ω].

Napětí na zátěži je dáno vztahem:

$$U_z = U_n \frac{R_z}{(R_i + R_z)} \quad 8.7$$

kde:

- U_z Napětí na zátěži [V],
- U_n Napětí naprázdno [V],
- R_i Vnitřní odpor [Ω],
- R_z Odporová zátěž [Ω].

Získaný výkon na zátěži je dán vztahem:

$$P_z = U_z I$$

8.8

P_z Výkon na zátěži [W],

U_z Napětí na zátěži [V],

I Elektrický proud [A].

V našem případě jsme z důvodu absence vstupních parametrů od výrobce použili pouze zjednodušený model. Vstupní parametry modelu pro peltierův modul TEC12706 [21] jsou v Tab. 2. Data jsou v Tab. 3.

Parametr	Hodnota
Počet termoelektrických dvojic N	127
Seebeckův koeficient α	225 $\mu\text{V/K}$
Teplotní rozdíl [$^{\circ}\text{C}$]	5; 25; 45; 95
Vnitřní odpor R_i [Ω]	2,3
Odpor zátěže R_z [Ω]	8

Tab. 2 Vstupní parametry modelu

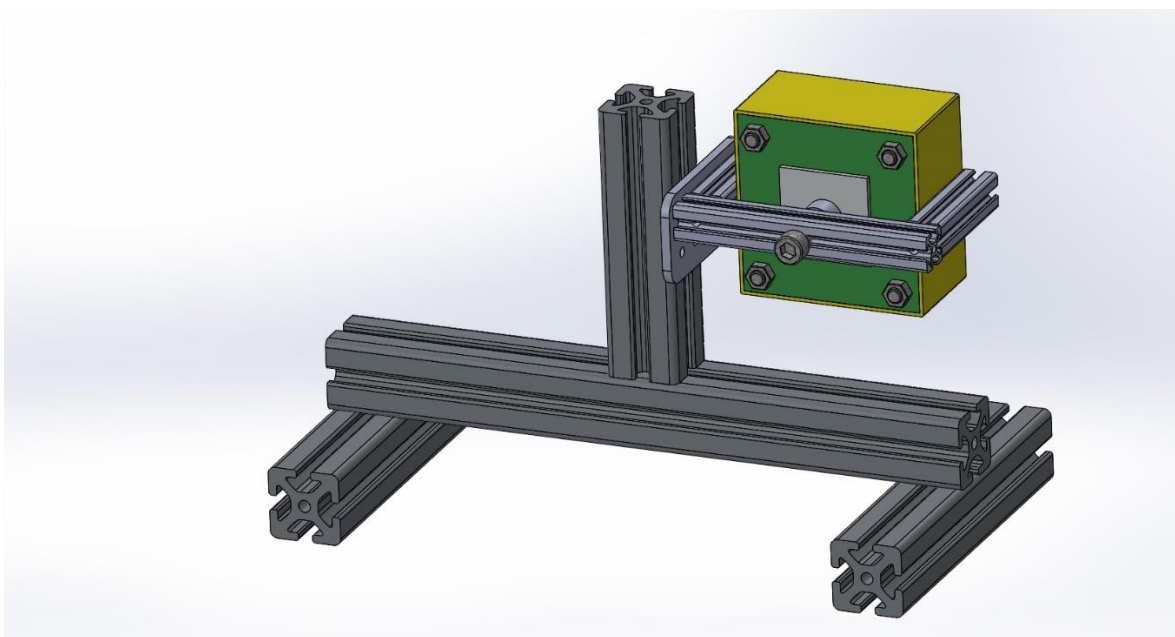
ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	U_n [V]	U_z [V]	I_z [mA]	P_z [mW]
5	0,14	0,11	13,90	1,50
25	0,71	0,55	69,40	38,50
45	1,29	1,00	124,80	124,70
95	2,71	2,11	263,60	555,70

Tab. 3 Hodnoty vypočítané pomocí zjednodušeného modelu

9 Praktická část

9.1 Měřicí sestava

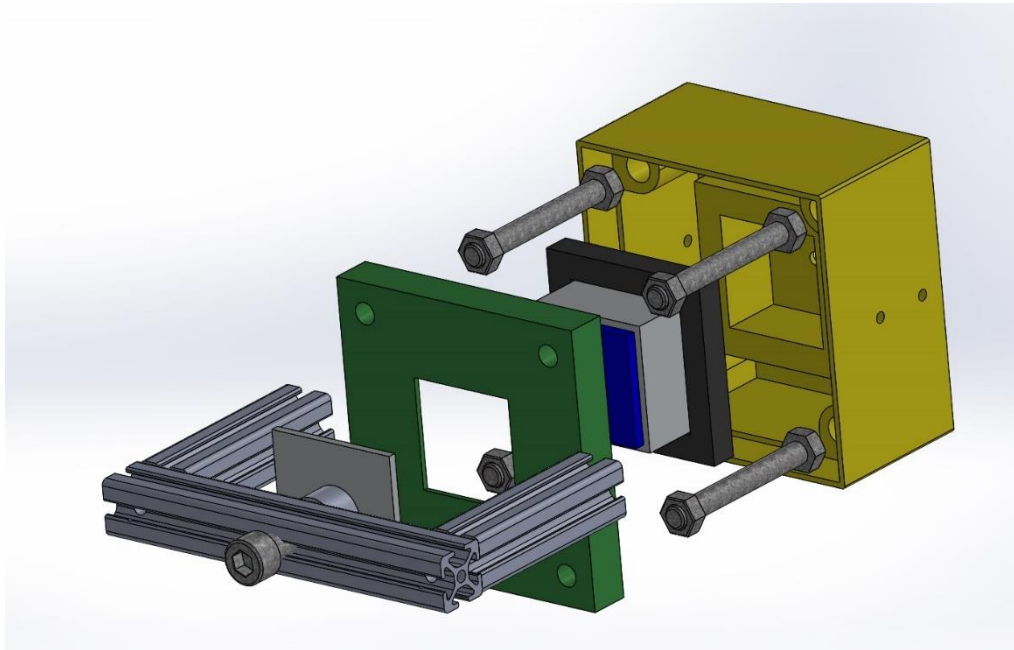
Pro dlouhodobé testy při různém zatížení v klimatické komoře ARS – 0680 byla vyrobena měřicí sestava viz Obr. 19. Skládá se z podstavce sestaveného z profilu ITEM 40 a podsestavy pro měření peltiérových článků. Je vhodná pro měření všech čtvercových a obdélníkových komerčně dostupných peltiérových článků s maximálními rozměry 40 x 40 mm, výška článku je omezena na minimální rozměr 1 mm, což je způsobeno tloušťkou stěny v okolí článku měřicí podsestavy.



Obr. 19 3D model měřicí sestavy

9.2 Rozbor měřicí podsestavy

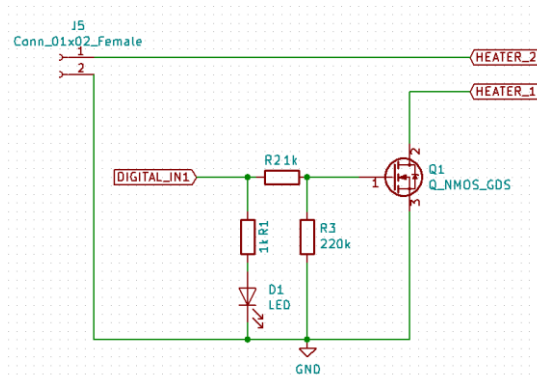
Samotná měřicí podsestava se skládá z dvoudílného obalu vyrobeného technologií 3D tisku. Dosedací plochy jsou potřeny silikonovým tmelem. Je spojena čtyřmi šrouby M8 zajišťujícími pevné sevření a brání tak úniku tepla do okolí. Uvnitř je hliníkový hranol o rozměrech 45 x 45 x 25 mm obsahující 4 ks běžně dostupných topných těles, každé o výkonu 40 W. Ve středu je termistor PT1000 ve válcovém provedení o průměru 2 mm. Tepelná vodivost je v případě topných těles i termistoru zajištěna teplovodivou pastou. Zbytek obalového prostoru je vyplněn pěnovou izolací. Chlazení peltiérového článku zajišťuje kapalinové chlazení v chladiči o rozměrech 41 x 41 x 10 mm běžně dostupného v internetovém obchodě Aliexpress. Přítlak chladiče je tvořen pomocí šroubu M8. Celá podsestava je pomocí profilu ITEM 20 a spojovacího dílu vyrobeného technologií 3D tisku upevněna k podstavci. Mezi ostatní ale nezbytné prvky měřicí sestavy patří: Čerpadlo o průtoku 80 l/min, silikonové hadice pro vedení chladicího média a ventilátor pro dostatečné proudění vzduchu v klimatické komoře. Jako chladicí médium byly použity 3 litry ethanolu.



Obr. 20 Rozložený model měřící podsestavy

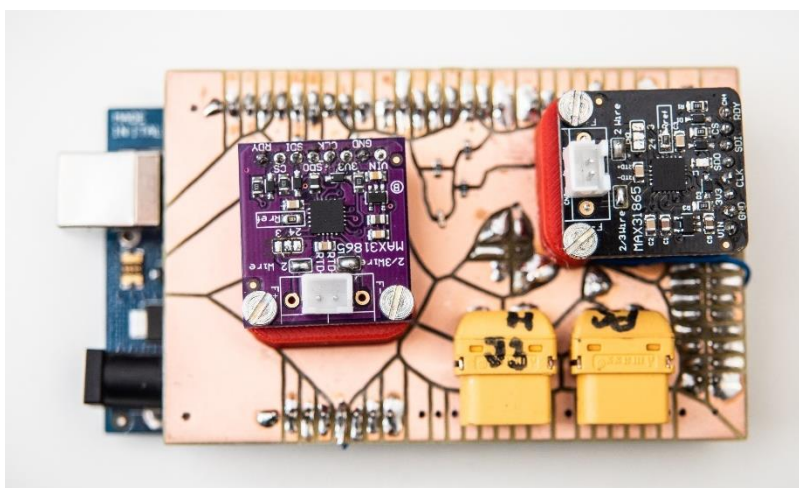
9.3 Elektronika pro vyhřívání

Elektronický systém k správnému udržování požadované teploty na teplejší straně se skládá z řídicí elektroniky, konkrétně z malého počítače Arduino Mega2560 s 256 kibibajty flashové paměti. Disponuje 54 digitálními piny a 16 analogovými vstupy. Na něj ne nasazena nastavbová deska – shield vytvořena ve volně šiřitelném programu Kicad. Schéma zapojení je na Obr. 21.

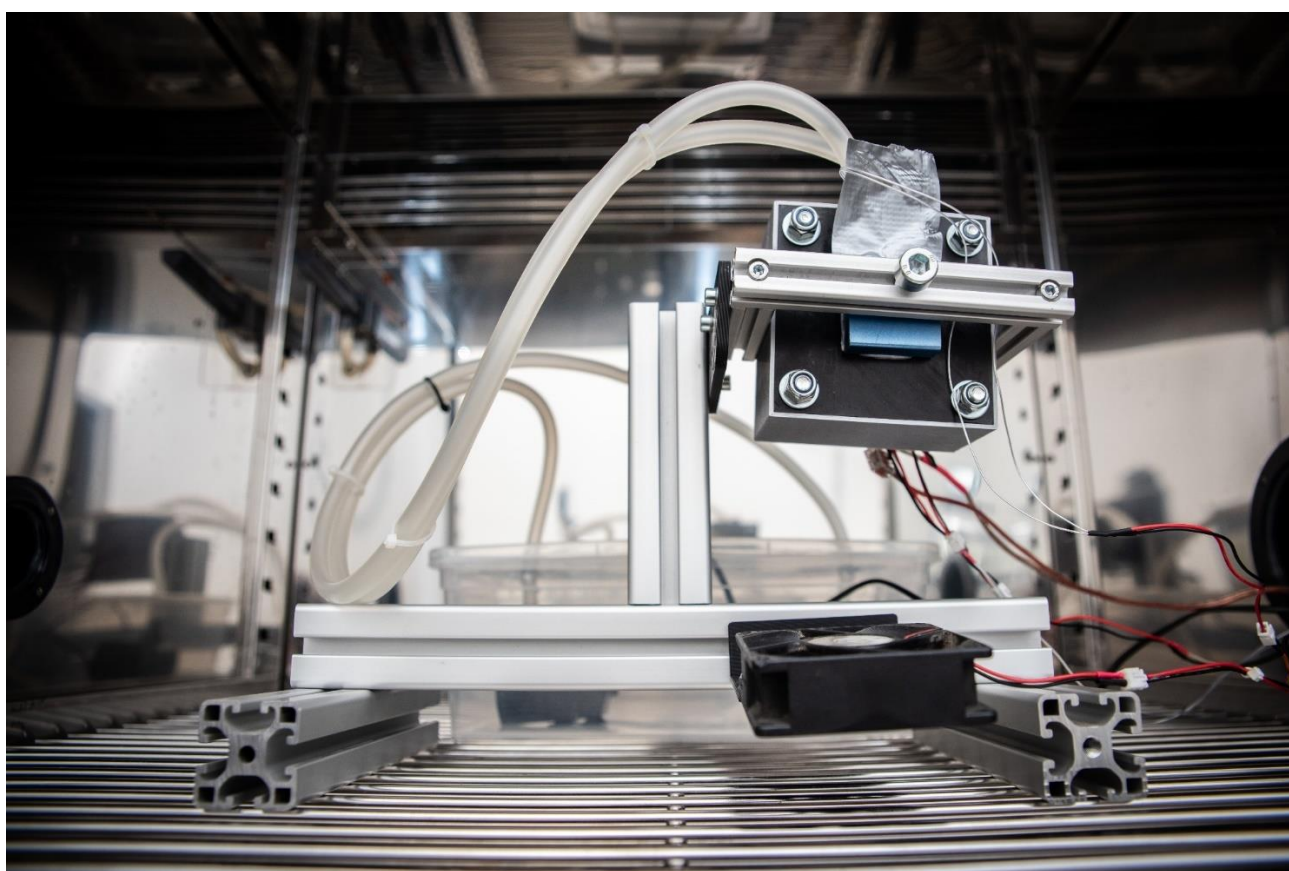


Obr. 21 Schéma zapojení shieldu pro udržování teplotního rozdílu

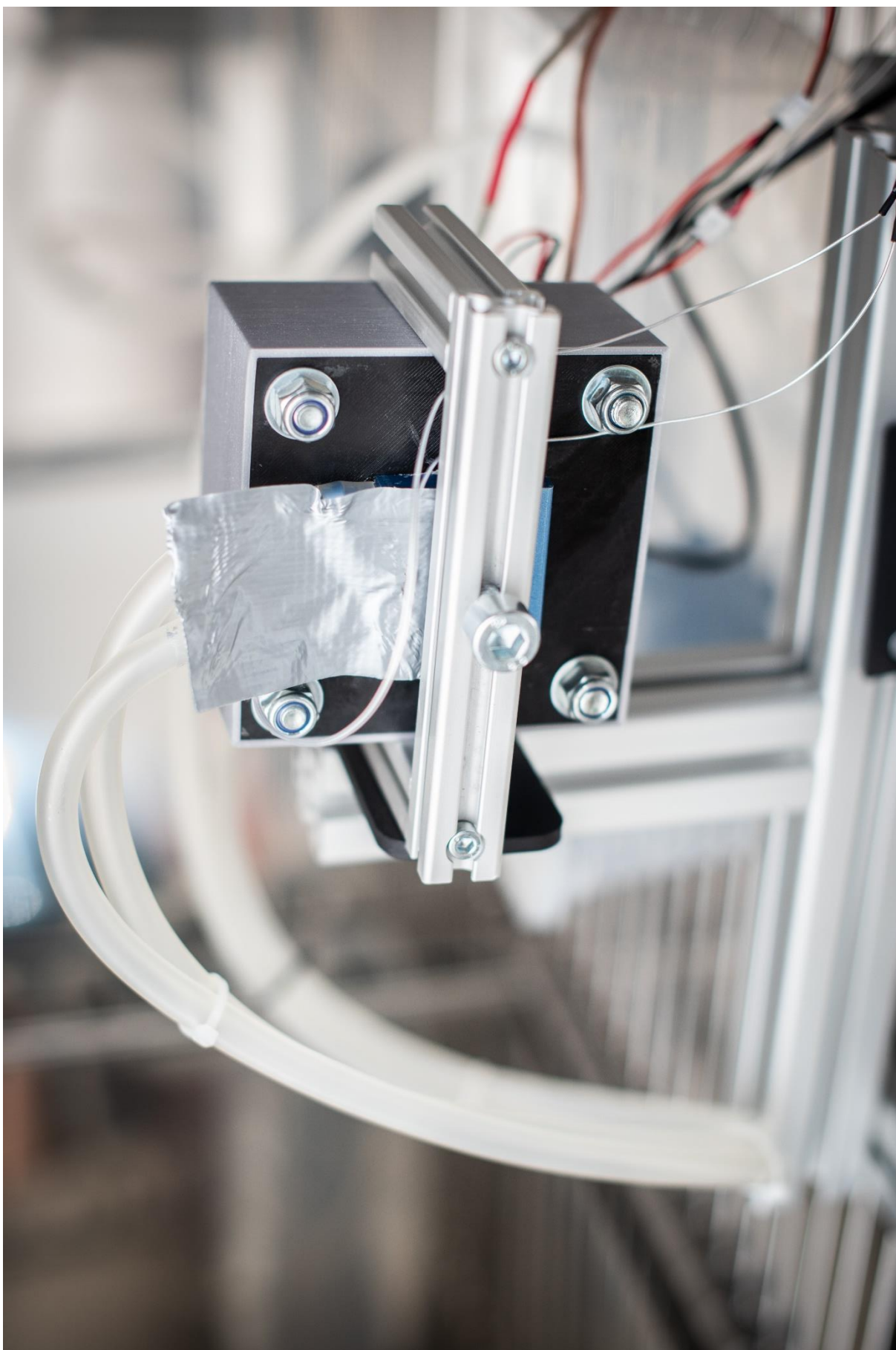
K udržování námi zvolené teploty je použit PID regulátor. Je využívána knihovna dostupná z [20]. Pro spínání byl použit transistor řízený elektrickým polem, konkrétně IRFZ44N. Zda je transistor v sepnutém nebo rozepnutém stavu signalizuje žlutá LED dioda. Zdroj a topná tělesa se připojují konektory XT60. Ve finále je deska osazen dvojicí shieldů MAX31865 pro digitální čtení teploty. Termistory se připojují přes JST – XH2 konektory. Deska Aduino Mega2560 spolu s nastavbou je na Obr. 22.



Obr. 22 Deska Arduino Mega2560 s nasazenými shieldy



Obr. 23 Celkový pohled na měřící sestavu



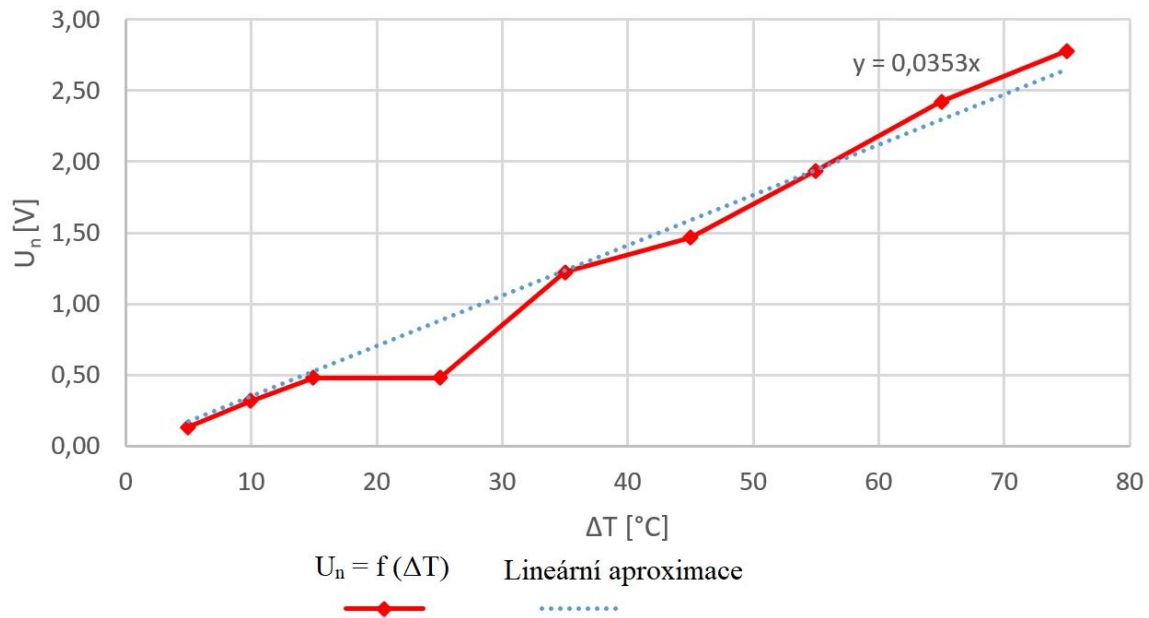
Obr. 24 Detail měřící podsestavy

9.4 Měření naprázdno

Při měření v nezatíženém stavu, tedy na prázdno jsme měřili při stálé teplotě -15 °C na studené straně a teplotního rozdílu bylo dosaženo postupným zvyšováním teploty na teplejší straně. Naměřená data jsou v Tab. 4 a z grafu na Obr. 25 je patrná lineární závislost napětí na teplotě.

$T_h\text{ [°C]}$	$T_c\text{ [°C]}$	ΔT	$U_n\text{ [V]}$
-10	-15	5	0,14
-5	-15	10	0,32
0	-15	15	0,48
10	-15	25	0,48
20	-15	35	1,22
30	-15	45	1,46
40	-15	55	1,94
50	-15	65	2,42
60	-15	75	2,78

Tab. 4 Naměřená data při měření naprázdno



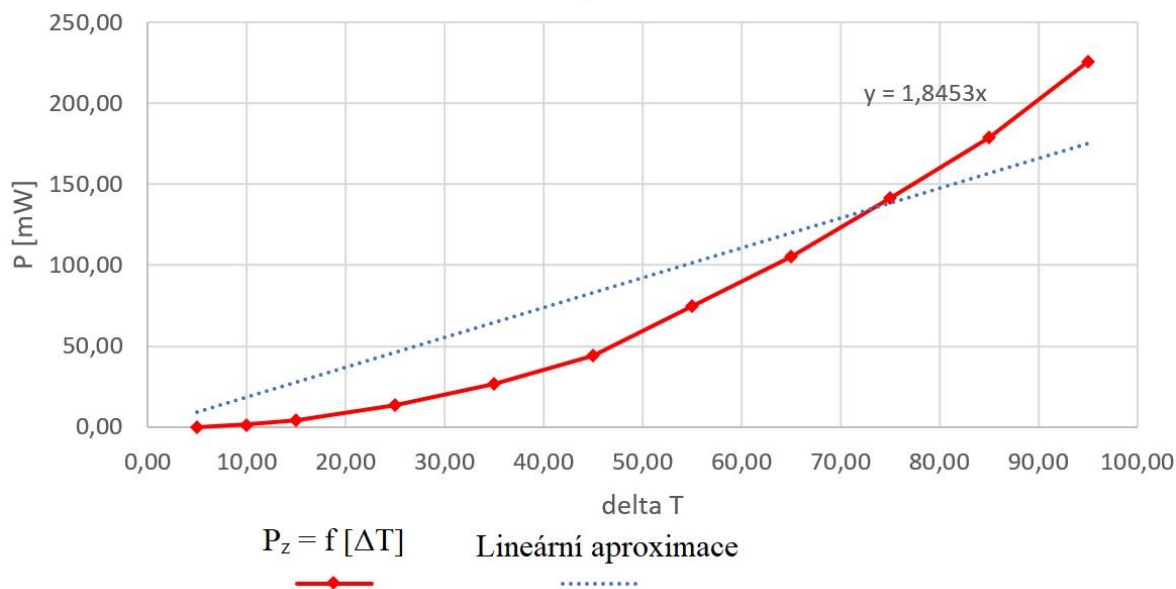
Obr. 25 Závislost U_n na ΔT

9.5 Měření při zatížení

V této části jsme měřili při stálé teplotě -30 °C na studené straně a teplotního rozdílu bylo dosaženo postupným zvyšováním teploty na teplejší straně. Termoelektrický generátor byl zatížen rezistorem o velikosti $8\ \Omega$ a následně měřili parametry U_z , I_z a P_l . Naměřená data jsou v Tab. 5. Závislost výkonu na teplotním rozdílu je v grafu na Obr. 26.

T_h [°C]	T_c [°C]	ΔT	P_z [mW]	I_z [mA]	U_z [V]
-25,00	-30,00	5,00	0,24	5,52	0,04
-20,00	-30,00	10,00	1,50	13,82	0,11
-15,00	-30,00	15,00	4,24	22,75	0,19
-5,00	-30,00	25,00	13,39	41,20	0,33
5,00	-30,00	35,00	26,69	58,40	0,46
15,00	-30,00	45,00	44,40	75,00	0,59
25,00	-30,00	55,00	74,53	97,30	0,77
35,00	-30,00	65,00	105,15	115,80	0,91
45,00	-30,00	75,00	141,46	133,20	1,06
55,00	-30,00	85,00	188,18	154,50	1,22
65,00	-30,00	95,00	250,94	183,30	1,37

Tab. 5 Naměřená data při zatížení



Obr. 26 Závislost P_z na ΔT

9.6 Další komponenty použité pro měření

9.6.1 Thermocouple M0503

K udržení teploty ethanolu nejprve na -15 °C a později na -30 °C byl ponořen termočlánek a při zvýšení teploty lihu se snížila teplota v komoře do doby než teplota klesla na požadovanou hodnotu.

9.6.2 Zdroj pro ohřívání teplé strany

K ohřevu na teplé straně peltiérová články byl použit zdroj od firmy DELTA ELECTRONIC s maximálním výkonem 2 kW. Při jmenovitých 12,2 V na výstupu je tak schopen dodat do obvodu maximální proud 164 A. Pro náš případ je zdroj zbytečně silný ale byl mi k dispozici po celou dobu testování. Tímto děkuji hackerspace komunitě kolem občanského sdružení #base48 za zapůjčení.

10 Programy použité k návrhu a simulaci

10.1 KiCad

KiCad je bezplatná softwarová sada pro návrh elektronických obvodů a jejich konverzi na návrh desky plošných spojů (DPS). Zároveň je vybaven integrovaným prostředím pro návrh vlastních symbolů i pole nutného pro správné rozmístění součástek na desce. [22] KiCad se skládá z pěti hlavních částí:

- KiCad – uživatelské rozhraní pro práci s projektem
- Eeschema – editor pro tvorbu schématu
- Pcbnew – program pro rozvržení součástek na DPS obsahující také 3D zobrazení desky
- GerbView – prohlížeč pro náhled na finální návrh DPS
- Bitmap2Component – nástroj pro převod obrázků součástek na pole zabírající na DPS

10.2 Scilab

Scilab je volně šiřitelný program pro numerické výpočty a nejvíce se podobá komerčnímu programu Matlab. Umožňuje práci s maticemi, vykreslování grafů, vytváření skriptů, zpracování experimentálních dat a simulace fyzikálních jevů. Pro simulace slouží integrované prostředí Xcos, které není nepodobné Simulinku od Mathworks. Zatímco u Scilabu je stále nejdůležitější příkazový řádek, ovládání prostředí Xcos je intuitivnější.

Pro účely této práce je využita verze Scilab 5.1.0, pomocí ní budou zpracovávány výsledky simulací a prezentována data.

10.3 Solidworks

Solidworks je strojírenský 3D CAD nabízející výkonné objemové i plošné modelování, vertikální nástroje pro plechové díly, svařence a formy, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

Předností SOLIDWORKS je v prvé řadě snadné a vizuálně přehledné ovládání. Uživatelské rozhraní SOLIDWORKS je intuitivní, snižuje nutné pohyby myši a umožňuje kontextově závislou interakci s uživatelem. [23]

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prozkoumat existující řešení v oblasti termoelektrických generátorů, vytvořit model takového generátoru a následně analyzovat jeho výkon. Prozkoumání oboru termoelektrických generátorů ukázalo, že taková řešení existují a že s vývojem úsporné elektroniky nacházejí své uplatnění. Výhoda těchto zařízení spočívá především v absenci jakýchkoli pohyblivých částí. Pokročilá analýza výkonu nemohla být pro námi zvolený peltierův článek provedena z toho důvodu, že výrobce neudává potřebné vstupní parametry. Rozdíl mezi teoretickými hodnotami zjednodušeného modelu a prakticky změřenými hodnotami je způsoben tím, že námi zvolený peltierův článek je určen hlavně jako chladicí prvek. Nicméně pokročilá aparatura pro analýzu termoelektrických článků je ideálním nástrojem pro široké spektrum termoelektrických článků na dnešním trhu. Sestrojení měřicí aparatury vyžadovalo značnou trpělivost. Nejprve bylo potřeba vytvořit celý projekt v prostředí Solidworks a následně technologií 3D tisku dostat do fyzické podoby. Bylo potřeba obrobit hliník pro vyhřívání teplé strany peltierova článku. Po odzkoušení celé aparatury s elektronikou na nepájivém kontaktním poli bylo z důvodu vysokých proudů nutné vyrobít desku plošných spojů. LED dioda k indikaci, zda je tranzistor sepnutý mi ušetřila spoustu času při hledání chyb v kódu. Většina jednotlivých kroků mě bavila a byla to pro mě ideální možnost vyzkoušet si spojení hardware a software tím nejzajímavějším způsobem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RŮŽIČKA, Milan. Metody a prostředky mechaniky při zvyšování pevnosti, životnosti a spolehlivosti lehkých strojních konstrukcí: Methods and tools of mechanics used for the strength, fatigue life and reliability improvement of light-weight mechanical structures. V Praze: České vysoké učení technické, 2005. ISBN isbn80-01-03227-2.
- [2] STOJMENOVIC, Ivan. Handbook of sensor networks: algorithms and architectures. Hoboken, NJ: Wiley, 2005. ISBN 9780471684725.
- [3] GOLAB, F. – KAMENČÁK, F.: Termoelektrické jevy a jejich užití. SPNKL, Praha, 1975, ISBN 14-655-75.
- [4] ROWE, David Michael. CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton, FL: CRC Press, c1995. ISBN isbn0849301467.
- [5] [online]. [cit. 2019-04-2]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material
- [6] [online]. [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6627259/citations?tabFilter=papers#citations>
- [7] [online]. [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pmma.htm>
- [8] [online]. [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: https://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm
- [9] [online]. [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/43178/10/Autonomous_WSN_Accepted_Version.pdf
- [10] [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785315001832>
- [11] [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235407572_Thin_Films_for_Thermoelectric_Applications
- [12] [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://uk.bioliteenergy.com/products/campstove-2>
- [13] [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/DC-DC_m%C4%9Bni%C4%8D
- [14] [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter#/media/File:Buck_circuit_diagram.svg
- [15] [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter#/media/File:Boost_circuit_2.png
- [16] [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Buck_boost.png
- [17] [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_converter#/media/File:Flyback_conventions.svg
- [18] [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter
- [19] [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_converter
- [20] [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>

[21][online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227422/ETC2/TEC1-12706.html>

[22][online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/KiCad>

[23][online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

IoT	Internet of Things
ΔU	Napětí
Q_p	Peltiérové teplo
Q_T	Thomsonovo teplo
TEC	Termoelektrické chladičové zařízení
U_s	Seebeckovo napětí
α_{AB}	Relativní Seebeckův koeficient
dU_{AB}	Relativní Seebeckovo napětí
dT	Teplotní změna
α_A	Seebeckův koeficient materiálu A
α_B	Seebeckův koeficient materiálu B
π_{AB}	Peltiérův koeficient
Q	Teplo na přechodu
I	Elektrický proud
T	Teplota
PCM	Materiál uvolňující či pohlcující určité množství tepla při změně skupenství
PMMA	polymethylmethakrylát
T_h	Teplota teplé strany
T_c	Teplota chladné strany
l	Délka termoelektrického členu
l_c	Tloušťka kontaktní vrstvy
ρ_c	Měrný elektrický odpor na kontaktu
ρ	Měrný elektrický odpor
λ	Tepelná vodivost termoelektrické dvojice
λ_c	Kontaktní tepelná vodivost
P	Výkon
U_n	Napětí naprázdno
R_c	Celkový odpor
N	Počet termoelektrických dvojic

R_i	Vnitřní odpor
R_z	Odporová zátěž
P_z	Výkon na zátěži
U_z	Napětí na zátěži

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Diagram sledování životnosti aplikovaný na vojenském letounu

Obr. 2 Princip Seebeckova jevu

Obr. 3 Princip Peltierova jevu

Obr. 4 Průřez přístroje upevněného na vnitřní stranu trupu

Obr. 5 Průřez 3D modelu přístroje

Obr. 6 Průřez 3D modelu přístroje

Obr. 7 Celkové řešení (vlevo) a DPS řídicí elektroniky (vpravo)

Obr. 8 Blokový diagram sestávající se z 3 ks TEM a řídicí elektroniky

Obr. 9 Termoelektrický generátor upevněný na PBS TS100

Obr. 10 Umístění termogenerátoru v automobilu BMW řady 5

Obr. 11 Biolite CampStove 2 (vlevo) a Biolite BaseCamp (vpravo)

Obr. 12 Schéma zapojení buck convertoru

Obr. 13 Schéma zapojení boost convertoru

Obr. 14 Schéma zapojení buck - boost convertoru

Obr. 15 Schéma zapojení blokujícího měniče

Obr. 16: Nákres termoelektrické dvojice

Obr. 17 Závislost proudu na průřezu a napětí na délce l

Obr. 18 Zjednodušený model termoelektrického generátoru

Obr. 19 3D model měřicí sestavy

Obr. 20 Rozložený model měřicí podsestavy

Obr. 21 Schéma zapojení shieldu pro udržování teplotního rozdílu

Obr. 22 Deska Arduino Mega2560 s nasazenými shieldy

Obr. 23 Celkový pohled na měřicí sestavu

Obr. 24 Detail měřicí podsestavy

Obr. 25 Závislost U_n na ΔT

Obr. 26 Závislost P_z na ΔT

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti použitých materiálů uvnitř nádob

Tab. 2 Vstupní parametry modelu

Tab. 3 Hodnoty vypočítané pomocí zjednodušeného modelu

Tab. 4 Naměřená data při měření naprázdno

Tab. 5 Naměřená data při zatížení

SEZNAM PŘÍLOH

1. teg model.sce
2. heating.ino
3. heating_electrical.rar