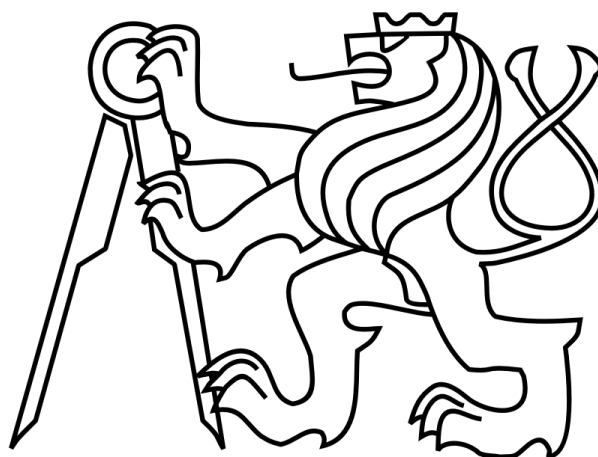


**České vysoké učení technické v Praze**  
**fakulta elektrotechnická**  
**katedra mikroelektroniky**



**Diplomová práce**

**Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem**

**Emergency powering device with thermoelectric generator**

**Autor:** Bc. Jiří Mach

**Vedoucí práce:** Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

**2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. M A C H Jiří**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Elektronika

Název tématu: **Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem**

### ***Pokyny pro vypracování:***

1. Seznamte se s problematikou termoelektrických generátorů. Prostudujte možnosti využití dostupných součástek (Peltierovy články, ... ) pro účely nouzového napájení drobných elektronických zařízení. Seznamte se s problematikou napájecích zdrojů a obvodů pro nabíjení akumulátorů.
2. Na základě získaných poznatků zvolte vhodné technické řešení a realizujte zařízení pro nabíjení mobilního telefonu (elektroniky, světelných zdrojů, a pod.).
3. Sestavte testovací pracoviště, proveďte měření a kriticky zhodnoťte dosažené parametry vašeho řešení. Na základě výsledků testování případně navrhnete další možná vylepšení.

### ***Seznam odborné literatury:***

- [1] HUSÁK, M.: Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým principem, DPS – Elektronika od A do Z, 2014, vol.2, p. 4.-11., ISSN: 1805-5044
- [2] KREJČÍŘÍK, A.: Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů. 1. vyd. Praha: BEN, 1996, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [3] GROMOV, G.: Thermoelectric Cooling Modules. In: [online]. GLOBAL PHOTONICS APPLICATIONS & TECHNOLOGY [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: [http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric\\_Cooling\\_Modules.pdf](http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf)
- [4] MIKYŠKA, L.: Termoelektrické články. Praha: SNTL, 1964, 152 s.
- [5] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004, ISBN 80-01-02966-2

Vedoucí: **Ing. Adam Bouřa, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2016

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 4. 2. 2015

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, věnovaný čas a cenné odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

Datum: 11. 5. 2015

Jiří Mach

## **Anotace**

Předložená práce se věnuje problematice přímé přeměny tepelné energie na elektrickou energii pomocí termoelektrického generátoru. Cíl práce je uvést nezbytné teoretické základy a na jejich základě navrhnout a zkonstruovat prototyp zařízení využívající termoelektrický generátor k napájení či nabíjení dnešních moderních elektronických zařízení prostřednictvím USB rozhraní. V první části práce jsou popsány potřebné teoretické informace. Jde především o popis termoelektrického jevu, termoelektrického generátoru a spínaného zdroje. Následuje podrobný popis návrhu napájecího zařízení, jeho funkce, konstrukce, elektronické vybavy a ovládání. Na konci práce je vyhodnocení dosažených výsledků se souhrnem klíčových vlastností a diskusí nad možnými úpravami.

**Klíčová slova:** termoelektrický jev, Seebeckův jev, termoelektrický generátor, Peltierův článek

## **Abstract**

The submitted thesis deals with the direct conversion of thermal energy to electric energy using thermoelectric generator. The main goal of this thesis is to provide necessary theoretical basis and depended on them to design and build working prototype of powering station using thermoelectric generator to power or charge today's modern electronic devices by USB interface. The first part of this thesis describes necessary theoretical basics. It's primarily about thermoelectric effect, thermoelectric generator and also about switching power supplies. Then there is a part with description of design of powering device, with information about its functionality, construction, electronics and user instructions. At the end there is an evaluation of achieved results with list of key features and some suggestions and possibilities to improve designed device.

**Keywords:** thermoelectric effect, Seebeck effect, thermoelectric generator, Peltier module

# Obsah

Zadání .....	2
Anotace .....	5
Seznam obrázků .....	9
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	11
1. Úvod .....	12
2. Historické a současné použití termoelektrických generátorů .....	14
2.1 Nabíjecí zařízení firmy BioLite .....	15
3. Teoretický rozbor .....	17
3.1 Peltierův modul .....	17
3.1.1 Seebeckův jev .....	17
3.1.2 Konstrukce Peltierova modulu .....	18
3.1.3 Rozdělení modulů .....	20
3.1.4 Náhradní elektrické zapojení .....	20
3.2 Spínané zdroje .....	22
3.2.1 Zapojení BUCK-BOOST .....	23
3.2.2 Zapojení BUCK .....	24
3.2.3 Zapojení BOOST .....	25
3.2.4 Výhody spínaných zdrojů .....	25
4. Zvolená metodika řešení .....	26
5. Měření Peltierových modulů .....	27
5.1 Cíl měření .....	27
5.2 Měřené moduly .....	28
5.3 Průběh měření .....	28
5.4 Vyhodnocení měření .....	31
5.4.1 Porovnání výsledků .....	34
6. Mechanická konstrukce napájecího zařízení .....	37
6.1 Požadavky na konstrukci .....	37
6.2 Konstrukce teplé strany .....	37
6.3 Chlazení .....	38
6.3.1 Pasivní chlazení .....	39

6.3.2	Vodní chlazení .....	39
6.3.3	Aktivní chlazení.....	40
6.4	Vyhodnocení a výběr konstrukce .....	41
7.	Návrh elektroniky .....	42
7.1	Návrh funkce a blokový popis zařízení .....	42
7.2	Výběr komponent .....	43
7.2.1	Termoelektrický generátor.....	43
7.2.2	Primární DC/DC step-up měnič .....	43
7.2.3	Sekundární DC/DC step-up měnič .....	45
7.2.4	Mikrokontrolér .....	45
7.2.5	Indikační prvky.....	45
7.2.6	Akumulátor .....	46
7.3	Popis jednotlivých komponent a obvodů včetně jejich zapojení .....	46
7.3.1	Obvod LTC3105 .....	46
7.3.2	Obvod LM2623 .....	48
7.3.3	Mikrokontrolér PIC16LF1559.....	49
7.3.4	LCD displej Nokia 5110.....	50
7.3.5	Měření teploty – termistory KTY84-130 a proudové zdroje LM334.....	50
7.3.6	NiMH akumulátor .....	52
7.3.7	USB výstupy.....	53
7.4	Celkové obvodové řešení.....	55
8.	Popis funkce zařízení.....	58
8.1	Podrobný popis funkce .....	58
8.2	Programové řešení .....	60
9.	Měření na zařízení .....	63
9.1	Měření na LM2623 .....	63
9.2	Měření na LTC3105.....	63
9.3	Měření celkové účinnosti zařízení .....	64
10.	Vyhodnocení dosažených výsledků .....	66
10.1	Shrnutí hlavních vlastností .....	66
10.2	Diskuse jednotlivých částí a návrhy na zlepšení .....	66

10.3 Cenová kalkulace.....	69
11. Závěr.....	70
Použitá literatura.....	71
Přílohy .....	I
Příloha I – Výsledky měření Peltierových modulů.....	I
Příloha II – Modul s LM2623 – výrobní data.....	X
Příloha III – Modul s LTC3105 – výrobní data .....	XI
Příloha IV – Celkové schéma zapojení a výrobní data.....	XIII
Příloha V – Fotografie zařízení.....	XVI
Seznam příloh na CD.....	XVIII



## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Výroba elektrické energie termoelektrickým generátorem využíváním teploty výfukového systému automobilu [převzato z 3].....	15
Obr. 2.2: Digitální hodinky napájené tělesným teplem [5].....	15
Obr. 2.3: BioLite CampStove (vlevo) a BioLite KettleCharge [převzato z 6] .....	16
Obr. 3.1: Seebeckův jev – princip .....	17
Obr. 3.2: Jeden element Peltierova modulu s rozložením teploty (režim chlazení) [9, s. 2]	19
Obr. 3.3: Detail Peltierova modulu [9, s. 2].....	19
Obr. 3.4: Peltierův modul jako trojbran [10, s. 1 020].....	20
Obr. 3.5: Náhradní elektrické zapojení Peltierova modulu [10, s. 1 021] .....	21
Obr. 3.6: Principiální schéma spínaného zdroje (převzato z [11, s. 60]).....	23
Obr. 3.7: DC/DC měnič v zapojení BUCK-BOOST .....	23
Obr. 3.8: DC/DC měnič v zapojení BUCK .....	24
Obr. 3.9: DC/DC měnič v zapojení BOOST .....	25
Obr. 5.1: Náhradní schéma zapojení elektrické části Peltierova modulu .....	27
Obr. 5.2: Chladič teplé strany s termistorem .....	29
Obr. 5.3: Chladič studené strany s termistorem.....	29
Obr. 5.4: Pokusné měření .....	30
Obr. 5.5: Měřicí pracoviště .....	30
Obr. 5.6: TEC1-12705HT – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot.....	31
Obr. 5.7: TEC1-12705HT – Závislost výkonu na rozdílu teplot .....	32
Obr. 5.8: TEC1-12705HT – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot ....	32
Obr. 5.9: Doba zchladnutí modulů za shodných podmínek.....	33
Obr. 5.10: Porovnání výkonů – vypočítané průběhy pro ideální zátěž.....	34
Obr. 5.11: Srovnání měřených TEC modulů (vlevo) s TEG10W [16] pro ideální zátěž.....	35
Obr. 6.1: Testované konstrukce teplé strany zařízení .....	37
Obr. 6.2: Zdroje tepla používané při testování – iluminační svíčka (vlevo) a malý lihový kahan.....	38
Obr. 6.3: Test pasivního chlazení.....	39
Obr. 6.4: Návrh a reálná konstrukce vodního chlazení.....	40
Obr. 6.5: Návrh a reálná konstrukce s aktivním chlazením.....	41

Obr. 7.1: Blokové schéma zařízení.....	42
Obr. 7.2: Schéma zapojení obvodu LTC3105.....	48
Obr. 7.3: Schéma zapojení obvodu LM2623.....	49
Obr. 7.4: Připojení LCD displeje k mikrokontroléru.....	50
Obr. 7.5: Teplotní závislost odporu termistoru KTY84 pro různé napájecí proudy [20] .....	51
Obr. 7.6: Teplotně nezávislý zdroj proudu s proudovým regulátorem LM334 [21, s. 7] .....	51
Obr. 7.7: Závislost stavu nabití NiMH článku na napětí naprázdno, vybíjecí cyklus [22]...	53
Obr. 7.8: Zapojení USB portu USB_2.....	55
Obr. 7.9: Vyrobena a osazená deska plošného spoje + popis hlavních částí (bez LCD) .....	56
Obr. 7.10: Vyrobena a osazená deska plošného spoje .....	56
Obr. 8.1: Náhledy rozložení displeje .....	59
Obr. 8.2: Fotografie celého zařízení .....	59

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$q_1$	(W)	tepelný tok na teplé straně Peltierova modulu
$q_2$	(W)	tepelný tok na studené straně Peltierova modulu
$Q_1$	(J)	teplo na teplé straně Peltierova modulu
$Q_2$	(J)	teplo na studené Peltierova modulu
$R_i$	( $\Omega$ )	vnitřní odpor Peltierova modulu
$R_z$	( $\Omega$ )	zatěžovací odpor
$T_1$	( $^{\circ}\text{C}$ )	teplota teplé strany Peltierova modulu
$T_2$	( $^{\circ}\text{C}$ )	teplota studené strany Peltierova modulu
$\Delta T$	( $^{\circ}\text{C}$ )	rozdíl teplot na deskách Peltierova modulu
$U_a$	(V)	Seebeckovo napětí
$U_0$	(V)	vnitřní napětí Peltierova modulu
$\alpha_{12}$	( $\text{VK}^{-1}$ )	Seebeckův koeficient
$\eta$	(-)	účinnost

A/D .....	Analog to Digital .....	Analogově digitální
D/A .....	Digital to Analog .....	Digitálně analogový
DCP .....	Dedicated Charging Port .....	Dedikovaný nabíjecí port
EEG .....	Electroencephalogram .....	Elektroencefalogram
FB .....	Feedback.....	Zpětná vazba
LDO.....	Low Dropout Regulator.....	Regulátor napětí s malým úbytkem
LCD .....	Liquid Crystal Display .....	Displej z tekutých krystalů
LED .....	Light Emitting Diode .....	Světlo-emitující dioda
MCU.....	Microcontroller Unit.....	Mikrokontrolér
MPPC .....	Maximum Power Point Control .....	Hlídání bodu max. výkonu
NiMH.....	Nickel-metal hydride .....	Nikl-metal hydrid
PTC.....	Positive Temperature Coefficient .....	Pozitivní teplotní koeficient
PWM.....	Pulse Wide Modulation .....	Pulsní šířková modulace
SHDN .....	User Shutdown .....	Vypínání obvodu (LTC3105)
TEC.....	Thermoelectric Cooler.....	Termoelektrický chladič
TEG .....	Thermoelectric Generator.....	Termoelektrický generátor
USB .....	Universal Serial Bus.....	Univerzální sériová sběrnice
XLP .....	eXtreme Low Power.....	Extrémně nízký příkon

# 1. Úvod

Cíl práce je prozkoumat možnosti využití tepelné energie k napájení dnešních moderních USB zařízení (např. MP3 přehrávače, mobilní telefony, turistické navigace) a na základě teoretických poznatků navrhnout a sestavit funkční prototyp napájecího zařízení využívající termoelektrický generátor.

Funkce prototypu by měla být následující: Po vytvoření teplotního rozdílu na Peltierově modulu začne modul generovat napětí. Teplotního rozdílu se dosáhne plamenem (např. svíčka, lihový hořák) na jedné straně modulu a vhodným chlazením na druhé straně modulu. Vzniklé napětí se pomocí zvyšujícího DC/DC měniče převede na zvolenou hodnotu a následně se jím bude nabíjet buď přímo externí zařízení (USB výstup), nebo vestavěný akumulátor. Mikrokontrolér bude sloužit k aktivní kontrole teplot na obou stranách modulu a jejich případné regulaci, kontrole nabíjení, indikaci stavu celého zařízení, přepínání vstupů/výstupů.

Základní komponenty zařízení budou:

- termoelektrický generátor (Peltierův modul)
- step-up DC/DC měnič
- mikrokontrolér
- akumulátor
- USB výstup

Práci lze rozdělit na dílčí úkoly:

- provedení testovacích měření s termoelektrickým generátorem
- návrh funkce napájecího zařízení
- návrh mechanické konstrukce
- výběr elektronických komponent
- návrh elektrického zapojení
- návrh programového řešení
- provedení ověřovacích měření
- vyhodnocení výsledků

Předložená dokumentace se nejprve krátce věnuje shrnutí o historickém i současném používání termoelektrických generátorů. Poté následuje teoretický úvod, kde jsou probrány dvě klíčové komponenty návrhu. Jde především o termoelektrický generátor – Peltierův modul, a také o spínaný zdroj, který bude potřebný pro stabilizaci napětí. Další kapitola se věnuje měření Peltierových článků. Pak již následují části věnující se samotnému návrhu napájecího zařízení. Nejprve jsou probrány možné podoby mechanické konstrukce a vybrána nejvhodnější. Další kapitola se věnuje návrhu elektroniky. Obsahuje návrh funkce, popis postupu při výběru jednotlivých komponent a detailní charakteristiku těchto vybraných komponent včetně popisu způsobu použití, případných schémat zapojení a dalších poznámek. Nechybí samozřejmě popis obvodu jako celku. Další část se již věnuje podrobnému popisu funkce celého zařízení především z pohledu uživatele. Poté je zde kapitola věnující se měření na samotném zařízení následována vyhodnocením dosažených výsledků a závěrem.

## 2. Historické a současné použití termoelektrických generátorů

Princip termoelektrického generátoru je znám již od 30. let 19. století. Jeho využívání má několik nezanedbatelných výhod: žádné vibrace, žádný hluk, žádné pohyblivé části a z toho plynoucí vysoká spolehlivost. Většímu rozmachu však dosud brání především velmi nízká účinnost přeměny energie (typicky 5–8 %) [1, s. 2], a také stále poměrně vysoká cena větších generátorů. Do budoucna se však očekává nástup nových materiálů, které by ji mohly zvýšit až na 20–30 % [1, s. 2]. To by mohlo znamenat skutečný průlom ve využívání této technologie.

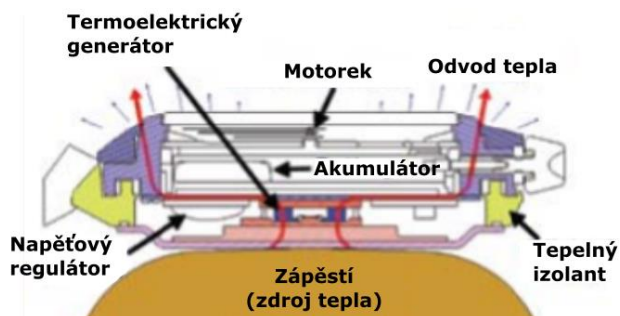
I přesto se termoelektrické generátory využívaly již během druhé světové války. Vzhledem k tomu, že výkonný tepelný zdroj není problém, tak i přes nízkou účinnost používala americká armáda termoelektrické generátory o výkonu 5–20 W zahřívané velkými benzínovými hořáky. Sovětská armáda zase používala tzv. „Partizánské kotlíky“ – nádoby, ve kterých se během vaření dala díky termoelektrickým generátorům vyrábět elektrická energie pro napájení radiostanice [2, s. 158]. Termoelektrické generátory zahřívané velkými petrolejovými hořáky se také používaly v oblastech, kde nebyl zaveden elektrický proud např. k napájení malých radiopřijímačů. Nebyly to tehdy tenké Peltierovy moduly, jaké známe dnes. Používaly se velké termočlánky složené do obrovských baterií.

Dnes se termoelektrické generátory již v podobě Peltierových modulů, popsaných v kapitole 3.1, používají např. k zužitkování jinak promarněné tepelné energie, vzniklé jako vedlejší produkt např. spalování. Typický příklad je automobilka BMW, která experimentuje s použitím takových termoelektrických generátorů ke generování elektrické energie využitím teploty výfukového systému. Teplota výfukového systému dosahuje až 700 °C. Při využití běžného chladicího okruhu spalovacího motoru pro chlazení druhé strany termoelektrického generátoru není problém dosáhnout teplotního rozdílu několika set stupňů Celsia. Vývojáři automobilky se tím snaží snížit nároky na alternátor či ho dokonce zcela nahradit. Podle jejich vyjádření by se touto cestou dalo dosáhnout snížení spotřeby automobilů o 5–7 % [3, s. 2].



Obr. 2.1: Výroba elektrické energie termoelektrickým generátorem využíváním teploty výfukového systému automobilu [převzato z 3]

Další možnost využití je využití tělesného tepla. Jeho pomocí lze napájet např. nositelnou elektroniku nebo dokonce různá lékařská zařízení typu EEG. V takových zařízeních termoelektrické generátory pracují s teplotním rozdílem okolo 10 °C. Výstupní napětí a výkony jsou tak velmi malé [4]. Například firma Seiko v roce 1998 představila náramkové hodinky „Seiko Thermic“ využívající tělesnou teplotu k vlastnímu napájení. Principiální schéma je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Digitální hodinky napájené tělesným teplem [5]

## 2.1 Nabíjecí zařízení firmy BioLite

BioLite je společnost, která se mimo jiné zabývá výrobou nabíjecích stanic využívajících termoelektrický generátor. V současné době má na trhu dvojici takových výrobků: BioLite CampStove a BioLite KettleCharge (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3: BioLite CampStove (vlevo) a BioLite KettleCharge [převzato z 6]

V případě BioLite CampStove se jedná o malý kotlík, ve kterém lze rozdělávat oheň a na který lze připevnit různé nástavce pro vaření vody nebo jídla. Na bok tohoto kotlíku je připevněn termoelektrický generátor s chlazením a nezbytnou elektronikou. Zařízení disponuje jedním nabíjecím USB portem. Výrobce udává stálý nabíjecí výkon 2 W, špičkový až 4 W [6].

BioLite KettleCharge je nádoba na vodu (objem 750 ml), v jejímž dně je integrován termoelektrický generátor. Na spodní stranu nádoby se přiloží tepelný zdroj (ideálně kompatibilní propan-butanová lahev), kterým se nádoba ohřívá, přičemž voda uvnitř tvoří chladící médium. Tento přístroj je navíc vybaven akumulátorem o kapacitě 1 250 mAh. Zařízení opět disponuje jedním nabíjecím USB výstupem. Výrobce udává maximální nabíjecí výkon 10 W. Není ale zřejmé, zda se jedná přímo o výkon termoelektrického generátoru nebo o výkon při nabíjení z akumulátoru [6].

Obě zařízení se prodávají za cenu v přepočtu okolo 3 500 Kč.



## 3. Teoretický rozbor

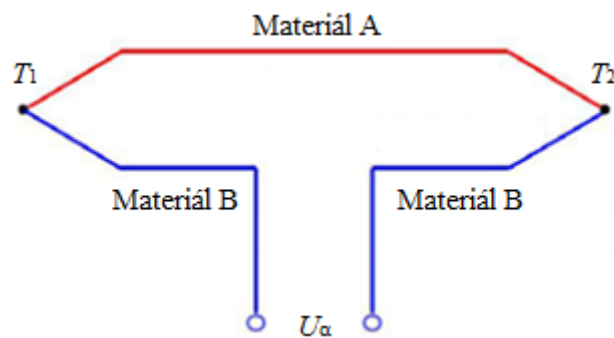
### 3.1 Peltierův modul

Peltierův modul je základní kámen navrhovaného napájecího zařízení. Pracuje na principu Seebeckova jevu.

#### 3.1.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev, pojmenován po svém objeviteli Thomasi Johnu Seebeckovi, reprezentuje přímý převod tepelné energie na elektrickou energii. Představme si uzavřený obvod složený ze dvou různých kovů spojených ve dvou bodech. Budou-li mít místa spojů rozdílnou teplotu, bude obvodem procházet elektrický proud. Seebeck tento jev objevil náhodou, když zjistil, že umístí-li takový obvod ke střelce kompasu, dojde k jejímu vychýlení. To je způsobené magnetickým polem, které vyvolá vzniklý elektrický proud.

Rozpojíme-li popsany obvod (obr. 3.1), můžeme na jeho koncích měřit elektrické napětí. Toto napětí se nazývá termoelektrické (též Seebeckovo) napětí a je úměrné rozdílu teplot v místech spojů (rovnice (1)) [7].



Obr. 3.1: Seebeckův jev – princip

Velikost vzniklého napětí kromě teplotního rozdílu samozřejmě závisí také na použitých kovech. Seebeck při svých pokusech sestavil řadu kovů (viz tabulku 1). Sestavíme-li termoelektrický článek ze dvou kovů z této řady, poteče elektrický proud přes studený uzel směrem od kovu umístěného v řadě více vlevo do kovu umístěného v řadě více vpravo. Tento elektrický proud bude tím vyšší, čím větší bude vzájemná vzdálenost kovů v řadě [8].

+	Sb	Fe	Zn	Ag	Au	Sn	Pb	Hg	Cu	Pt	Bi	-
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---

Tabulka 1: Seebeckova řada [8]

Pro malé rozdíly teplot  $T_1$  a  $T_2$  (desítky °C) je závislost velikosti termoelektrického napětí na rozdílu teplot téměř lineární (viz rovnici (1)). Pro větší rozdíly teplot pak do tohoto vztahu přibývají další členy s vyššími řády [7].

$$U_\alpha = \alpha_{12}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

- kde  $\alpha_{12}$  ( $\text{VK}^{-1}$ ) je Seebeckův koeficient

Velikost Seebeckova koeficientu je řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-5}$  pro kovy a  $10^{-5}$  až  $10^{-3}$  pro polovodiče.

### 3.1.2 Konstrukce Peltierova modulu

Peltierův modul přímo využívá Seebeckův jev. Jedná se o zařízení zkonstruované z velkého počtu termoelektrických článků tvořených polovodiči typu  $P$  a  $N$  (viz obr. 3.2). Tyto články jsou připevněny k sobě a vloženy mezi dvě keramické destičky. Z elektrického hlediska jsou spojeny sériově, z tepelného paralelně. Takováto struktura, zobrazená na obr. 3.3, vytváří na keramické destičce na jedné straně tzv. teplou stranu a na druhé tzv. studenou stranu. Typicky jsou nohy termočlánku vyráběny z bizmut-telluridů ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) pro jejich výhodné fyzikální vlastnosti – malý měrný elektrický odpor a malý součinitel tepelné vodivosti [9, s. 1].

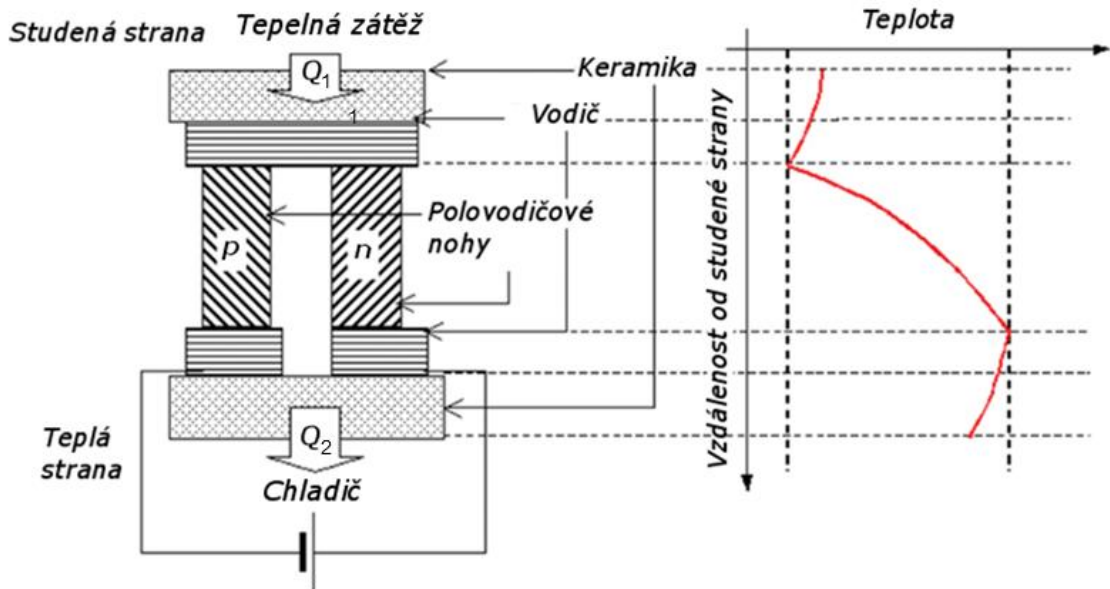
Účinnost přeměny energie lze zjednodušeně vyjádřit vztahem [4]:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_2}{T_1}} \quad (2)$$

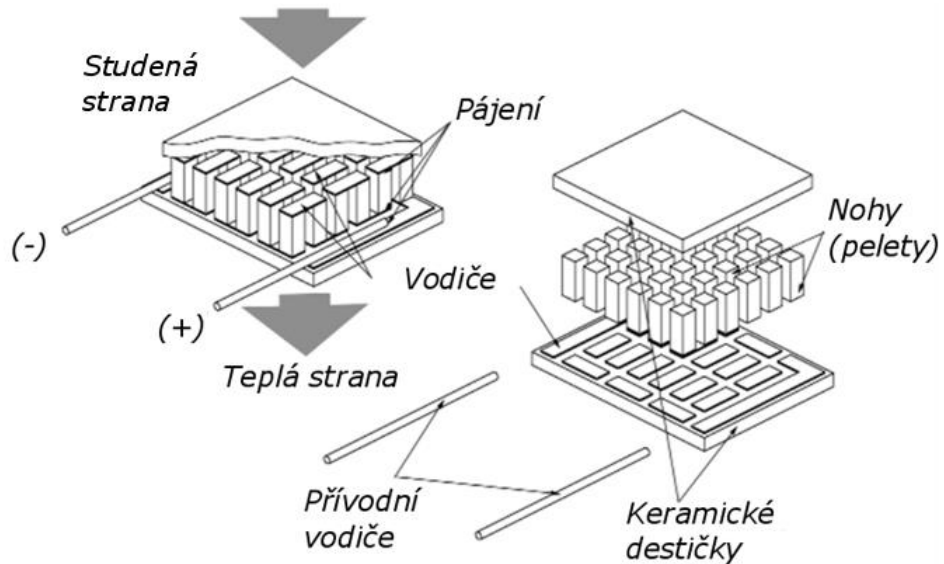
kde  $T_1$  je teplota teplé strany Peltierova modulu,  $T_2$  teplota studené strany Peltierova modulu a  $ZT$  je faktor daný vlastnostmi použitých termoelektrických materiálů. Je definovaný jako:

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho g_{te}} \quad (3)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův koeficient,  $\rho$  je hustota materiálu,  $g_{te}$  je jeho součinitel tepelné vodivosti a  $T$  je jeho teplota. Velikost faktoru  $ZT$  materiálu  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  je asi 0,9. [4]



Obr. 3.2: Jeden element Peltierova modulu s rozložením teploty (režim chlazení) [9, s. 2]



Obr. 3.3: Detail Peltierova modulu [9, s. 2]

### 3.1.3 Rozdělení modulů

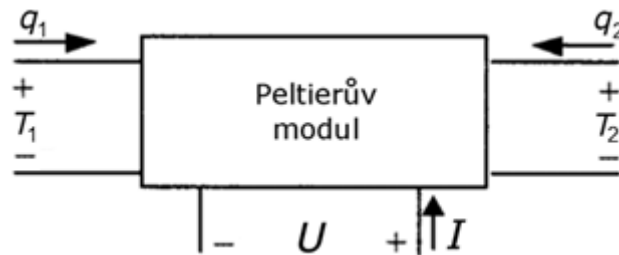
Peltierovy moduly mají dva základní způsoby využití:

1. Chladič – Peltierův modul napájený stejnosměrným napětím bude na svých keramických deskách vytvářet rozdíl teplot. Používá se například k chlazení výkonných procesorů.
2. Zdroj elektrického napětí – Zajistíme-li teplotní rozdíl na keramických deskách modulu, dostaneme na přívodních svorkách stejnosměrné elektrické napětí.

Podle určení se Peltierovy moduly dělí na TEC (Thermoelectric Cooler) a TEG (Thermoelectric Generator). Principiálně jsou oba druhy shodné, liší se v technologiích použitých při skládání a pájení modulů a také v řešení přívodních vodičů. TEG moduly mají oba vodiče připojené ke studené straně modulu a izolované teflonem. Obecně lze tedy říci, že TEG moduly jsou konstruovány pro práci při teplotách typicky 200–300 °C, zatímco klasické TEC moduly jsou typicky určeny pro teploty do cca 100 °C.

### 3.1.4 Náhradní elektrické zapojení

Z elektrického hlediska lze na Peltierův modul pohlížet jako na trojbran a charakterizovat jej jeho náhradním elektrickým zapojením.



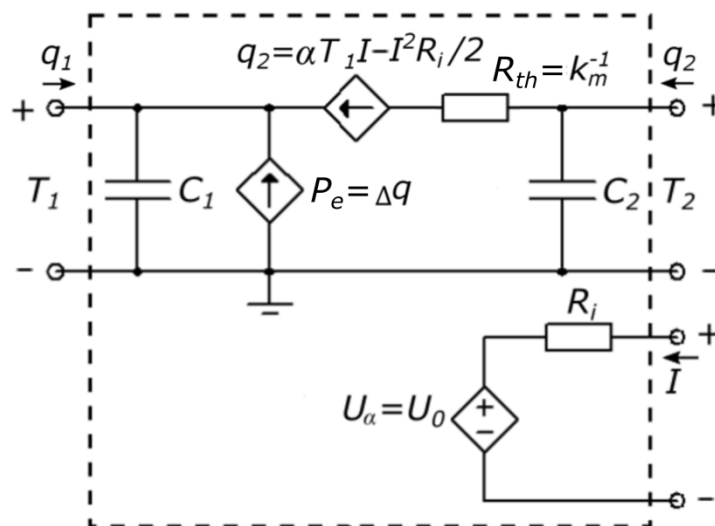
Obr. 3.4: Peltierův modul jako trojbran [10, s. 1 020]

Abychom mohli sestavit náhradní elektrické schéma tohoto trojbranu, využijeme následující ekvivalenci tepelných a elektrických veličin:

Tepelné veličiny	Jednotky	Analogické elektrické veličiny	Jednotky
Tepelný tok, $q$	W	Proud, $I$	A
Teplota, $T$	K	Napětí, $U$	V
Tepelný odpor, $R_{th}$	K/W	Odpor, $R$	$\Omega$
Tepelná vodivost, $k$	$Wm^{-1}K^{-1}$	Vodivost, $G$	S
Tepelná kapacita, $C$	J/K	Kapacita, $C$	F

Tabulka 2: Ekvivalence tepelných a elektrických veličin [10, s. 1 020]

S použitím těchto ekvivalencí lze sestavit náhradní elektrické zapojení Peltierova modulu uvedené na obrázku 3.5 [10].



Obr. 3.5: Náhradní elektrické zapojení Peltierova modulu [10, s. 1 021]

Horní část zapojení reprezentuje tepelnou část modulu, spodní elektrickou část modulu. Kapacity  $C_1$  a  $C_2$  představují tepelné kapacity obou stran modulu. Jejich velikost je dána vztahem:

$$C = mc_0 \quad (4)$$

kde  $m$  je hmotnost materiálu a  $c_0$  je měrná tepelná kapacita. Obvyklá velikost těchto kapacit je přibližně  $2 \text{ JK}^{-1}$  [10].

Rezistor  $R_{th}$  reprezentuje tepelný odpor modulu. Pro jeho velikost platí vztah [10]:

$$R = lk_m^{-1}A^{-1} \quad (5)$$

kde  $l$  je délka materiálu,  $A$  je jeho plocha a  $k_m$  jeho tepelná vodivost. Proudový zdroj  $q_2$  reprezentuje teplo šířící se modulem a proudový zdroj označený  $P_e$  představuje rozdíl mezi tepelnými toky  $q_1$  a  $q_2$ .  $P_e$  zároveň odpovídá elektrickému výkonu buďto generovanému, nebo naopak dodávanému podle aktuálního použití modulu. Velikost toho výkonu je dána následujícím vztahem [10]:

$$P_e = q_1 - q_2 = \alpha(T_1 - T_2)I - \tau_m I \Delta T + I^2 R_i \quad (6)$$

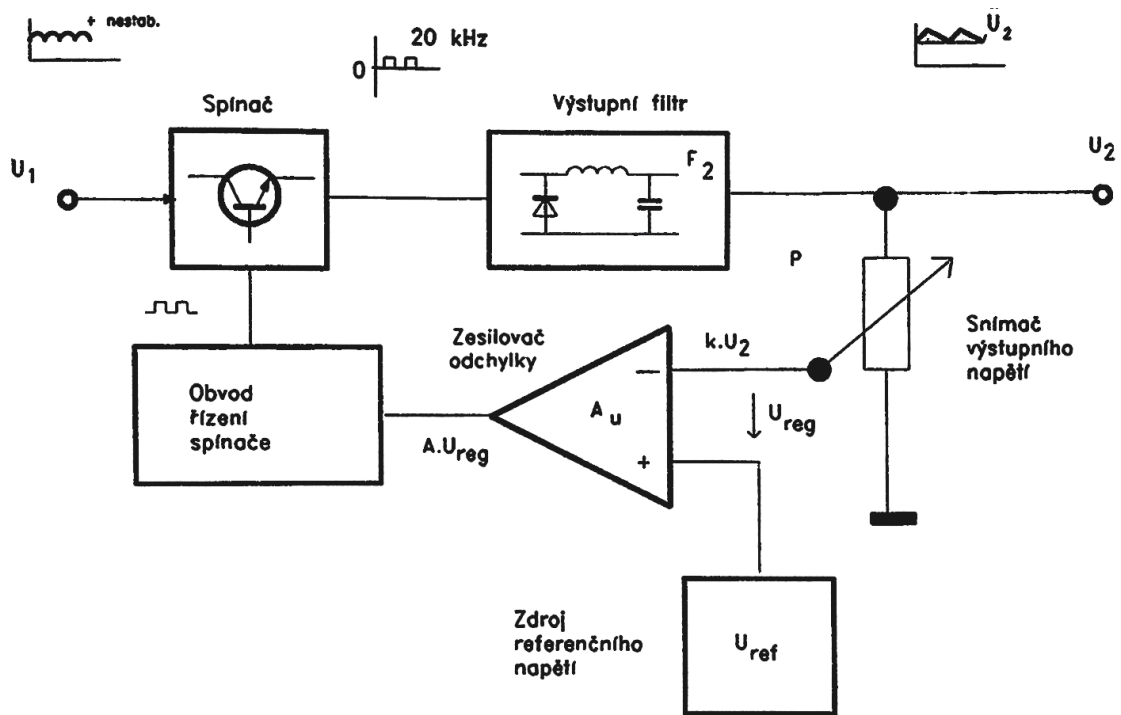
kde  $\alpha$  je Seebeckův koeficient a  $\tau_m$  je Thompsonův koeficient.

Pro mou práci je důležitá především druhá část obvodu, která zobrazuje náhradní schéma elektrické části Peltierova modulu. Napětí  $U_a$  je Seebeckovo napětí, jehož velikost je úměrná rozdílu teplot na deskách modulu podle rovnice (1).

### 3.2 Spínané zdroje

Druhý základní kámen zařízení je spínaný zdroj. Standardní Peltierův modul generuje napětí v rozmezí cca 0–6 V v závislosti teplotním spádu a na zatížení. Toto napětí je třeba stabilizovat na zvolenou konstantní hodnotu nezávislou na aktuální hodnotě výstupního napětí generátoru. K tomu poslouží právě spínaný zdroj.

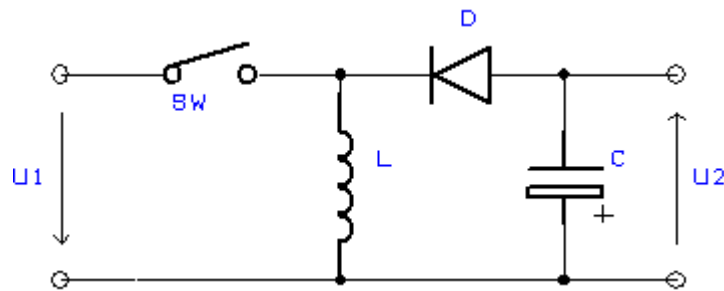
Spínaný zdroj pracuje na principu periodické akumulace energie během jednoho časového okamžiku  $T_a$  a jejím uvolňování během druhého časového okamžiku  $T_b$ . Výstupní napětí je pak funkcí vstupního napětí a délky intervalů  $T_a$  a  $T_b$ . Všechny spínané zdroje pracují ve zpětnovazebním režimu. Neustále snímají výstupní napětí nebo proud a pomocí řídicí logiky řídí spínací tranzistor [11, s. 58]. Pracovní kmitočet bývá různý podle určení zdroje nebo podle velikosti vstupního napětí. Většinou se pohybuje v rozmezí 100 kHz až 2 MHz. Může být stálý nebo proměnný. Principiální schéma spínaného zdroje je na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Principiální schéma spínaného zdroje (převzato z [11, s. 60])

Existuje několik různých základních zapojení spínaných zdrojů, všechny však využívají tři základní prvky – spínač, akumulční indukčnost a rekuperační diodu [11]. Následuje popis tří základních konfigurací.

### 3.2.1 Zapojení BUCK-BOOST



Obr. 3.7: DC/DC měnič v zapojení BUCK-BOOST

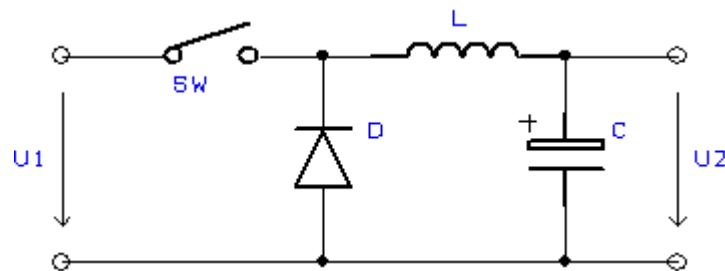
Jde o invertující zapojení. V časovém okamžiku  $T_a$  je spínač SW sepnutý. Proud protéká přes induktor, ve kterém se akumuluje energie. Po rozeptnutí spínače induktor drží protékající proud, čímž dojde ke změně polaroty napětí. Induktor se v této chvíli chová jako zdroj energie a obvod se uzavírá přes diodu a kondenzátor. Pro napětí  $U_2$  platí [11, s. 59]:

$$U_{2\max} \leq -U_1 \quad (7)$$

$$U_2 = U_1 \frac{T_a}{T_b} \quad (8)$$

### 3.2.2 Zapojení BUCK

V tomto případě se jedná o tzv. snižující (step-down) zapojení.



Obr. 3.8: DC/DC měnič v zapojení BUCK

V časovém okamžiku  $T_a$  je spínač sepnutý. Proud protéká přes induktor do kondenzátoru a paralelně do zátěže. V induktoru se akumuluje energie. Po rozpojení spínače (interval  $T_b$ ) proud induktorem nemůže zaniknout. Aby induktor zachoval tok proudu, otočí se na něm polarita napětí. Induktor se nyní chová jako zdroj energie a spolu s kondenzátorem dodává proud do zátěže, přičemž obvod je uzavřen přes rekuperační diodu [11, s. 60].

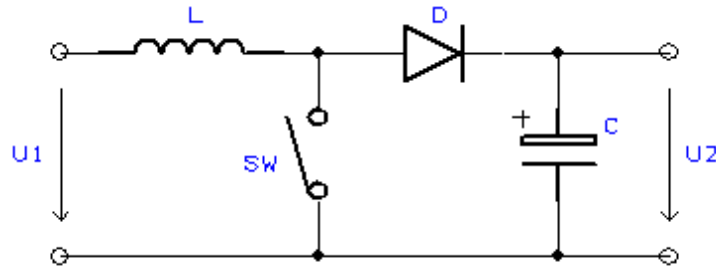
$$U_2 < U_1 \quad (9)$$

$$U_2 = U_1 \frac{T_a}{T_a + T_b} \quad (10)$$



### 3.2.3 Zapojení BOOST

DC/DC měnič v zapojení BOOST je zvyšující (step-up) měnič – výstupní napětí je vyšší než vstupní.



Obr. 3.9: DC/DC měnič v zapojení BOOST

V intervalu  $T_a$  (spínač sepnutý) je akumulční induktor připojen přímo ke zdroji napětí  $U_1$ . V induktoru se tak akumuluje energie a energie do zátěže je v tuto chvíli dodávána z kondenzátoru. Po rozpojení spínače (nastává  $T_b$ ) induktor drží směr protékajícího proudu, a tak dojde k otočení polaroty napětí. Induktor se nyní chová jako zdroj napětí spojený do série se zdrojem  $U_1$ . Obvod se uzavře přes rekuperační diodu a zátěž paralelně s kondenzátorem. Pro napětí  $U_2$  platí: [11, s. 85]

$$U_2 > U_1 \quad (11)$$

$$U_2 = U_1 \frac{T_a + T_b}{T_b} \quad (12)$$

Oba DC/DC měniče použité ve stavěném napájecím zařízení jsou právě typu BOOST.

### 3.2.4 Výhody spínaných zdrojů

Oproti lineárním regulátorům napětí spočívá výhoda spínaných zdrojů v jejich účinnosti. Vychází to z principu funkce. Během okamžiku sepnutého spínače je jeho odpor velmi malý a protéká jím relativně velký proud. Ztrátový výkon je malý. V okamžiku rozepnutí spínače je jeho odpor vysoký a protéká jím tak minimální proud. Ztrátový výkon je opět malý.

Další obrovská výhoda je možnost zvyšující regulace, kterou lineární stabilizátory vůbec nemají.

## 4. Zvolená metodika řešení

První krok návrhu byl seznámení se s termoelektrickými generátory. Dostal jsem k dispozici tři druhy Peltierových modulů. Bylo tedy třeba navrhnout způsob měření, provést měření s těmito moduly a zpracovat výsledky.

Další krok spočíval ve výběru vhodné konstrukce. Navrhl jsem několik možných konstrukcí a vyrobil jejich prototypy, na kterých jsem provedl potřebná měření se všemi typy generátorů.

Poté jsem provedl vyhodnocení měření provedených v prvních dvou krocích a na jeho základě jsem vybral vhodný termoelektrický generátor pro další práci.

Další krok byl navrhnout funkci celého zařízení a pro ni vhodné blokové schéma. Po navržení tohoto schématu jsem přistoupil k výběru jednotlivých komponent elektroniky. Stanovil jsem požadavky na každý důležitý prvek elektronického návrhu a na jejich základě jsem vybral nejvhodnější řešení. Nakonec jsem navrhl schéma zapojení, na jeho základě i plošný spoj, který jsem vyrobil, osadil a oživil.

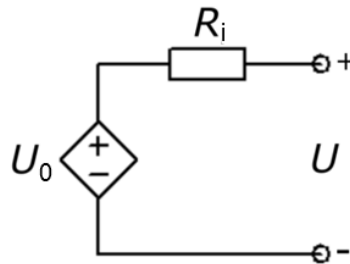
Po sestavení celého napájecího zařízení jsem provedl nezbytná měření a vyhodnocení celé práce.

Následující kapitoly se podrobně věnují zmíněným krokům.

## 5. Měření Peltierových modulů

### 5.1 Cíl měření

Cíl měření byl získat konkrétní představu o chování Peltierových modulů – změřit jejich reálné charakteristiky, spočítat parametry náhradního zapojení a provést porovnání jednotlivých měřených modulů. Náhradní zapojení elektrické části Peltierova modulu:



Obr. 5.1: Náhradní schéma zapojení elektrické části Peltierova modulu

Po změření výstupních napětí modulu při zatížení dvěma různými zatěžovacími odpory  $R_{Z_1}$  a  $R_{Z_2}$  lze parametry náhradního zapojení pro aktuální teplotní rozdíl na deskách modulu vypočítat ze soustavy rovnic:

$$U_{R_{Z_1}} = U_0 \frac{R_{Z_1}}{R_{Z_1} + R_i} \quad (13)$$

$$U_{R_{Z_2}} = U_0 \frac{R_{Z_2}}{R_{Z_2} + R_i}$$

Z této soustavy lze vyjádřit parametry náhradního zapojení:

$$U_0 = \frac{U_1 U_2 (R_1 - R_2)}{U_2 R_1 - U_1 R_2} \quad (14)$$

$$R_i = \frac{R_1 R_2 (U_1 - U_2)}{U_2 R_1 - U_1 R_2}$$

Typický vnitřní odpor Peltierova modulu se pohybuje v rozmezí 1–5  $\Omega$ , během měření jsem tak volil hodnoty odporů v tomto rozmezí.

Pro správné porovnání modulů je nezbytné vypočítat maximální možný výkon, který je každý z nich schopen dodat do ideální zátěže. Ze vztahu (15) lze odvodit, že modul bude dodávat maximální výkon tehdy, když bude zatížen zatěžovacím odporem o shodné velikosti se svým vlastním vnitřním odporem.

$$P = U_0^2 \frac{R_z}{(R_i + R_z)^2} \quad (15)$$

Pak lze maximální možný výkon dodávaný do zátěže vypočítat podle vztahu:

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4R_i} \quad (16)$$

## 5.2 Měřené moduly

K měření jsem měl k dispozici tři druhy TEC Peltierových modulů o rozměrech  $4 \times 4$  cm. Jedná se o jediný u nás běžně dostupný rozměr vhodný pro navrhované napájecí zařízení. Všechny moduly jsou tedy tohoto rozměru, ovšem liší se tloušťkou a provedením (zalití silikonem u TEC1-12710HTS). Konkrétně se jedná o moduly TEC1-12703 (varianta T100) [12], TEC1-12705HT [13] a TEC1-12710HTS [14] (varianty T200).

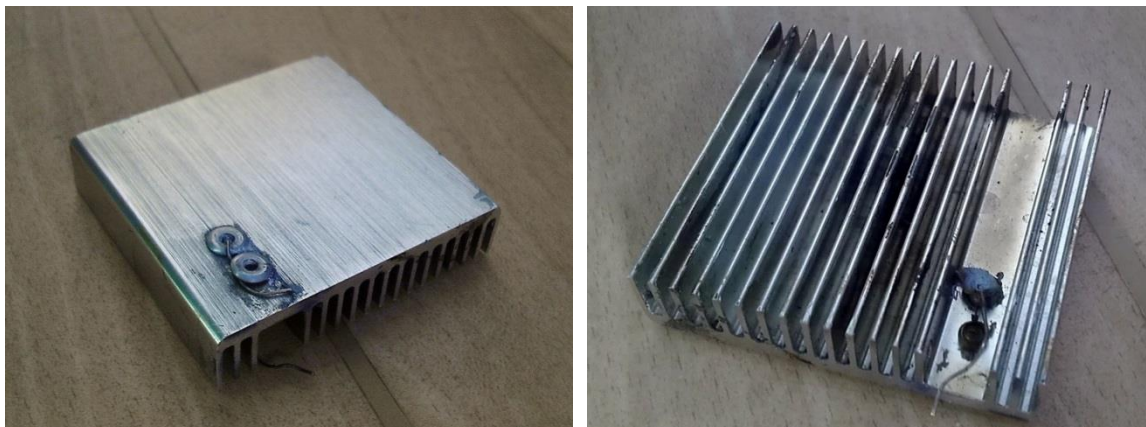
TEC1-12703 je klasický TEC modul s maximální přípustnou pracovní teplotou  $138$  °C, moduly TEC1-12710HTS a TEC1-12705HT jsou určené pro vyšší teploty (až  $225$  °C) a mají tak blíže k nákladnějším TEG modulům.

Později se mi podařilo získat k měření také dva TEG moduly – TEG1-127-2.0-1.6 a TEG1-127-2.0-1.3. Tato dvojice má ovšem větší rozměr  $5 \times 5$  cm a několikanásobně vyšší cenu. V měření tedy slouží výhradně k orientačnímu porovnání s ostatními moduly.

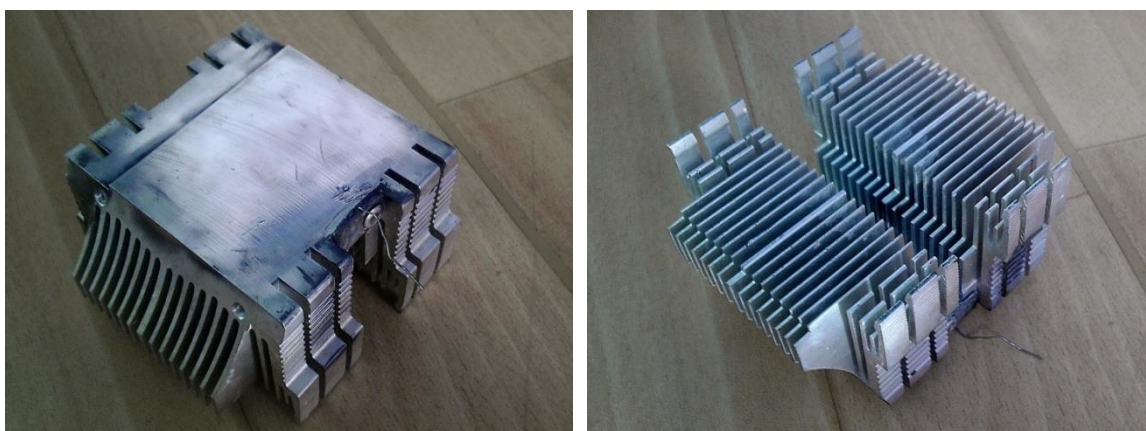
## 5.3 Průběh měření

Pro úspěšné měření je nezbytné v každém časovém okamžiku přesně měřit teplotu obou stran modulu. Pro tento účel jsem použil PTC termistory KTY84-130 napevno přinýtované do hliníkových chladičů a zalité teplovodivou pastou. Použil jsem jeden malý chladič, přítomný hlavně kvůli samotnému měření teploty na teplé straně a druhý větší, sloužící

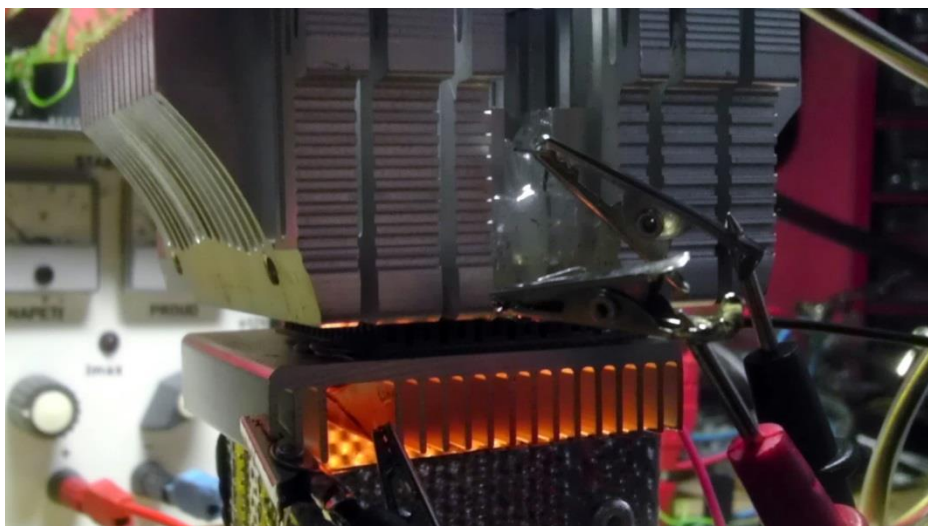
k odvodu tepla od studené části modulu. Mezi tyto chladiče jsem pak vložil měřený Peltierův modul tak, aby termistory v chladičích byly co nejblíže modulu. Viz obrázky 5.2, 5.3 a 5.4. Postup návrhu proudových zdrojů pro napájení termistorů je popsán v kapitole 7.3.5 (s. 50).



Obr. 5.2: Chladič teplé strany s termistorem



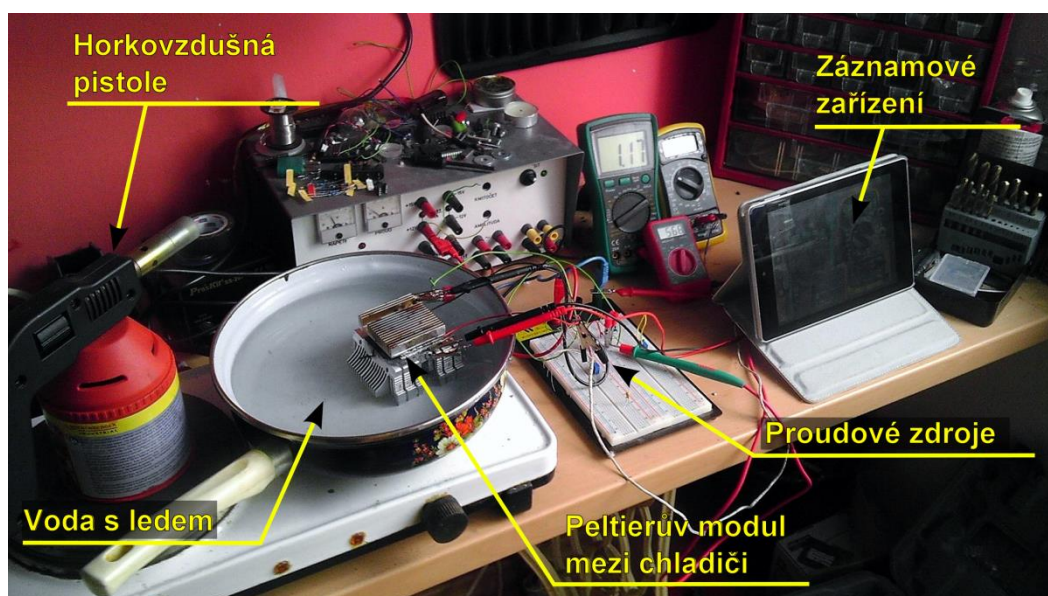
Obr. 5.3: Chladič studené strany s termistorem



Obr. 5.4: Pokusné měření

Během měření jsem studenou stranu Peltierova modulu udržoval na přibližně konstantní teplotě (ponořením studeného chladiče do vody s ledem) a plynovou horkovzdušnou pistolí zahříval teplou stranu modulu až na teplotu cca 220 °C. Při jednotlivých měřeních jsem moduly zatěžoval zatěžovacími odpory v rozmezí 1–5  $\Omega$  a odečítal protékající proud.

Po zkušenostech se špatnými výsledky z prvních měření jsem odečítání proudu prováděl při chladnutí teplé strany, nikoli při zahřívání. Během rychlého zahřívání zřejmě nedocházelo k rovnoměrnému rozdělení tepla a naměřené charakteristiky neodpovídaly teoretickým předpokladům. Z důvodu rychlosti celého měření jsem celý proces zaznamenával na video a data odečítal dodatečně ze záznamu.



Obr. 5.5: Měřicí pracoviště

## 5.4 Vyhodnocení měření

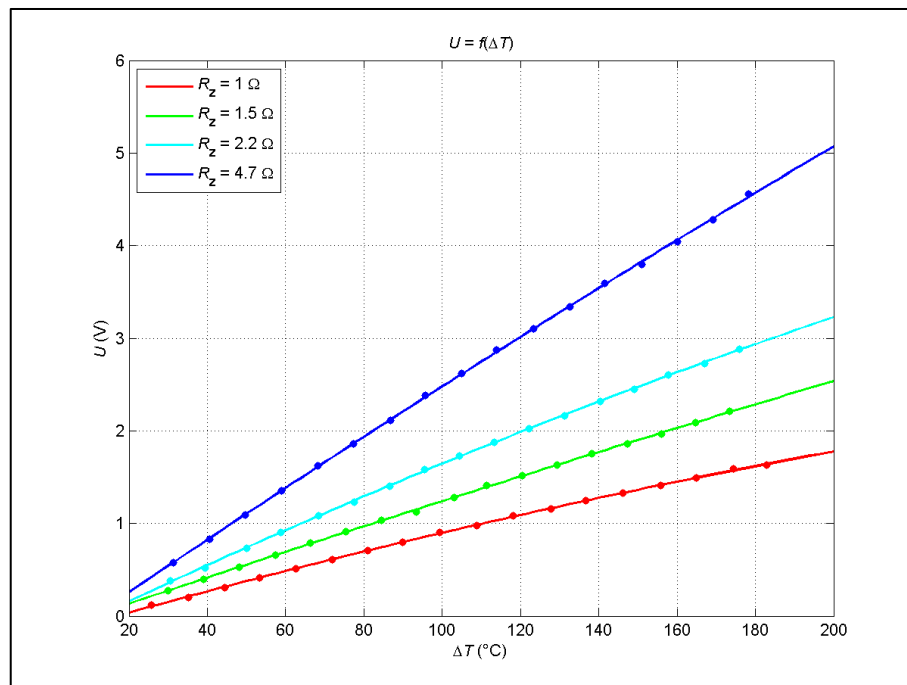
Pro každý měřený modul jsem vynesl trojici grafů. Na prvním z nich jsou naměřené hodnoty napětí na různých zatěžovacích odporech v závislosti na teplotním spádu proložené polynomem druhého řádu. Na druhém grafu jsou průběhy ztrátového výkonu na měřených zatěžovacích odporech v závislosti na teplotním rozdílu vypočítané podle rovnice:

$$P = \frac{U^2}{R_z} \quad (17)$$

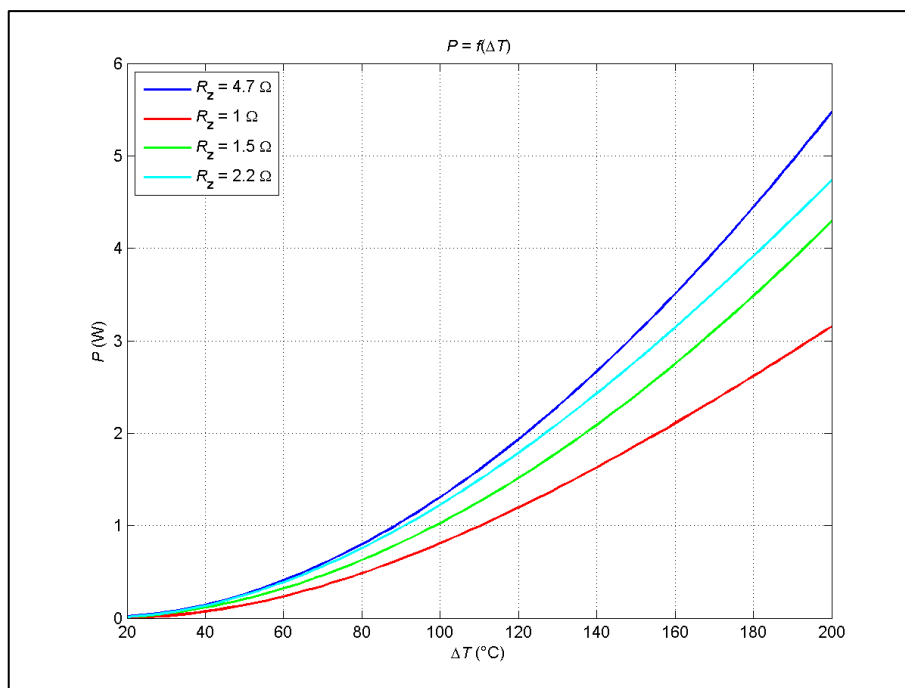
Na třetím grafu jsou vypočítané parametry náhradního elektrického zapojení (rovnice (14)). Zde se jedná o průměr ze dvou nezávislých měření na různých zatěžovacích odporech.

Nyní následuje trojice grafů pro modul TEC1-12705HT, který jsem nakonec použil do konstruovaného napájecího zařízení (viz kapitolu 7.2.1). Jedná se o TEC Peltierův modul o rozměrech  $4 \times 4 \times 0,42$  cm s maximální přípustnou pracovní teplotou  $225$  °C. Výsledky měření zbylých modulů jsou přiloženy v příloze I.

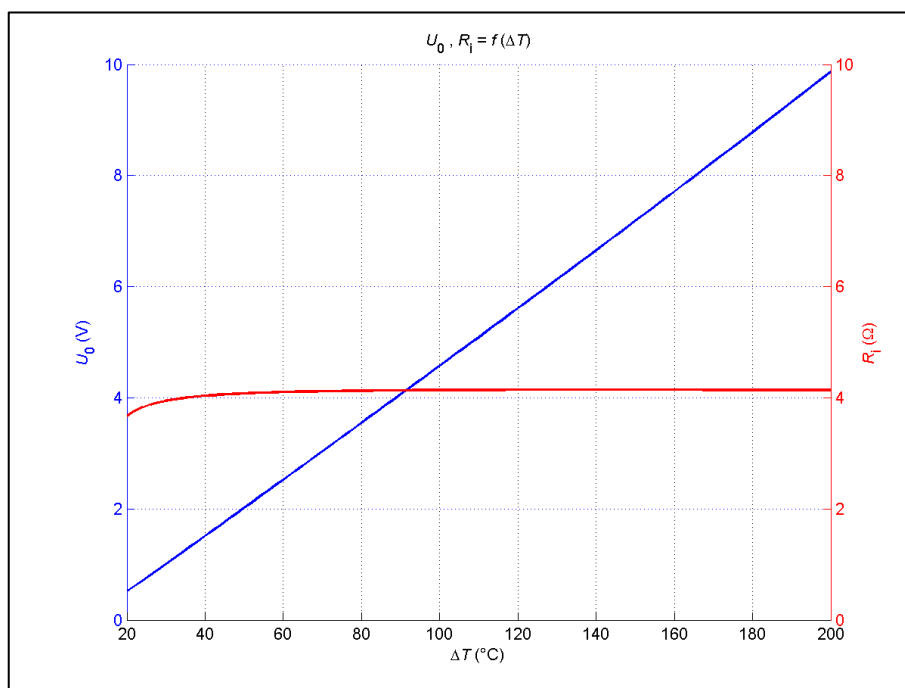
Zpracování výsledků jsem prováděl v programu Matlab.



Obr. 5.6: TEC1-12705HT – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot



Obr. 5.7: TEC1-12705HT – Závislost výkonu na rozdílu teplot



Obr. 5.8: TEC1-12705HT – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

Z měřené trojice TEC modulů se nejtenčí modul TEC1-12710HTS ukázal jako nejvýkonnější. Je tedy zřejmé, že mezi výkonem a tloušťkou modulu je nepřímá úměra. Nicméně čím tenčí je modul, tím vyšší je tok tepla skrz něj a tím hůře se tedy dosahuje požadovaného teplotního rozdílu.



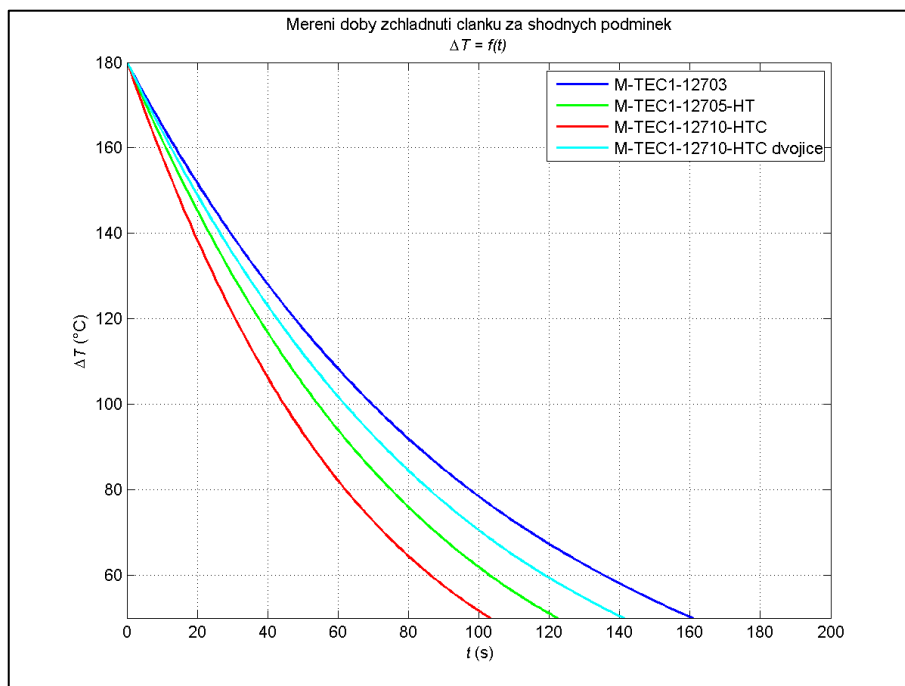
Pro přenos tepla modulem platí vztah [15, s. 9]:

$$Q = \Delta T \frac{kA}{t} \quad (18)$$

kde  $k$  je tepelná vodivost,  $A$  je plocha modulu,  $t$  je tloušťka modulu a  $\Delta T$  je rozdíl teplot na deskách modulu.

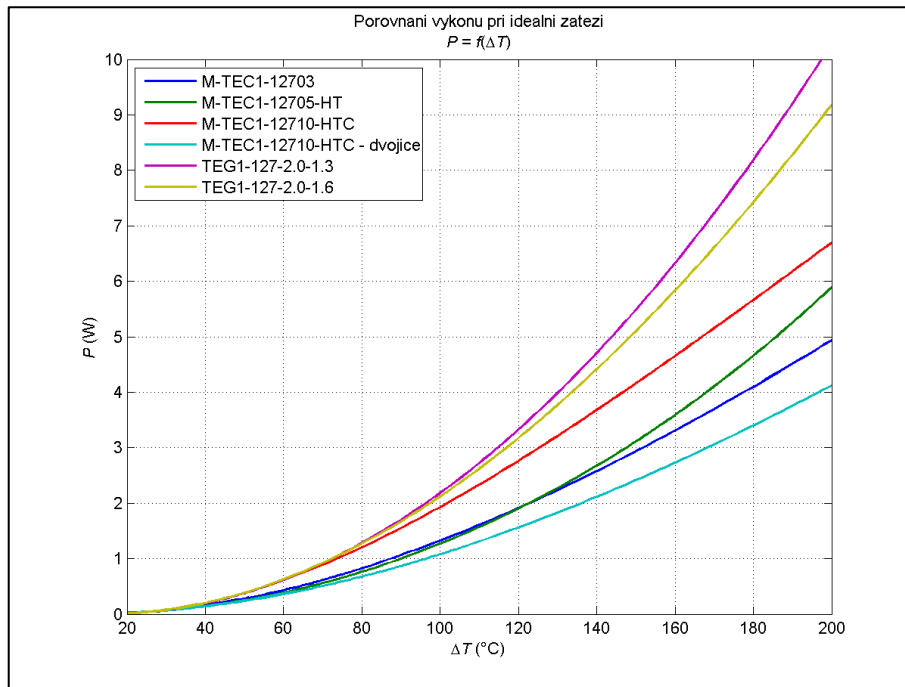
Proto jsem provedl měření na dvojici těchto článků, kdy jsem je mezi chladiče vložil na sebe a zapojil do série. Tím by se měl přenos tepla značně snížit. Výsledky tohoto měření jsou v příloze I (s. IX). Ze srovnání výsledků je patrné, že přenos tepla sice značně poklesl (viz obr. 5.9), ale poměrně výrazně klesl i výstupní výkon (viz obr. 5.10, tabulku 3). Je to dáno tím, že vnitřní odpor dvojice modulů zapojených do série se počítá, nicméně vypočítané vnitřní napětí zůstalo vlivem rozložení rozdílu teplot mezi oba moduly přibližně stejné.

Na následujícím grafu je výsledek orientačního měření doby chladnutí jednotlivých (nezatížených) modulů v rozmezí stejných rozdílů teplot. Porovnáním průběhů lze získat konkrétnější představu o rozdílech v tepelné vodivosti modulů dané rovnicí (18) a jejich reálného vlivu. Tloušťka modulu TEC1-12703 je 4,7 mm, modulu TEC1-12705HT 4,3 mm a modulu TEC1-12710HTS 3,3 mm.



Obr. 5.9: Doba zchladnutí modulů za shodných podmínek

### 5.4.1 Porovnání výsledků



Obr. 5.10: Porovnání výkonů – vypočítané průběhy pro ideální zátěž

	$U_0$ (V)	$R_i$ ( $\Omega$ )
<b>TEC1-12703</b>	4,8	4,3
<b>TEC1-12705HT</b>	4,55	4,1
<b>TEC1-12710HTC</b>	3,65	1,7
<b>TEC1-12710HTC – dvojice</b>	3,65	3,1
<b>TEG1-127-2.0-1.3</b>	3,65	1,5
<b>TEG1-127-2.0-1.6</b>	3,6	1,6

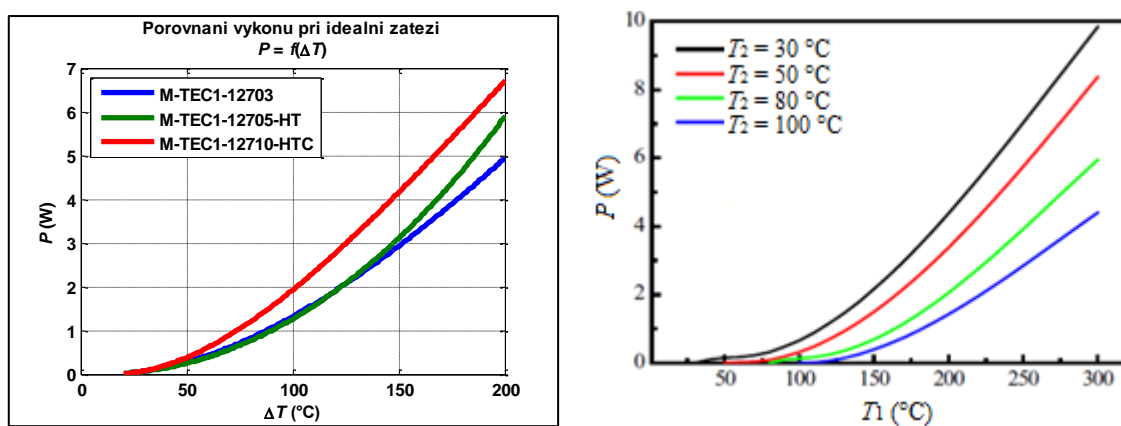
Tabulka 3: Porovnání parametrů náhradního zapojení při  $\Delta T = 100$  °C

Z porovnání lze vidět, že drahé (a větší) TEG moduly jsou podle předpokladů viditelně výkonnější než TEC varianty. Především od teplotního rozdílu cca 100 °C je markantní nárůst výkonu oproti TEC modulům. Navíc je třeba si uvědomit, že maximální měřená teplota 220 °C se blíží hranici použitelnosti vysokoteplotních TEC modulů, ale TEG moduly jsou schopny dlouhodobě pracovat při teplotách až do 300 °C. Obyčejný TEC1-12703 se začal rozpadat již při 130 °C.

Je třeba dodat, že cena měřených TEC modulů se pohybuje v rozmezí 200–300 Kč, zatímco cena TEG modulů přesahuje částku 1 500 Kč. Zároveň zdůrazňují, že rozměry obou TEG modulů jsou  $5 \times 5$  cm, zatímco TEC moduly mají rozměry  $4 \times 4$  cm.

### **Srovnání s TEG10W**

Jediný dostupný TEG Peltierův modul za relativně srovnatelnou cenu, který jsem na našem trhu našel je TEG10W v hodnotě 890 Kč. Nabízí se tedy srovnání jeho charakteristik (získaných z katalogového listu) s naměřenými charakteristikami trojice TEC modulů. Rozměry TEG10W jsou, stejně jako u měřených TEC modulů,  $4 \times 4$  cm.



Obr. 5.11: Srovnání měřených TEC modulů (vlevo) s TEG10W [16] pro ideální zátěž

V grafu pro TEG10W je třeba si dopočítat teplotní rozdíl jako  $\Delta T = T_1 - T_2$ . Pak můžeme vidět, že tento modul je srovnatelný spíše s méně výkonnými TEC1-12703 a TEC1-12705HT. Růst výkonu s rozdílem teplot je u něj však strmější a při vyšších teplotách tyto moduly překonává. Na výkon modulu TEC1-12710HTC v rozsahu teplotního spádu do 200 °C ale nedosáhne.

Důležité je vzít v úvahu porovnání tloušťky modulů. Tloušťka modulu TEG10W je podle katalogového listu 5 mm. Výkonová křivka nejvíce odpovídá křivce modulu TEC1-12705HT, který je o 0,2 mm tenčí. Podle rovnice (18) (za předpokladu shodných materiálů) bude mít modul TEC1-12705HT o 4 % vyšší tepelnou vodivost, což se v praxi projeví obtížnějším dosahováním teplotního spádu. Rozdíl je to ale poměrně minimální. Pro srovnání – tloušťka modulu TEC1-12710HTC je pouze 3,3 mm. Jeho tepelná vodivost je tak o 34 % vyšší než u TEG10W.

Hlavní výhodou modulu TEG10W je rozsah pracovních teplot. Tento modul může dlouhodobě pracovat až při teplotě 300 °C, zatímco maximální dlouhodobá pracovní teplota TEC1-12710HTC a TEC1-12705HT je 200 °C (u TEC1-12703 dokonce pouze 100 °C). V ideálním případě pak může TEG10W dosáhnout výkonu až 9,8 W [16].

## 6. Mechanická konstrukce napájecího zařízení

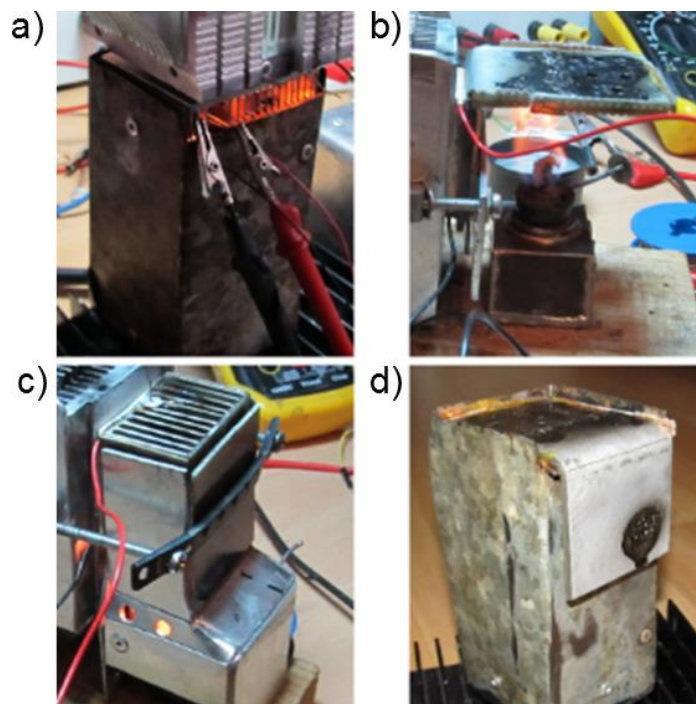
### 6.1 Požadavky na konstrukci

Požadavky na konstrukci jsou následující:

- přijatelné rozměry
- co nejlepší využití tepelného zdroje
- co nejúčinnější chlazení
- možnost měření teploty obou stran článku
- možnost aktivně zasáhnout v případě přehřívání teplé strany

### 6.2 Konstrukce teplé strany

Na teplé straně je před článek třeba vložit malý (např. hliníkový) mezikus, do kterého bude zabudován teplotní senzor. Vzhledem k potřebě chlazení je třeba zvážit, zda topit přirozeně nahoru (obr. 6.1a) nebo do strany (obr. 6.1b, 6.1c a 6.1d). V případě topení do strany totiž existuje více možností účinného chlazení. Např. použití velkého pasivního chladiče nebo chlazení pomocí nádoby s vodou vyžaduje Peltierův modul ve vertikální poloze (viz dále). Otestoval jsem následující konstrukce teplé strany:



Obr. 6.1: Testované konstrukce teplé strany zařízení

Na obrázku 6.1a je konstrukce, kdy se teplá část modulu umístí přímo nad plamen a Peltierův modul je tak ve vodorovné poloze. Na obrázku 6.1b a 6.1d je hliníkový plát ohnutý do tvaru písmene L. Ten je umístěn tak, že jedna část je přímo nad plamenem a ke druhé (svislé) části se připevní teplá strana Peltierova modulu, který je tak tentokrát ve svislé poloze. Na obrázku 6.1c je pak na teplé straně modulu připevněn malý žebrovaný hliníkový chladič, pod kterým je umístěn zdroj tepla. Přímou na tento chladič je připevněn Peltierův modul opět ve svislé poloze (viz také obr. 6.3 a 6.4).

	Dosažená teplota (°C)
<b>Topení nahoru přímo do teplého chladiče (obr. 6.1a)</b>	165
<b>Topení do boku přes ohnutý hliníkový plát (obr. 6.1b)</b>	115
<b>Topení do boku přes hliníkový chladič (obr. 6.1c)</b>	150
<b>Topení do boku přes ohnutý hliníkový plát uvnitř plechové konstrukce (obr. 6.1d)</b>	125

Tabulka 4: Porovnání jednotlivých konstrukcí teplé strany

V tabulce 4 je srovnání dosažených teplot při topení do nijak nechlazené teplé části konstrukce vždy stejným tepelným zdrojem. Je zřejmé, že nejlepší je topit přirozeně nahoru. Pokud by bylo nutné topit do boku, je nejvhodnější použít malý krychlový chladič a topit do jeho žeber (obr. 6.1c, 6.3 a 6.4).

### 6.3 Chlazení

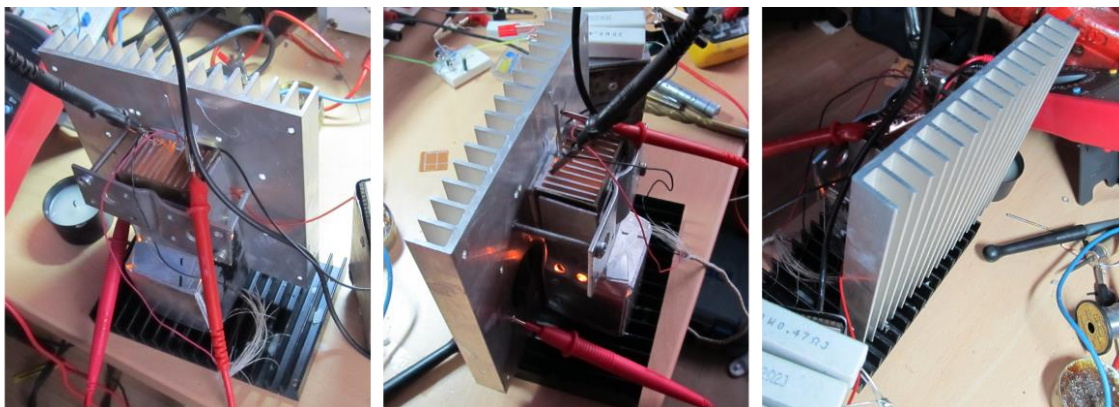
Pro konstrukci chlazení existují v tomto případě tři reálné možnosti: pasivní chlazení, vodní chlazení nebo aktivní chlazení ventilátorem. Pro účely testování jsem používal modul TEC1-12705HT a jako zdroj tepla iluminační svíčku a malý lihový kahan (obr. 6.2).



Obr. 6.2: Zdroje tepla používané při testování – iluminační svíčka (vlevo) a malý lihový kahan

### 6.3.1 Pasivní chlazení

Pasivní chlazení vyžaduje chladič s velkou plochou a krátkými silnými žebry [17]. Vzhledem k rozměrům chladiče je nutné topení do strany.

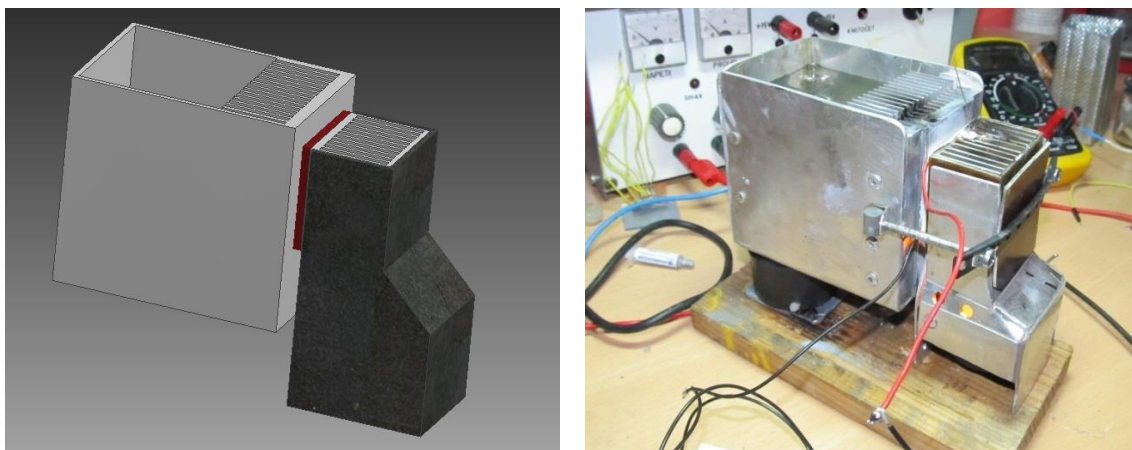


Obr. 6.3: Test pasivního chlazení

Z testovacích měření vyplynulo, že pasivní chlazení není dobrá volba. I přes velké rozměry chladiče, se kterým testování probíhalo, byl teplotní rozdíl po ustálení teplot maximálně pouhých 30 °C. Při zatížení článku ideálním odporem jsem na tomto odporu naměřil ztrátový výkon pouze 0,06 W. Obdobně nízkých hodnot modul dosahoval s různými zdroji tepla, neboť nehledě na teplotu teplé strany se teplotní rozdíl pohyboval stále v přibližně stejných hodnotách.

### 6.3.2 Vodní chlazení

Myšlenka je použít na chlazení nádobu se stojatou vodou. Použití vody znamená velký objem chladicího média, čili účinnější chlazení a navíc možnost úplné regenerace studené strany výměnnou vodou. Nevýhoda je opět potřeba topení do strany a samozřejmě riziko vylití a poškození elektroniky. Pro tuto variantu jsem vytvořil 3D model v programu Autodesk Inventor, sestrojil reálnou konstrukci a provedl měření výkonu. Návrh a fotografie konstrukce jsou na obr. 6.4, naměřená data v tabulce 5.



Obr. 6.4: Návrh a reálná konstrukce vodního chlazení

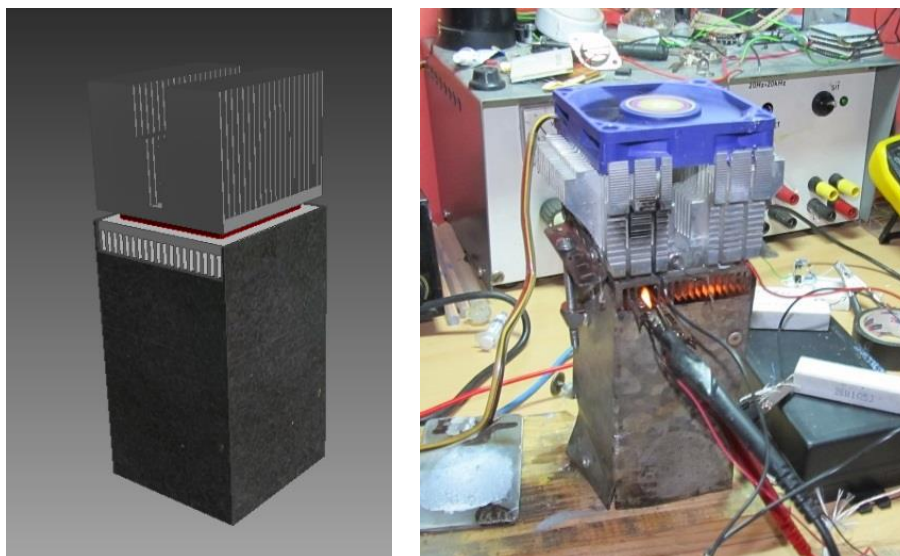
Zdroj tepla	iluminační svíčka	lihový kahan
Teplota teplé strany (°C)	77	175
Teplota studené strany (°C)	32	48
Ztrátový výkon na ideálním zatěžovacím odporu (W)	0,2	2,3

Tabulka 5: Měření na konstrukci s vodním chlazením

### 6.3.3 Aktivní chlazení

Aktivní chlazení je jako jediné vhodné pro topení přímo vzhůru, což slibuje nejlepší využití tepleného zdroje. Další výhodou je možnost aktivně zasahovat do procesu chlazení. Zřejmá nevýhoda je výkonová ztráta na ventilátoru, která se pohybuje v průměru okolo 0,2 W, špičkově až 0,3 W. Opět následuje návrh a fotografie konstrukce (obr. 6.5) a naměřené hodnoty (tabulka 6).





Obr. 6.5: Návrh a reálná konstrukce s aktivním chlazením

Zdroj tepla	iluminační svíčka, ventilátor vypnutý	iluminační svíčka, ventilátor zapnutý	lihový kahan
Teplota teplé strany (°C)	115	84	180
Teplota studené strany (°C)	77	33	55
Ztrátový výkon na ideálním zatěžovacím odporu (W)	0,12	0,27	2,12
Výkonové ztráty na ventilátoru (W)	-	0,17	0,25

Tabulka 6: Měření na konstrukci s aktivním chlazením

## 6.4 Vyhodnocení a výběr konstrukce

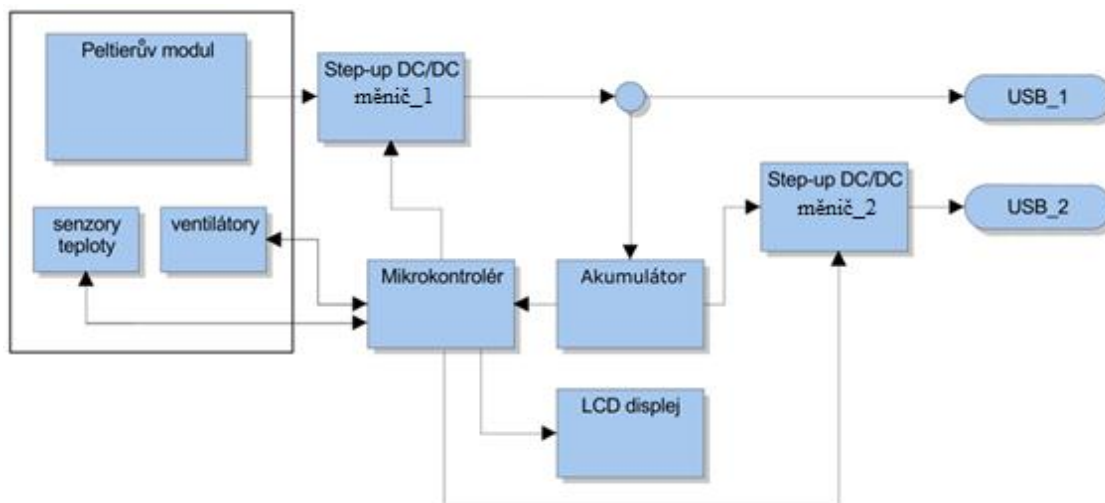
Nejvyšší výkony jsem naměřil na konstrukci s vodním chlazením. Nicméně vzhledem nejen k vlastní elektronice nabíjecího zařízení, ale především k přítomnosti nezděra drahých nabíjených zařízení jsem tuto konstrukci zavrhl pro riziko poškození vylitou vodou. Její další nevýhodou jsou větší rozměry. Rozhodl jsem se tedy pro konstrukci s aktivním chlazením. Ta má také jako jediná výhodu téměř absolutně ustáleného stavu teploty studené strany generátoru, která je daná nastavením otáček ventilátoru.

Konstrukci z obrázku 6.5 jsem ještě doplnil o druhý menší ventilátor připevněný vedle malého chladiče na teplé straně tak, aby byl v případě přehřívání schopen zchladit teplou stranu přístroje.

## 7. Návrh elektroniky

### 7.1 Návrh funkce a blokový popis zařízení

Zařízení se skládá z několika hlavních částí: termoelektrického generátoru, dvojice zvyšujících DC/DC měničů, mikrokontroléru, LCD zobrazovače a několika dalších periférií, viz blokové schéma:



Obr. 7.1: Blokové schéma zařízení

Rozhodl jsem se do nabíjecího zařízení integrovat akumulátor, a to hned z několika důvodů. Za prvé z měření v kapitole 5 vyplývá, že při použití slabšího tepelného zdroje nebude Peltierův modul poskytovat dostatek výkonu pro přímé nabíjení USB zařízení. Díky akumulátoru tak bude možné kdykoli dobít mobilní telefon, či jiné USB zařízení i bez dostupnosti silného tepelného zdroje. Akumulátor bude samozřejmě možné dobít termoelektrickým generátorem (a to i ze slabšího tepelného zdroje) nebo jej jednoduše vyměnit. Další důležitý přínos akumulátoru je záruka, že dokud bude akumulátor nabitý, bude mít zařízení dostatek energie na roztočení obou ventilátorů a bude tak moci zabránit případnému přehřátí a poškození Peltierova modulu nebo celého zařízení. Toto je velmi důležité, neboť pokud by došlo např. k poškození modulu nebo by z nějakého důvodu vzrostla teplota jeho studené strany a tím se snížil teplotní rozdíl, nemuselo by zařízení mít dostatečnou energii pro roztočení ventilátorů a mohlo by tak dojít k poškození přehřátím.

USB zařízení bude tedy možné dobíjet z akumulátoru přes konektor USB\_2 nebo, v případě dostupnosti silného tepelného zdroje, přímo z Peltierova modulu z konektoru USB\_1. O aktuálních možnostech nabíjení bude na základě naměřených teplot rozhodovat mikrokontrolér. Ten bude mít na starosti také hlídání a regulaci teplot a kontrolu akumulátoru. O všech důležitých stavech bude informovat uživatele pomocí LCD displeje.

## **7.2 Výběr komponent**

Tato kapitola obsahuje postup při výběru hlavních komponent nabíjecího zařízení. Podrobnější popis jednotlivých vybraných komponent pak následuje v kapitole 7.3.

### **7.2.1 Termoelektrický generátor**

Jak bylo řečeno, měl jsem k dispozici tři Peltierovy moduly. Na základě měření jsem vybíral z dvojice modulů – TEC1-12710HTS a TEC1-12705HT. TEC1-12703 jsem vyřadil z důvodu nízké maximální přípustné teploty.

Při laboratorním měření v kapitole 5 byl Peltierův modul TEC1-12710HTS značně výkonnější, nicméně v reálné konstrukci (kapitola 6) se více osvědčil typ TEC1-12705HT, neboť má větší tloušťku a snáze se tak na něm vytváří a udržuje vyšší teplotní rozdíl. Podle vztahu (18) (s. 32) je tepelná vodivost modulu TEC1-12705HT přibližně o 30 % nižší než je tomu u varianty TEC1-12710HTS. Tato skutečnost smazává výkonový deficit vůči typu TEC1-12710HTS a reálné zařízení je pak výkonnější s modulem TEC1-12705HT.

### **7.2.2 Primární DC/DC step-up měnič**

Tento měnič je připojen přímo na Peltierův modul a na výstupu by měl držet napětí 5 V. První krok při výběru je stanovení požadavků a jejich priority:

1. Dostupnost
2. Výstupní napětí 5 V
3. Rozsah vstupních napětí – důležité je jak minimální vstupní napětí, tak maximální, aby mohlo zařízení pracovat za různých podmínek
4. Minimální startovací napětí – čím nižší, tím dříve může začít nabíjení
5. Sledování bodu maximálního výkonu (viz dále)

6. Maximální výstupní proud – čím vyšší tím lepší, příliš velký je ale zbytečný neboť vzhledem k provedeným měřením nelze čekat vyšší nabíjecí proud než 0,5 A
7. Účinnost
8. Cena

Na základě stanovených požadavků jsem vybral následující obvody:

Výrobce	Maxim Integrated		Linear Technology			Texas Instruments	Analog Devices
Typ	MAX1703	MAX608	LTC3108	<b>LTC3105</b>	LTC3526	Bq25505	ADP5090
$U_{START}$	0,9 V	<b>1,6 V</b>	20 mV	<b>250 mV</b>	<b>680 mV</b>	330 mV	380 mV
$U_{IN}$	0,5–5,5 V	1,8–5 V	<b>20–500 mV</b>	<b>0,225–5 V</b>	0,5–5 V	0,1–5,1 V	0,1–3,3 V
$U_{OUT}$	5 V	5 V	2,3–5,1 V	<b>1,5–5,25 V</b>	1,5–5,25 V	2–5,2 V	2,2–5,2 V
max. $I_{OUT}$	1,5 A	1,5 A	<b>50 mA</b>	<b>400 mA</b>	550 mA	<b>230 mA</b>	<b>100 mA</b>
max. účinnost	95 %	87 %	70 %	<b>80 %</b>	94 %	80 %	85 %
sledování bodu max. $P$	<b>ne</b>	ne	ano	<b>ano</b>	<b>ne</b>	ano	ano
dostupnost, pouzdro	<b>x</b>	SOIC	DFN, SSOP	<b>DFN, MSOP</b>	<b>DFN</b>	VQFN	LFCSP
cena	<b>x</b>	180 Kč	150 Kč	<b>180 Kč</b>	60 Kč	200 Kč	140 Kč
max. teplota	85 °C	85 °C	125 °C	<b>85 °C</b>	85 °C	105 °C	125 °C
typ. počet ext. součástek	9	7	7	<b>8</b>	6	6	14

Tabulka 7: Srovnání vybraných DC/DC step-up měničů (červeně označen důvod vyřazení)

V tabulce 7 jsou podrobně vypsány vlastnosti vybraných obvodů. Jde především o zástupce dvou kategorií: První jsou klasické step-up měniče určené pro napájení elektroniky z akumulátorů s nižším napětím, než napájená elektronika vyžaduje. Ty se vyznačují vyššími maximálními výkony, ale zároveň vyššími startovacími napětími. Typický zástupce je obvod MAX608. Druhá kategorie jsou tzv. energy harvesting čipy. Ty jsou určené především k nabíjení akumulátorů a superkapacitorů ze solárních článků nebo TEG modulů. Jsou stavěny spíše pro dlouhodobý sběr energie a pracují tak s malými výkony. Na druhou stranu disponují velmi nízkými startovacími napětími. Jejich důležitá výhoda také spočívá v tom, že jsou vybaveny technologiemi, které umožňují držet generátor napětí v oblasti jeho ideálního pracovního bodu. Typický zástupce je obvod LTC3108.

Ze srovnání nejlépe vychází obvod firmy Linear Technology LTC3105.

### 7.2.3 Sekundární DC/DC step-up měnič

Druhý DC/DC step-up měnič musí splňovat:

- Rozsah vstupních napětí cca 2–5 V
- Výstupní napětí 5 V
- Maximální proud dodávaný do zátěže alespoň 1 A
- Co nejvyšší účinnost

Na základě požadavků jsem vybral osvědčený obvod LM2623 od firmy Texas Instruments. Tento obvod pracuje s rozsahem vstupních napětí v rozmezí 0,8–14 V, výstupní napětí je regulovatelné v rozmezí 1,24–14 V, proud zátěží až 2 A a maximální účinnost až 90 %.

### 7.2.4 Mikrokontrolér

Požadavky na mikrokontrolér jsou:

- Dostatek pinů pro všechny periferie (min. 18)
- A/D převodník s minimálně třemi analogovými vstupy
- Dva PWM výstupy pro ovládání ventilátorů
- Dostatečná velikost paměti pro práci s grafickým LCD displejem
- Malá vlastní spotřeba

Na základě těchto požadavků jsem vybral mikrokontrolér PIC16LF1559 od firmy Microchip.

### 7.2.5 Indikační prvky

Zařízení musí nějakým způsobem informovat uživatele o svém stavu a činnosti. Jedna možnost je použití indikačních LED diod či bargrafů. Ovšem i při použití malovýkonových LED diod poteče jednou takovou LED diodou proud až 2 mA. Rozhodl jsem se tedy namísto toho použít malý grafický LCD displej z mobilního telefonu Nokia 5110. Tento displej se vyznačuje spotřebou do 0,5 mA při napájení 3,3 V a rozlišením 48 × 84 obrazových bodů. To je dostatek prostoru pro zobrazení všech potřebných informací o stavu přístroje.

## 7.2.6 Akumulátor

Jako akumulátor jsem zvolil trojici standardních tužkových NiMH článků velikosti AA. Jedná se o články Sanyo Eneloop o kapacitě 1 900 mAh. Toto řešení je praktické z několika důvodů: Jedná se o standardní tužkové akumulátory, které lze ze zařízení vyjmout a v případě potřeby normálně použít. Díky jejich dostupnosti je také lze v případě vybití kdykoli vyměnit za stejný typ a ihned začít nabíjet USB zařízení. Pouze je třeba, aby nové akumulátory měly dostatečnou kapacitu.

## 7.3 Popis jednotlivých komponent a obvodů včetně jejich zapojení

### 7.3.1 Obvod LTC3105

Obvod LTC3105 je zvyšující DC/DC měnič určený především pro napájení elektroniky nebo nabíjení akumulátorů či superkapacitorů ze solárních článků a podobných zdrojů energie. Jeho hlavní parametry jsou:

- rozsah vstupního napětí 0,225–5 V
- 250 mV startovací napětí
- nastavitelné výstupní napětí v rozmezí 1,5–5,25 V
- až 400 mA výstupní proud
- technologie sledování bodu maximálního výkonu (MPPC)
- 6 mA nízkovýkonový (LDO) výstup
- automatické hlídání výstupního proudu s možností odpojení výstupu
- účinnost až 90%

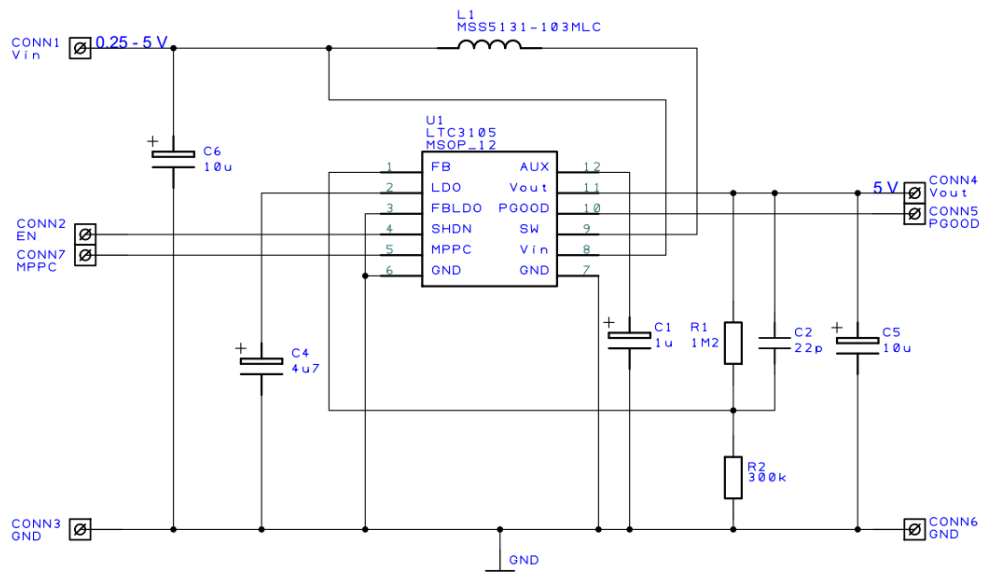
Důležitá vlastnost je především technologie MPPC (Maximum Power Point Control), která představuje (byť poněkud omezenou) možnost držet Peltierův článek v oblasti jeho ideálních pracovních podmínek. Pracovní bod se nastavuje referenčním napětím na MPPC vstupu, které je dosaženo připojením vhodného rezistoru. Obvod se pak toto napětí snaží držet na vstupním pinu tím, že dynamicky reguluje proud induktorem [18, s. 10]. Bohužel neexistuje ideální konstantní napětí, na kterém bychom měli termoelektrický generátor držet, neboť toto napětí odpovídá polovině  $U_0$  a mění se tak s rozdílem teplot na modulu.

Přesto je rozhodně důležité tuto technologii využít. Měřením jsem zjistil, že vliv MPPC obvodu klesá s rostoucím rozdílem teplot na termoelektrickém generátoru. Vysvětluji si to tím, že čím vyšší je rozdíl teplot na generátoru, tím se generátor stává tvrdším zdrojem a MPPC obvod jej nadále nedokáže regulovat. Důsledky tohoto jevu a možné návrhy na zlepšení jsou diskutovány v kapitole 10.2. Hranici jsem experimentálním měřením s použitým modulem TEC1-12705HT stanovil na cca 1,6 V. Na vstup MPPC obvodu jsem tak připojil trojici rezistorů, které pomocí tranzistorů řízených mikrokontrolérem spínám ke společné zemi a tím dosahuji různých hodnot napětí pro MPPC vstup. Konkrétně se jedná o hodnoty napětí 1 V, 1,2 V a 1,4 V. Bylo by vhodné vyzkoušet nastavování napětí pro MPPC obvod pomocí D/A převodníku mikrokontroléru, bohužel můj konkrétní mikrokontrolér D/A převodníkem nedisponuje. Navíc není jisté, jak by obvod reagoval, neboť napětí se nastavuje pomocí referenčního proudu 10  $\mu$ A, který teče přes připojený rezistor do společné země. Měřením jsem došel k závěru, že trojice napětí pro řízení MPPC obvodu je dostatečná, neboť další zvyšování napětí nemá téměř žádný vliv.

Další zajímavá vlastnost obvodu je nízkovýkonový LDO výstup. Napětí na tomto výstupu je regulovatelné nezávisle na hodnotě nastavené na hlavním výstupu obvodu, a to v rozmezí 1,4–5 V. Po náběhu obvodu může sloužit k napájení obslužné elektroniky nízkým napětím, zatímco hlavní výstup například nabíjí akumulátor na zcela jiném napětí. Proud tímto výstupem je omezen na 6 mA (12 mA špičkový proud) [18]. V mé aplikaci tento výstup i přes jeho výhody nepoužívám, neboť počítám i s během celého systému na akumulátor, kdy bude celý obvod LTC3105 vypnutý.

Schéma zapojení obvodu LTC3105 je na obrázku 7.2. Vstup SHDN (User Shutdown) je interně připojen přes pull-up rezistor na napájecí napětí. Během startování obvodu by měl být plovoucí, jeho připojením na společnou zem se obvod vypíná [18, s. 8]. Tento vstup, stejně jako vstup MPPC, řídím externě pomocí mikrokontroléru (viz celkové schéma zapojení). Výstupní napětí se nastavuje pomocí napěťového děliče mezi výstupem  $V_{OUT}$  a pinem FB (zpětná vazba pro regulátor) podle rovnice (19) [18, s. 11].

$$U_{out} = 1,004 \cdot \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (19)$$



Obr. 7.2: Schéma zapojení obvodu LTC3105

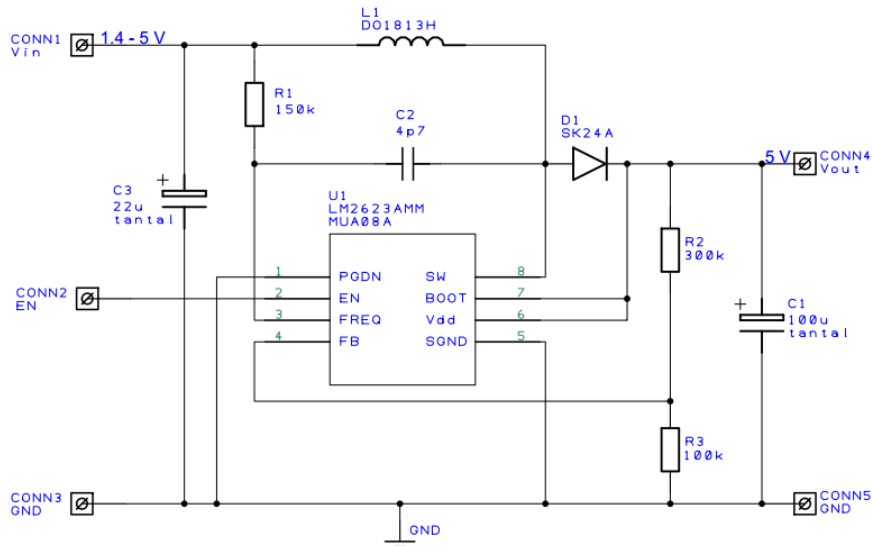
Tento obvod je připojen přímo na termoelektrický generátor, ze kterého stabilizuje napětí na 5 V. Výstup pak podle aktuálního módu přístroje buď nabíjí akumulátor, nebo přímo připojené USB zařízení. Zobrazené zapojení jsem vyrobil jako samostatný modul o rozměrech 22,5 × 25,5 mm. Výrobní data jsou přiložena v příloze III. Návrh jsem prováděl v softwaru DesignSpark PCB.

### 7.3.2 Obvod LM2623

Obvod LM2623 je standardní zvyšující DC/DC měnič, který používám k napájení ventilátorů a nabíjení USB zařízení z akumulátoru. Jeho klíčové vlastnosti jsou:

- rozsah vstupních napětí 0,8–14 V
- startovací napětí 1,1 V
- nastavitelné výstupní napětí v rozmezí 1,24–14 V
- maximální proud dodávaný do zátěže 2 A
- účinnost až 90 %
- malá vlastní spotřeba 80  $\mu$ A





Obr. 7.3: Schéma zapojení obvodu LM2623

Výstupní napětí se nastavuje pomocí děliče napětí zapojeného mezi výstup  $V_{OUT}$  a zpětnovazební FB vstup. Hodnota odporu rezistoru  $R_3$  se doporučuje volit od 50 k $\Omega$  do 100 k $\Omega$ , velikost odporu rezistoru  $R_2$  se pak vypočítá podle vztahu: [19, s. 11]

$$R_2 = R_3 \left[ \left( \frac{U_{out}}{1,24} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Vstup EN je externě připojen přes pull-up rezistor ke vstupu  $V_{IN}$ . Zároveň je připojen na drain NMOS tranzistoru, pomocí kterého jej lze mikrokontrolérem uzemnit a obvod tak vypnout. Výhoda je, že ve vypnutém stavu zůstává spínací tranzistor otevřen a obvod propouští vstupní napětí na výstup.

Zapojení z obrázku 7.3 jsem opět vyrobil jako samostatný modul. V příloze IV jsou přiložena výrobní data pro desku plošných spojů a seznam součástek.

### 7.3.3 Mikrokontrolér PIC16LF1559

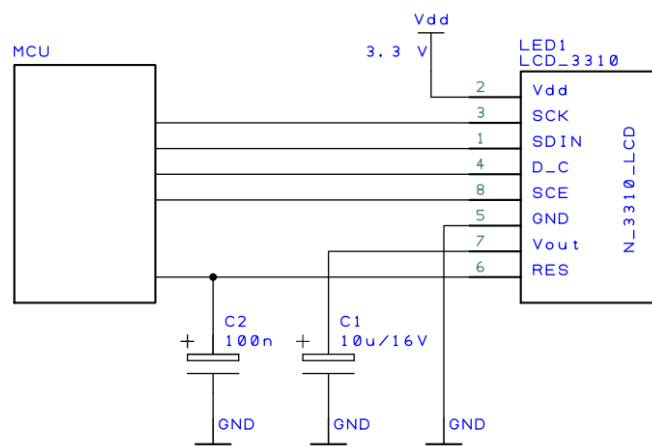
Mikrokontrolér PIC16LF1559 je dvacetipinový osmibitový mikrokontrolér od firmy Microchip s technologií XLP (eXtreme Low Power).

Z periférií používám dvojici PWM modulů pro řízení chodu ventilátorů, trojici A/D kanálů pro měření napětí na čidlech teploty a na akumulátoru, jeden digitální vstup pro uživatelské tlačítko a celkem 12 dalších digitálních vstupů/výstupů pro ovládání logiky, LCD displeje a indikačních LED diod.

Mikrokontrolér z důvodu co nejnižší spotřeby pracuje na nízké taktovací frekvenci 500 kHz. Napájen je přes lineární stabilizátor HT7533 napětím 3,3 V z akumulátoru nebo z termoelektrického generátoru podle aktuálního pracovního módu přístroje. A/D převodník měří s rozlišením 10 bitů a je připojen na interní napětíovou referenci o velikosti 2,048 V. Ta zajišťuje přesné měření napětí i při poklesu napájecího napětí, který může nastat v případě kombinace velkého proudového odběru a vybitého akumulátoru. Modul PWM pracuje na frekvenci 15,6 kHz.

### 7.3.4 LCD displej Nokia 5110

LCD displej z mobilních telefonů Nokia 5110 či Nokia 3310 je grafický LCD displej s rozlišením  $48 \times 84$  obrazových bodů vybavený řadičem PCD8544. Způsob připojení k mikrokontroléru je následující:

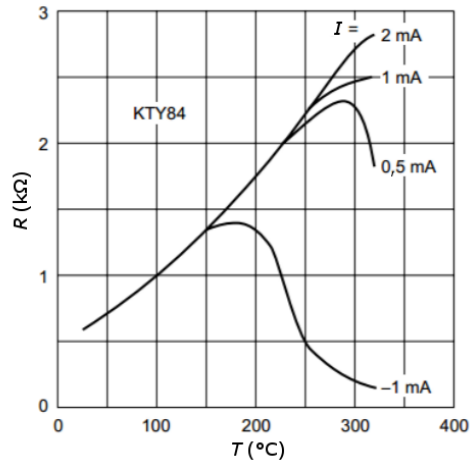


Obr. 7.4: Připojení LCD displeje k mikrokontroléru

Displej je napájen z lineárního stabilizátoru HT7533 stejně jako mikrokontrolér, se kterým komunikuje přes sériové rozhraní. Standardní proudový odběr se pohybuje okolo  $300 \mu\text{A}$  při napájecím napětí 3,3 V.

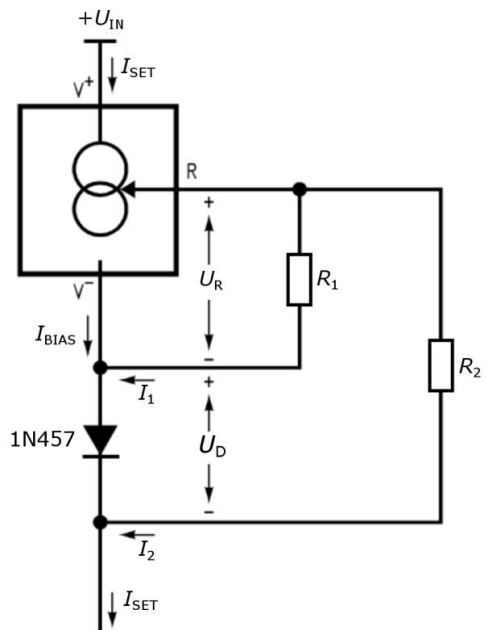
### 7.3.5 Měření teploty – termistory KTY84-130 a proudové zdroje LM334

Pro měření teploty jsem zvolil PTC termistory KTY84-130 s maximální pracovní teplotou  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aby tento termistor správně měřil teplotu v celém pracovním rozsahu, je třeba jej napájet konstantním teplotně nezávislým proudem o velikosti cca 1,5–2 mA (viz obr. 7.5).



Obr. 7.5: Teplotní závislost odporu termistoru KTY84 pro různé napájecí proudy [20]

Za tímto účelem používám proudové zdroje LM334. Tyto obvody mají standardně teplotně závislou výstupní charakteristiku, což by mohlo způsobit zkreslení naměřených teplot. Je tedy vhodné kompenzovat sklon této charakteristiky využitím teplotní závislosti úbytku napětí na PN přechodu diody (viz obr. 7.6).



Obr. 7.6: Teplotně nezávislý zdroj proudu s proudovým regulátorem LM334 [21, s. 7]

Velikost odporů lze určit podle rovnice [21, s. 8]:

$$I_{SET} = I_{BIAS} + I_1 + I_2 \quad (21)$$

$$- \text{kde } I_1 + I_{BIAS} = \frac{U_R}{R_1} \text{ a } I_2 = \frac{U_R + U_D}{R_2}$$

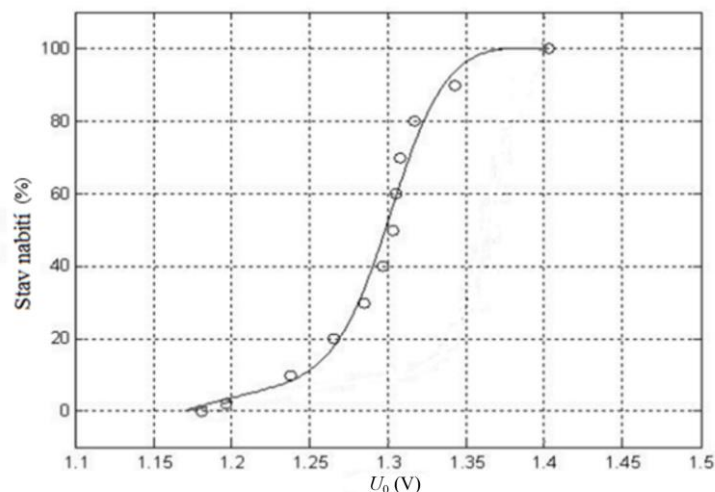
Během měření Peltierových modulů popsaného ve třetí kapitole jsem zvolil hodnoty  $R_1 = 75 \Omega$  a  $R_2 = 750 \Omega$ , tedy  $I_{SET} = 1,86 \text{ mA}$ . To je dostatečný proud na přesné měření a přiměřeně vzdálený hranici 2 mA, při jejímž překročení hrozí zničení termistoru. V samotném přístroji jsem pak kvůli šetření energií výstupní proud nastavil na 0,5 mA ( $R_1 = 270 \Omega$  a  $R_2 = 2700 \Omega$ ) pro každý ze senzorů. Tento proud postačuje pro měření teploty v cílovém rozsahu teplot.

### 7.3.6 NiMH akumulátor

Jak bylo řečeno, používám trojici standardních NiMH článků Sanyo Eneloop velikosti AA. Pro správnou funkci zařízení je třeba mít přehled o stavu nabití akumulátorů, což je ovšem u NiMH akumulátorů poměrně problém. Jediná spolehlivá a přesná metoda je měření výstupního proudu a času, po který je tento proud odebírán. Pak lze jednoduše spočítat, o kolik se takovým cyklem snížila dostupná kapacita akumulátoru. Je zřejmé, že pro správný výpočet je nutné, aby odebíraný proud byl konstantní, a také je třeba přesně znát stav nabití před započítáním měření. Tato metoda je tak pro mé zařízení zcela nepoužitelná.

Nicméně podle Windarka [22] lze aktuální stav nabití odhadnout podle velikosti napětí naprázdno. Při využití vylepšeného Takacsioho modelu lze redukovat chybu takového měření až na 10 % [22, s. 184]. Vzhledem k tomu, že se jedná o měření naprázdno, nelze touto metodou měřit stav nabití akumulátorů, když je zařízení v chodu. Musíme se tedy spokojit s jednorázovým měřením stavu nabití při zapnutí přístroje, kdy se na LCD displeji po dobu jedné minuty zobrazí stav nabití a poté zmizí. Důležité je, že měření stavu nabití je spolehlivé, pouze pokud byl akumulátor po dobu minimálně jedné hodiny odpojen od jakékoli zátěže [22, s. 184].

Při měření se dopouštím několika nepřesností. Předně mikrokontrolér, který měří napětí akumulátoru, je z něj sám napájen. Stejně tak je v době měření z akumulátoru napájen LCD displej a teplotní senzory. Proudový odběr v takovém stavu je sice minimální, ale nejedná se již o napětí naprázdno. Dále pak systém neví, zda byl akumulátor dostatečně dlouho v klidu, ani zda byl dostatečně dlouho ve vybíjecím cyklu. Rozhodl jsem se proto určovat pouze čtyři stavy: plně nabito, nabito minimálně na 2/3 plné kapacity, nabito minimálně na 1/3 plné kapacity a vybito. Závislost stavu nabití na napětí naprázdno při vybíjecím cyklu akumulátoru NiMH je na obr. 7.7.



Obr. 7.7: Závislost stavu nabití NiMH článku na napětí naprázdno, vybíjecí cyklus [22, s. 185]

Důležité je, že zmíněné nepřesnosti nemají vliv na měření krajních stavů. Mikrokontrolér tedy bezpečně ví (a prostřednictvím LCD informuje uživatele), kdy je akumulátor zcela vybitý nebo naopak zcela nabitý.

Zařízení sice pracuje s nízkými nabíjecími proudy a nemělo by tak dojít k poškození akumulátoru přebíjením, přesto je třeba nabíjení včas ukončit. Podle Windarka [22] dosáhne jeden NiMH článek během nabíjení proudem o velikosti 1C (proud číselně odpovídá kapacitě – pro akumulátor o kapacitě 1,9 Ah jde o proud velikosti 1,9 A) plné kapacity při napětí 1,52 V. Vzhledem k tomu, že nabíjecí proud v mém zařízení je maximálně cca 0,1C, rozhodl jsem se ukončit nabíjení, dosáhne-li jeden článek napětí 1,45 V. Nabíjení se ukončí jednoduše vypnutím obvodu LTC3105.

### 7.3.7 USB výstupy

Standardní USB konektor je vybaven čtyřmi vodiči: 5V, D+, D- a GND. Pro návrh USB nabíjecího portu existuje několik otevřených standardů. Tyto standardy definují maximální proud odebíraný z USB portu v závislosti na ošetření datových vodičů USB rozhraní. Nicméně není zřejmé, který výrobce mobilních zařízení se při výrobě svých zařízení drží kterého standardu nebo zda dokonce nemá svůj vlastní. (V případě velkých výrobců tomu tak bývá.) Neexistuje tak jednoduchý způsob, jak navrhnout napájecí USB konektor univerzální pro všechna USB zařízení.

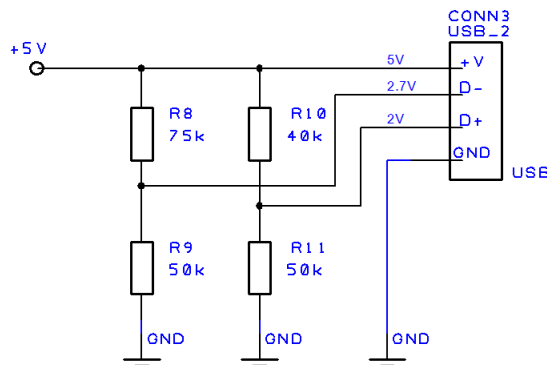
Jedno řešení je použití speciálního obvodu. Například firma Texas Instruments vyrábí dedikovaný čip s označením TPS2513A – USB Dedicated Charging Port Controller, který řeší tuto problematiku. Aktivně měří protékající proud a pokles vstupního napětí a podle situace a reakcí připojeného mobilního zařízení zvolí správný způsob ošetření datových vodičů USB rozhraní [23, s. 9].

Další možnost je provést ošetření datových pinů manuálně. Sami výrobci nezveřejňují své vlastní standardy, nicméně podle výzkumu společnosti Adafruit [24] jsou tyto standardy do jisté míry kompatibilní. Tato společnost vyrábí již třetí generaci svého USB nabíjecího zařízení, přičemž (stejně jako u všech svých produktů) otevřeně poskytuje jeho kompletní dokumentaci. Podle jejich zkušeností je možné přivedením správné kombinace napětí na datové vodiče vytvořit značně univerzální nabíjecí USB port se stanoveným maximálním proudovým odběrem. Na základě jejich poznatků, potvrzených mimo jiné také výzkumem společnosti Voltaic Systems [25] zabývající se stejnou problematikou, lze přivedením následující kombinace napětí na datové vodiče USB rozhraní nastavit maximální proudový odběr z USB portu:

pin D+	pin D-	maximální odebíraný proud
2 V	2 V	500 mA
2 V	2,75 V	900 mA
2,75 V	2 V	2 A
2,75 V	2,75 V	2,5 A

Tabulka 8: Ošetření datových pinů USB konektoru [23, s. 10], [24, s. 95] a [25]

Pro nabíjení z akumulátorů (konektor USB\_2) jsem zvolil druhou možnost a tedy nabíjecí proud 900 mA (zapojení na obr. 7.8). Nastavení jsem testoval s výrobky firem Nokia, Samsung, HTC a Acer. Všechna zkoušená zařízení na tuto konfiguraci reagovala správně a z portu odebírala proud do 900 mA. Zařízení nekompatibilní s tímto nastavením, by mělo odebírat proud maximálně 500 mA, který je standardní pro obyčejný USB port nebo by nemělo nabíjení vůbec zahájit. Pro případ selhání tohoto nastavení a obecně pro případ zkratu je přívodní vodič opatřen pojistkou o nominální hodnotě 1,25 A.



Obr. 7.8: Zapojení USB portu USB\_2

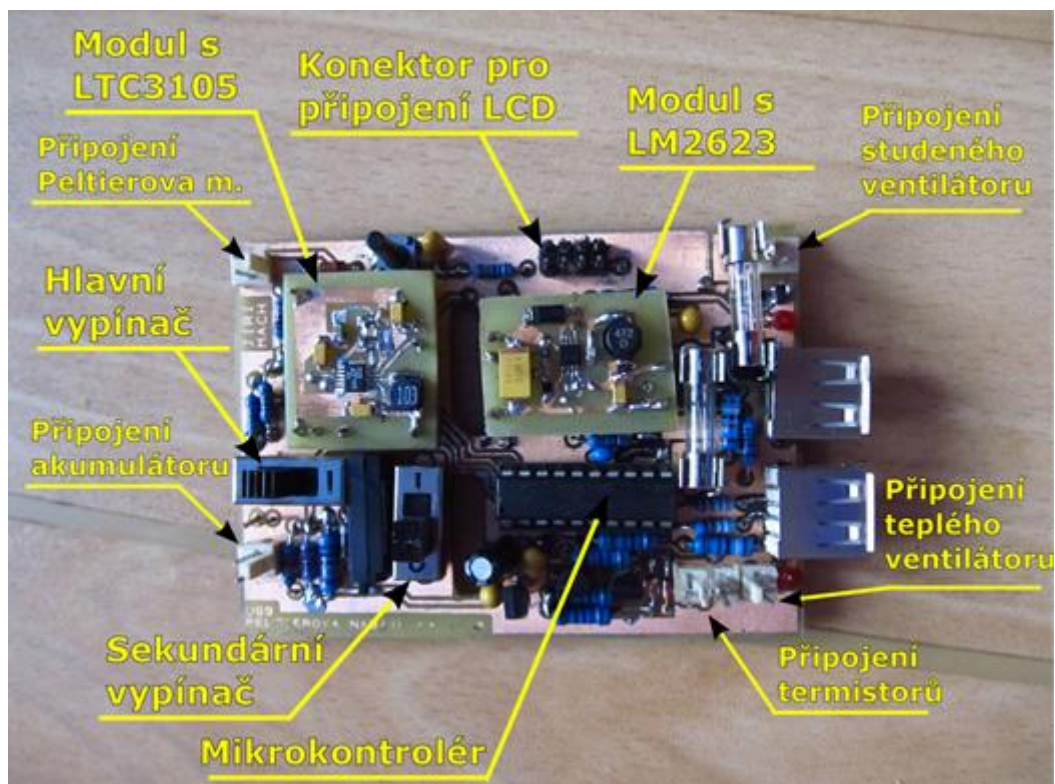
U konektoru USB\_1 (nabíjení z Peltierova modulu) jsem datové vodiče vzájemně propojil. To je nejjednodušší způsob, jak obecně označit USB port jako tzv. Dedicated Charging Port (DCP), tedy napájecí port neschopný datové komunikace. Takový port má mít datové vodiče spojené přes odpor nepřesahující  $200\ \Omega$  [23, s. 10]. Podle měření v takovém případě většina standardních USB zařízení nenechá napájecí napětí klesnout pod 4,5 V a odebírá tolik proudu, kolik USB port poskytne nebo kolik zařízení potřebuje. Toto chování jsem pozoroval u většiny zkoušených zařízení. Vzhledem k faktu, že maximální naměřený výstupní proud z obvodu LTC3105 je cca 280 mA a teoretické špičkové maximum je 400 mA, není ošetření maximálního odběru jako u portu USB\_2 potřeba.

## 7.4 Celkové obvodové řešení

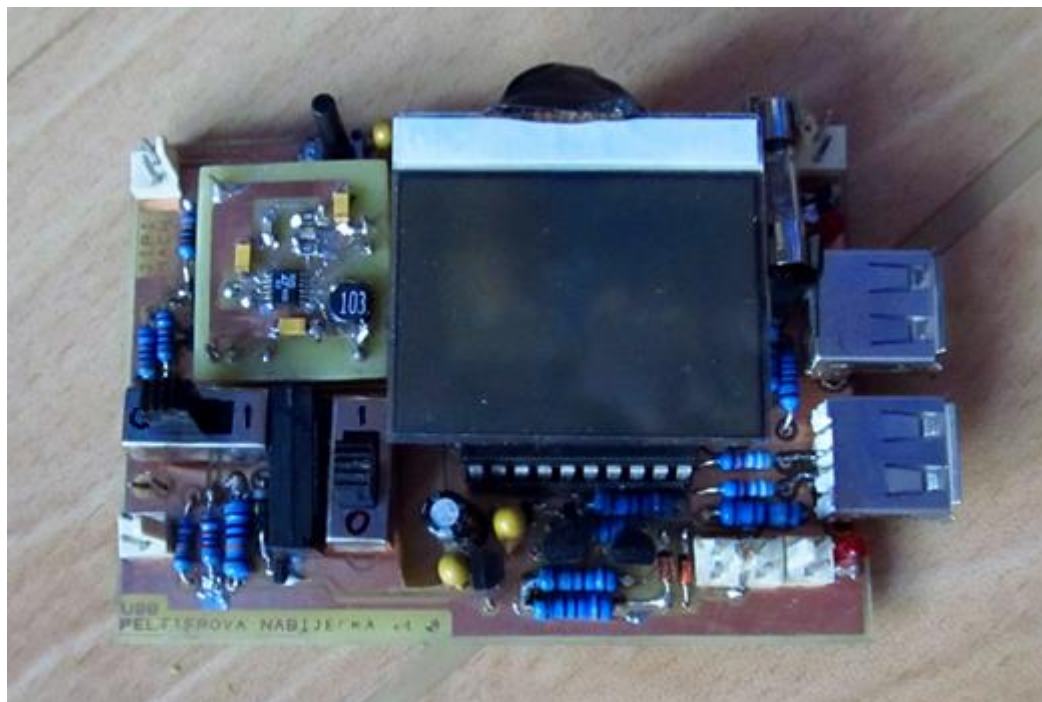
Celkové schéma zapojení včetně výrobních dat je přiloženo v příloze II.

Navržený obvod kromě již popsaných částí obsahuje Zenerovu diodu, která plní funkci přepětové ochrany vstupu obvodu LTC3105, jedno tlačítko připojené k mikrokontroléru přes pull-up rezistor, dvojici malovýkonových LED diod pro označení aktivního USB konektoru, napěťový dělič dělící napětí akumulátoru pro A/D převodník mikrokontroléru v poměru 3:2, dvojici posuvných přepínačů a jeden spínač, který spojuje výstup obvodu LTC3105 se zbytkem obvodu. Pro tento účel jsem použil malé relé DSS41A05. Druhá možnost byla použití spínačů s tranzistory MOSFET. Je zde ale komplikace, že se jedná o plovoucí spínač, který navíc musí být dimenzován minimálně na maximální výstupní proud obvodu LTC3105, který je 400 mA. Vzhledem k těmto skutečnostem jsem zvolil malé relé, které má oproti MOSFET spínačům důležitou výhodu v prakticky nulovém

odporu v sepnutém stavu. Je ale třeba počítat s proudovým odběrem cca 4–5 mA pro ovládací cívku relé.



Obr. 7.9: Vyrobená a osazená deska plošného spoje + popis hlavních částí (bez LCD)



Obr. 7.10: Vyrobená a osazená deska plošného spoje



Celý obvod v základním stavu – zapnutý mikrokontrolér, funkční měření teplot, aktivní LCD displej, rozepnuté relé, vypnutý obvod LTC3105, zapnutý obvod LM2623, obě diody zhasnuté – odebírá z akumulátoru proud o velikosti cca 2,5 mA.

## 8. Popis funkce zařízení

### 8.1 Podrobný popis funkce

Přístroj má celkem čtyři pracovní režimy. Aktivní režim je vždy indikován velkou číslicí v pravém dolním rohu LCD displeje.

Po zapnutí přístroje hlavním vypínačem (SW3) se přístroj spustí v prvním pracovním módu. V tomto stavu je možné ihned nabíjet USB zařízení z integrovaného akumulátoru, což je indikováno příslušnou LED diodou vedle aktivního USB konektoru. Pokud uživatel chce nabíjet USB zařízení nebo vnitřní akumulátor pomocí termoelektrického generátoru, stačí, když v tomto okamžiku zapálí tepelný zdroj. Zařízení samo pozná růst teplot a přejde do druhého pracovního módu – začne nabíjet akumulátor.

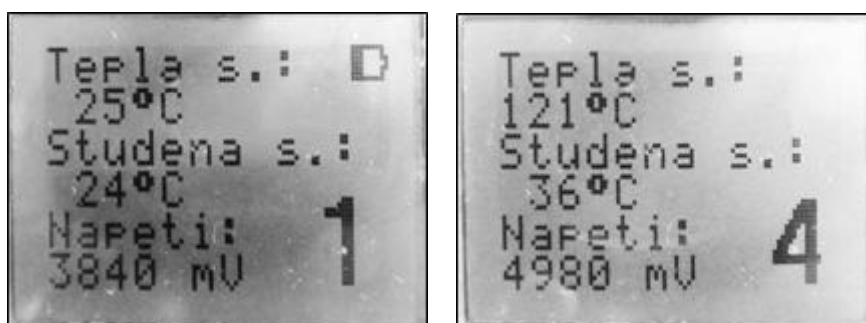
Z důvodu co nejvyšší variability a praktičnosti je možné zařízení používat s různými tepelnými zdroji – svíčky, lihové kahany, kostky pevného lihu atp. Mikrokontrolér v reálném čase monitoruje dodávaný tepelný výkon a v případě, že je dostatečný, umožní přesměrování nabíjecího proudu na USB výstup. O této skutečnosti informuje uživatele rozblíknutím číslice aktivního módu a uživatel ji v případě zájmu potvrdí stiskem tlačítka SW4. Tím přístroj přejde do třetího pracovního módu, rozsvítí LED diodu u prvního USB konektoru a uživatel může připojit své USB zařízení. V této chvíli bude USB zařízení nabíjeno přímo z termoelektrického generátoru, nicméně ventilátory spolu s ostatní elektronikou budou napájeny z akumulátoru. Stiskem tlačítka se lze vrátit zpět do druhého pracovního módu a nabíjet akumulátor.

Zařízení lze použít i bez vestavěného akumulátoru. Pokud chce uživatel nabíjet USB zařízení a nemá k dispozici dostatečně nabitý akumulátor nebo jej nechce použít, zapálí tepelný zdroj, nechá vypnutý hlavní vypínač SW3 a místo něj zapne sekundární vypínač SW2. Po dosažení dostatečného rozdílu teplot zařízení naběhne a započne normální funkci. Ihned po náběhu samo pozná, že není připojen akumulátor a přejde do čtvrtého pracovního režimu. Po dosažení teplotního rozdílu dostatečného pro nabíjení USB se rozsvítí LED dioda u prvního USB konektoru a uživatel může připojit své USB zařízení. Při uvádění přístroje do tohoto režimu je vhodné, aby byl celý přístroj vychladlý (aby se ihned po náběhu neroztácel ventilátor). Také je vhodné po zapálení tepelného zdroje vyčkat přibližně

jednu minutu a až poté zařízení zapnout. Tím se docílí snazšího náběhu obvodu LTC3105 a bezproblémového startu přístroje.

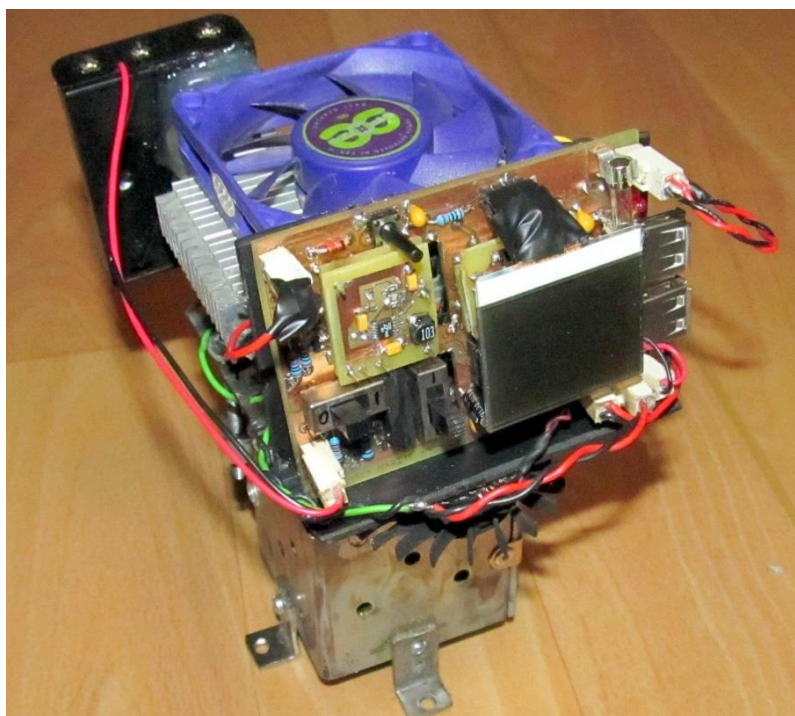
Pokud chce uživatel ukončit nabíjení, uhasí tepelný zdroj a zařízení vypne příslušným přepínačem. Před tím lze přidržet tlačítka SW4 po dobu minimálně pěti sekund roztočit naplnit oba ventilátory a zchladit tak celé zařízení.

Při manipulaci se zařízením je důležité zvedat jej za studený chladič, neboť spodní část zařízení může být po delším nabíjení velmi horká.



Obr. 8.1: Náhledy rozložení displeje

Na následujícím obrázku je fotografie celého zařízení. Další fotografie jsou přiloženy v příloze V a na přiloženém CD.



Obr. 8.2: Fotografie celého zařízení

## 8.2 Programové řešení

Po inicializaci všech používaných periférií program provede jedno měření napětí na akumulátoru a provede odhad stavu nabití postupem popsáním v kapitole 7.3.6. Tento údaj po dobu jedné minuty zobrazí na displej (viz kapitolu 7.3.6). Po odměření napětí vstoupí do nekonečné smyčky. V každé její iteraci provádí čtení aktuálních stavů – teplot a napětí akumulátoru a na základě naměřených údajů provádí následující akce.

### Ovládání hlavního ventilátoru

Hlavní ventilátor slouží k chlazení studené strany termoelektrického generátoru. Jeho otáčky se nastavují v závislosti na aktuální teplotě studené strany a velikosti teplotního rozdílu. Pokud je teplotní rozdíl menší než 75 °C, roztočí se ventilátor na první rychlostní stupeň po překročení teploty 60 °C, a to na dobu 2,5 minuty. Pokud po uplynutí této doby teplota poklesne, zastaví se. Pokud je teplotní rozdíl vyšší než 75 °C, roztočí se ventilátor na první rychlostní stupeň již při překročení teploty 45 °C a na druhý rychlostní stupeň (maximální otáčky) při překročení 55 °C. Po přechodu na vyšší rychlostní stupeň se ovládání rychlosti ventilátoru na 20 sekund uzamkne, aby zbytečně nedocházelo k neustálému přepínání mezi stavy. To je důležité především při přechodu mezi vypnutým stavem a prvním rychlostním stupněm, neboť ventilátor pro roztočení na nižší otáčky potřebuje krátký impuls (200 ms) plného napájecího napětí aby se bez problémů roztočil.

Tento dvojitý režim v závislosti na teplotním rozdílu jsem zvolil z důvodu, že při použití slabšího tepelného zdroje nebo obecně při nižších teplotách se energeticky vyplatí neroztáčet ventilátor tak brzy jako při použití silného tepelného zdroje. Na první rychlostní stupeň je příkon ventilátoru 0,15 W, na druhý 0,32 W, přičemž ani při teplotě teplé strany 180 °C se hlavní ventilátor netočí neustále maximální rychlostí. Zkušenost ukázala, že dvě úrovně rychlosti otáčení jsou pro hlídání studené strany dostačující.

### Sekundární ventilátor

Ventilátor na teplé straně přístroje hlídá maximální teplotu teplé strany Peltierova modulu. V případě, že dojde k překročení teploty 180 °C, roztočí se ventilátor na první rychlostní stupeň, pokud teplota přesáhne 185 °C, roztočí se ventilátor na druhý rychlostní stupeň a při překročení teploty 200 °C se ventilátor roztočí na maximální otáčky. Hodnotu 180 °C (na

snížení teploty stačí v drtivé většině případů nejnižší otáčky ventilátoru) jsem zvolil jako vhodné maximum vzhledem k možnostem celé konstrukce.

### **Ostatní**

Následně mikrokontrolér podle vypočítaného rozdílu teplot nastaví referenční odpor pro MPPC obvod obvodu LTC3105. Poté vypíše na displej aktuální hodnoty teplot na obou stranách a naměřené napětí na akumulátoru (v případě čtvrtého módu se jedná o výstupní napětí obvodu LTC3105).

### **Stavový automat**

Dále se ve smyčce nachází stavový automat, který rozhoduje o aktuálním pracovním režimu přístroje. Jak bylo řečeno, přístroj má čtyři pracovní módy. Stav jednotlivých komponent v těchto pracovních režimech jsou následující:

mód	1	2	3	4
SW3 (hlavní)	sepnutý	sepnutý	sepnutý	rozepnutý
SW2 (sekundární)	rozepnutý	rozepnutý	rozepnutý	sepnutý
akumulátor	připojen	připojen	připojen	odpojen
LTC3105	vypnutý	zapnutý	zapnutý	zapnutý
LM2623	zapnutý	zapnutý	zapnutý	zapnutý*
relé	rozepnuto	sepnuto	rozepnuto	rozepnuto
USB_1	neaktivní	neaktivní	aktivní	aktivní
USB_2	aktivní	neaktivní	neaktivní	neaktivní

Tabulka 9: Přehled pracovních režimů přístroje

\*Obvod LM2623 zůstává ve čtvrtém režimu oproti původnímu plánu zapnutý, neboť i malý pokles výstupního napětí obvodu LTC3105, který obvykle nastane při připojení mobilního zařízení k USB portu, má poměrně velký vliv na otáčky ventilátorů. Zapnutý obvod LM2623 těmto poklesům v místě napájení ventilátorů zabrání. Ztráty tímto způsobené nejsou veliké, neboť účinnost obvodu LM2623 je nejvyšší při malém rozdílu vstupního a výstupního napětí [19, s. 5].

Mezi prvními dvěma režimy přechází přístroj automaticky podle aktuálně naměřeného teplotního rozdílu. Přejít z druhého do třetího režimu (pokud je umožněn) stvrzuje uživatel pomocí tlačítka. Zpět ze třetího módu do druhého lze přejít pouze opětovným stiskem tlačítka.

Ve čtvrtém módu přístroj pracuje pouze z energie generované Peltierovým modulem. Pokud je akumulátor odpojen a zařízení je napájeno z termoelektrického generátoru,

mikrokontrolér místo napětí akumulátoru měří výstupní napětí obvodu LTC3105, které je cca 5 V. Tím pozná, že má zařízení přepnout do čtvrtého režimu. Z tohoto režimu nelze přecházet do jiného jinak, než vypnutím celého přístroje a opětovným startem.

Obslužný program jsem psal v programovacím jazyce C. Používal jsem vývojové prostředí MPLAB X IDE a překladač MPLAB XC8. Zdrojové soubory jsou přiloženy na příloženém CD – příloha C.

## 9. Měření na zařízení

### 9.1 Měření na LM2623

Na obvodu jsem provedl dvojici měření. Prvně jsem měřil účinnost při nastaveném výstupním napětí 5 V, vstupním napětí cca 3,8 V (trojice NiMH akumulátorů) a výstupním proudem 300 mA do odporové zátěže. Výsledná účinnost byla necelých 85 %.

Dále jsem provedl měření přímo na hotovém nabíjecím zařízení. Zařízení se nacházelo v prvním pracovním módu a na příslušný USB konektor byl připojen mobilní telefon. Obvod LM2623 byl zapnutý a napájel pouze mobilní telefon. Akumulátor kromě toho ještě napájel vestavěnou elektroniku (cca 0,008 W). Výsledky měření jsou následující:

Vstupní strana	Výstupní strana
$I_1 = 1,5 \text{ A}$	$I_2 = 800 \text{ mA}$
$U_1 = 3,2 \text{ V}$	$U_2 = 4,77 \text{ V}$
$P_1 = 4,8 - 0,008 \text{ W}$	$P_2 = 3,82 \text{ W}$
$\eta = 79,7 \%$	

Tabulka 10: Měření na obvodu LM2623

### 9.2 Měření na LTC3105

Na obvodu LTC3105 jsem provedl měření účinnosti v reálných podmínkách na zkonstruovaném zařízení. To jsem uvedl do chodu a přepnul do třetího pracovního režimu, kdy je veškerá elektronika napájena z akumulátoru a všechna energie získaná z Peltierova modulu je využita k nabíjení USB zařízení. Na USB konektor jsem připojil standardní mobilní telefon. Souhrn měření:

Teplota teplé strany	178 °C
Teplota studené strany	55 °C
Teplotní spád	123 °C
Výstupní napětí	4,52 V
Špičkový výstupní proud	273 mA
Nabíjecí výkon	1,234 W
Teoretický maximální příkon od Peltierova modulu (obr. 5.10)	2,1 W
Maximální účinnost	59 %

Tabulka 11: Měření na obvodu LTC3105

Hodnota účinnosti je vypočítána z teoretické maximální hodnoty výkonu, kterou je termoelektrický generátor schopen dodat do zátěže. Nezahrnuje tak pouze samotnou účinnost obvodu LTC3105, ale celkovou účinnost získávání energie z Peltierova modulu.

Je třeba dodat, že ne každé mobilní zařízení odebírá z nabíjecího zařízení stejný proud. Z mobilních telefonů a tabletů jsem zkoušel produkty firem Nokia, HTC, Acer a Samsung. Všechny úspěšně zahájily nabíjení, nicméně maximální nabíjecí výkon se za stejných podmínek pohyboval v rozmezí 0,8 W až zmíněných 1,23 W.

### 9.3 Měření celkové účinnosti zařízení

Zde se pokusíme vypočítat celkovou energetickou účinnost zařízení. Nejprve potřebujeme znát dodaný tepelný výkon. Použil jsem lihový kahan a nastavil výšku knotu tak, aby vzniklý plamen vytvářel ideální podmínky pro nabíjecí zařízení – teplota teplé strany 170–180 °C. V takovém stavu za 43 minut hoření vyhoří cca 12 ml lihu. Hustota lihu je 800 kg/m<sup>3</sup>. To dává podle rovnice (22) hmotnost vyhořelého lihu 10 g. Při výhřevnosti lihu 29 MJ/kg je uvolněná energie z 10 g paliva 290 kJ (rovnice (23)). Se znalostí času, po který se tato energie uvolňovala, můžeme vypočítat výkon plamene kahanu podle rovnice (24). Výsledek je 118 W.

Podle měření v kapitole 9.2 (probíhalo současně), poskytuje nabíjecí zařízení špičkový proud 273 mA při výstupním napětí 4,52 V – tedy maximální výkon 1,23 W. Podle rovnice (25) je pak celková energetická účinnost přeměny energie 1,08 %. Provedl jsem celkem tři měření, vždy s výsledkem v rozmezí 1–1,15 %. Vztahy použité pro výpočty:

$$m = \rho \cdot V \quad (22)$$

$$H = \frac{Q}{m} \quad (23)$$

$$P = \frac{E}{t} \quad (24)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (25)$$



Takto vypočítaná účinnost platí pro přeměnu tepelné energie zdrojového plamene na elektrickou energii. Pro korektní stanovení energetické účinnosti celého napájecího zařízení při běhu pouze z termoelektrického generátoru musíme od nabíjecího výkonu odečíst příkon ventilátoru a ostatní elektroniky, který činí průměrně cca 0,25 W. Pak se celková energetická účinnost nabíjení rovná asi 0,9 %. V obou případech jde o hodnoty, kdy zařízení produkuje maximální možný elektrický výkon.

Hodnota okolo 1 % se může zdát velmi nízká, nicméně je třeba si uvědomit, že k významným ztrátám dochází již při přenosu energie z plamene na termoelektrický generátor. Ty lze ovlivnit především mechanickou konstrukcí. K dalším ztrátám dochází přímo na termoelektrickém generátoru, který má účinnost asi 5–8 % [1]. Dále se do výsledku promítá účinnost obvodu LTC3105 a vliv nedokonalého přizpůsobení zátěže termoelektrického generátoru.

## 10. Vyhodnocení dosažených výsledků

Navržené a zkonstruované zařízení úspěšně nabíjí nebo napájí veškerá testovaná USB zařízení – mobilní telefony, tablety, MP3 přehrávače, automobilové a turistické navigace a další drobnou elektroniku. Nicméně nejen vzhledem k výsledkům měření (kapitola 8) je zde nemalý prostor pro zlepšení. V následujících kapitolách uvádím shrnutí klíčových vlastností postaveného zařízení a návrhy na možná vylepšení.

### 10.1 Shrnutí hlavních vlastností

Zkonstruované zařízení je schopné s využitím vhodného tepelného zdroje nabíjet naprostou většinu standardních USB zařízení. Špičkový produkovaný výkon při uvažovaném maximálním teplotním rozdílu 125 °C je 1,23 W, ustálený pak 1,1 W. V tomto stavu je účinnost získávání energie z termoelektrického generátoru 59 % a celková účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou asi 1,1 %. Výkon nespotřebovaný pro napájení elektroniky a ventilátorů (spotřeba průměrně 0,2–0,25 W) lze využít buď k nabíjení USB zařízení přes USB výstup, nebo k nabíjení NiMH AA článků. Ty lze navíc využít k napájení elektroniky během nabíjení USB zařízení přes termoelektrický generátor nebo k nabíjení USB zařízení bez použití termoelektrického generátoru. V takovém případě je dostupný nabíjecí výkon 4,5 W a účinnost nabíjení cca 80 %.

### 10.2 Diskuse jednotlivých částí a návrhy na zlepšení

#### Mechanická konstrukce

Nemalá vylepšení by si zasloužila mechanická konstrukce zařízení. Celá elektronika by měla být vhodně umístěná do tepelně oddělené, případně i odvětrávané krabičky. Současné umístění obvodu po boku chladiče jsem zvolil hlavně proto, že se jedná o prototyp především z hlediska funkce, tudíž je přednější dostupnost celého obvodu pro měření či pro případné úpravy zapojení. Pouze pro zachování správné cirkulace vzduchu jsem v desce plošného spoje udělal otvory v místech, kudy proudí vzduch směrem od chladiče.

Dále by bylo dobré provést další testování konstrukce s vodním chlazením, která má jistě potenciál a v případě profesionální konstrukce by mohla překonat nevýhody zmíněné

v kapitole 6.3. Nicméně i poté by konstrukci s aktivním chlazením zůstala její hlavní výhoda v podobě dlouhodobě ustáleného stavu teplot.

### **Tepelný zdroj**

V případě stavby nového prototypu by bylo třeba zvážit, zda se držet strategie použití univerzálního tepelného zdroje. Po celou dobu byl návrh směřován k použití s co nejvíce dostupnými tepelnými zdroji, především tedy běžně dostupnými druhy svíček. Nicméně například s tzv. iluminační svíčkou, která má na svíčku poměrně velký plamen, dokáže zařízení poskytnout pro vestavěný akumulátor nabíjecí proud o průměrné velikosti pouze 35 mA. Nabíjení použitých akumulátorů by tímto proudem trvalo asi 54 hodin. Nabíjet USB zařízení v takovém případě není možné vůbec, neboť nabíjecí výkon kolísá podle aktuálních otáček ventilátoru. Pak je otázkou priorit, zda je takový stav dostatečně užitečný. Pokud nikoli, bylo by vhodné integrovat dostatečně silný teplotní zdroj přímo do konstrukce, a to buď v podobě integrovaného lihového kahanu, nebo plynového hořáku.

### **Elektronika**

První návrh se týká primárního DC/DC měniče. Vybraný obvod LTC3105 disponuje technologií hlídání bodu maximálního výkonu (MPPC) a měl by tak být schopný držet termoelektrický generátor v oblasti jeho ideálního pracovního bodu. Nicméně se ukázalo, že obvod MPPC pracuje správně pouze do určité velikosti vstupního napětí. Z tohoto důvodu dochází ke ztrátám vlivem neideálního zatížení Peltierova modulu. Bylo by tedy vhodné vyzkoušet jiné konfigurace obvodu LTC3105 (např. nastavení jiného výstupního napětí nebo zvolení jiného induktoru) a zkoumat chování MPPC obvodu. Především použití kvalitnějšího induktoru by mohlo mít nemalý vliv. Nepodařilo se mi totiž sehnat induktor přímo doporučený výrobcem a byl jsem tak nucen zvolit jinou alternativu. Druhá možnost by byla vyzkoušet jiný přístup ke kontrole bodu maximálního výkonu, nejjednodušeji vyzkoušením obvodů od jiných výrobců. Přesto při využití maximálního potenciálu zařízení, činí výstupní výkon přibližně 60 % teoretického maxima, který je použitý termoelektrický generátor schopen produkovat, což není úplně špatná hodnota.

Dále je opět třeba zvážit tepelný zdroj. Pokud by zařízení mělo integrovaný dostatečně silný tepelný zdroj, nemuseli bychom trvat na správné funkci obvodu i při nižších rozdílech

teplot a na místo obvodu typu LTC3105 by pak bylo možné vyzkoušet mnohem levnější konvenční zvyšující DC/DC měnič typu obvodu LM2623 a zjistit, jaký by tato volba měla vliv na maximální účinnost zařízení. To by ovšem bylo za cenu zbavení se možnosti nabíjení při nižších rozdílech teplot a vzniku možných problémů při náběhu zařízení přímo z termoelektrického generátoru. Nízké startovací napětí obvodu LTC3105 totiž umožňuje mikrokontroléru získat kontrolu nad zařízením už od opravdu nízkých rozdílů teplot i bez použití akumulátoru. Konvenční DC/DC měniče také běžně nedisponují technologií MPPC. Popsané skutečnosti a případný přínos by tak byly předmětem dalšího testování.

Co se týče ostatní elektroniky, navrhl bych další dvě vylepšení. Bylo by vhodné, aby mikrokontrolér mohl v případě potřeby použitím vhodného spínacího prvku fyzicky odpojit nabíjecí výstupy od USB portu. V současné době se nabíjení ukončuje vypínáním DC/DC měničů, ale i po jejich vypnutí zůstává připojené mobilní zařízení galvanicky spojené se zbytkem obvodu. Tento problém se týká především konektoru USB\_2, neboť obvod LM2623 po vypnutí propouští vstupní napětí na výstup a pokud po jeho vypnutí zůstane připojené USB zařízení, může z akumulátoru stále odebírat určitý proud.

Dále bych přístroj doplnil o malý elektroakustický měnič. Ten by současně s LCD displejem informoval uživatele, že došlo k nějaké změně stavu a byl by schopen upozornit uživatele v případě, že by se přístroji z nějakého důvodu nedařilo snížit teplotu a hrozilo by tak poškození přehřátím.

### **Termoelektrický generátor**

V oblasti termoelektrického generátoru jsem neměl příliš na výběr a byl jsem omezen nejen cenou, ale především trhem. Nicméně každý z trojice zkoušených modulů má své výhody. Přes značně nejvyšší výkon bych modul TEC1-12710HTS, vzhledem k jeho malé tloušťce a tím vysoké tepelené vodivosti, označil jako nejméně vhodný. Naopak TEC1-12703 sice generuje nejnižší výkon, ale vzhledem k jeho tloušťce by se na něm teplotní rozdíl vytvářel a držel mnohem snáz (viz měření na obrázku 5.9). Jeho výkonová křivka je navíc velmi podobná nakonec použitému modulu TEC1-12705HT, ale jeho maximální přípustná teplota je nízká – pouhých 138 °C. Vylepšení by tak jistě bylo použít článek TEC1-12703 ve variantě T200, tedy s maximální přípustnou teplotou 225 °C. V době vzniku této práce však nebyl tento článek dostupný.

Další možnost je použití pravého TEG termoelektrického generátoru. Nicméně ve srovnání s TEG10W (kapitola 5.4.1) je vidět, že ve stanoveném pracovním rozsahu teplot by přidaná hodnota třikrát dražšího generátoru byla minimální. TEG generátor by se vyplatil až při jeho využití při vysokých teplotách daleko nad 200 °C, to by ovšem vyžadovalo naprosto jiný přístup ke konstrukci zařízení i k návrhu elektroniky.

Poslední možnost vylepšení by byla použít TEC modul o rozměrech 5 × 5 cm. Ten disponuje vyšším počtem termočlánků a tedy vyšším generovaným výkonem. Větší rozměry jsou ovšem zároveň spojené s vyšší tepelnou vodivostí. Další problém je opět dostupnost a cenový nárůst. Případný přínos by tak byl otázkou dalšího testování.

### 10.3 Cenová kalkulace

Zde uvádím přibližnou cenovou kalkulaci výhradně elektronických komponent. Tato kalkulace tedy nezahrnuje komponenty mechanické konstrukce, práci, používaný software a další podobné položky a slouží tak výhradně k orientační představě o nákladech elektronické výbavy.

Peltierův modul TEC1-12705HT	250 Kč
mikrokontrolér PIC16LF1559	58 Kč
LTC3105	185 Kč
LTC3105 – externí součástky	43 Kč
LM2623	54 Kč
LM2623 – externí součástky	66 Kč
LCD displej	100 Kč
akumulátor	237 Kč
ostatní součástky	236 Kč
<b>celková cena elektroniky</b>	<b>1 287 Kč</b>

Tabulka 12: Cenová kalkulace elektroniky

## 11. Závěr

V předložené práci jsem nejprve provedl shrnutí teoretických poznatků týkajících se hlavních komponent navrhovaného nabíjecího zařízení. V teoretickém úvodu je tak podrobně popsán Seebeckův jev a na něm založený termoelektrický generátor. Součástí jsou i informace o spínaných zdrojích, které jsem ve své práci také využíval.

Dále jsem provedl měření na Peltierových modulech, které jsem dostal k dispozici. Navrhl jsem způsob měření, sestavil měřicí pracoviště a provedl několik měření. Všechna jsem pečlivě zpracoval a zdokumentoval.

Na základě teoretických poznatků a poznatků z provedených měření jsem provedl návrh napájecího zařízení využívající termoelektrický generátor, a to v bodech: návrh funkce, mechanická konstrukce, elektrické zapojení, výběr elektronických komponent a programové řešení. Poté jsem se pustil do výroby zařízení. Vyrobil jsem navržené mechanické konstrukce a provedl testovací měření, na jejichž základě jsem vybral tu nejvhodnější. Navrhl jsem desku plošného spoje, vyrobil ji, osadil a oživil. Nakonec jsem napsal obslužný software pro mikrokontrolér.

Na zkonstruovaném zařízení jsem provedl několik měření, zdokumentoval jsem výsledky a na jejich základě vyhodnotil dosažené výsledky a navrhl možné postupy na další vylepšení.

## Použitá literatura

- [1] FLEURIAL, J.P., P. GOGNA, B.C-Y. LI, S. FIRDOSY, B.J. CHEN, C.-K. HUANG, V. RAVI, T. CAILLAT a K. STAR. Waste heat recovery opportunities for thermoelectric generators. *2009 Thermoelectric Applications Workshop* [online]. 2009 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/fleurial.pdf>
- [2] WOJCIECHOWSKI, Janusz. *Amatérské elektronické modely*. 2. vyd. Překlad Vladimír Kašša, Ivan Spudil. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1975, 582 s.
- [3] WÜSTENHAGEN, Volker. *Advanced nanotechnology: The Promise and Problems of Thermoelectric Generators*. Dostupné z: [http://www.o-flexx.com/fileadmin/media/documents/chip\\_silver\\_edition\\_-\\_The\\_promise\\_and\\_problems\\_of\\_thermoelectric\\_generators.pdf](http://www.o-flexx.com/fileadmin/media/documents/chip_silver_edition_-_The_promise_and_problems_of_thermoelectric_generators.pdf)
- [4] HUSÁK, M.: *Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým princípem*, DPS – Elektronika od A do Z, 2014, vol.2, p. 4.-11., ISSN: 1805-5044
- [5] SNYDER, G. Jeffrey. *The Electrochemical Society: Small Thermoelectric Generators*. 2008. Dostupné z: [https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08\\_p54-56.pdf](https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf)
- [6] BIOLITE. Webové stránky spoločnosti BioLite [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.biolitestove.com>
- [7] REICHL, Jaroslav, Martin VŠETIČKA. *Multimedialní Encyklopedie Fyziky* [online]. 2006. vyd. [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [8] TUTORVISTA. *Physics IV: Thermoelectricity*. TutorVista. [online] [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/thermal-chemical-currents/thermoelectricity.php>
- [9] GROMOV, G. *Thermoelectric Cooling Modules*. [online]. GLOBAL PHOTONICS APPLICATIONS & TECHNOLOGY [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: [http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric\\_Cooling\\_Modules.pdf](http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf)
- [10] CHAVEZ, J.A., J.A. ORTEGA, J. SALAZAR, A. TURO a M.J. GARCIA. SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects. In: *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]* [online]. 2000 [cit. 2015-04-29]. DOI: 10.1109/imtc.2000.848895. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=848895>

- [11] HUSÁK, Miroslav. *Napájecí zdroje v elektronice*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 9788001017647.
- [12] THERMONAMIC. *Specification of Thermoelectric Module TEC1-12703*. Katalogový list. Thermonamic [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.thermonamic.com/TEC1-12703-English.pdf>
- [13] THERMONAMIC. *Specification of Thermoelectric Module TEC1-12705*. Katalogový list. Thermonamic. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.thermonamic.com/TEHC1-12705-English.pdf>
- [14] THERMONAMIC. *Specification of Thermoelectric Module TEC1-12710*. Katalogový list. Thermonamic. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.thermonamic.com/TEC1-12710-English.pdf>
- [15] PHILLIPS, Samuel S. *Characterizing the thermal efficiency of thermoelectric modules*. [online]. 2009 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/54524#files-area>
- [16] TEG PRO. *10 Watt Thermoelectric Module*. Katalogový list. TEG PRO [online]. [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://www.tegmart.com/datasheets/TGPR-10W4V-40S.pdf>
- [17] KAZDA, V. *Výpočty chlazení elektronických součástí s řešenými příklady*. Pracovní text pro SPŠE a VOŠ Pardubice. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [18] LINEAR TECHNOLOGY. *LTC3105: 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up*. Katalogový list. Linear Technology Corporation. 2010. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fa.pdf>
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *LM2623: General-Purpose, Gated-Oscillator-Based DC/DC Boost Converter*. Katalogový list. Texas Instruments. 2004. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2623.pdf>
- [20] NXP. *KTY84 series: Silicon temperature sensors*. Katalogový list. NXP B.V. 2008. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/KTY84\\_SER.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/KTY84_SER.pdf)
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources*. katalogový list. Texas Instruments. 2000. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm234.pdf>



- [22] WINDARKO, Ayub a Jaeho CHOI. *SOC Estimation Based on OCV for NiMH Batteries Using an Improved Takacs Model*. Journal of Power Electronics [online]. 2010, roč. 10, č. 2 [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.6113. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/236147693\\_SOC\\_Estimation\\_Based\\_on\\_OCV\\_for\\_NiMH\\_Batteries\\_Using\\_an\\_Improved\\_Takacs\\_Model](http://www.researchgate.net/publication/236147693_SOC_Estimation_Based_on_OCV_for_NiMH_Batteries_Using_an_Improved_Takacs_Model)
- [23] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS2513A - USB Dedicated Charging Port Controller*. Katalogový list. Texas Instruments [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2513a.pdf>
- [24] LADYADA. ADAFRUIT INDUSTRIES. *Adafruit learning system: Minty Boost* [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/downloads/pdf/minty-boost.pdf>
- [25] STEARNS, Phillip. *Choosing USB Pin Voltages for iPhones and iPads – Update for iPhone 5*. Voltaic Systems 2011. Dostupné z: <http://www.voltaicsystems.com/blog/choosing-usb-pin-voltages-for-iphones-and-ipads/>
- [26] LONG-XIAN, Ni. *A high efficiency step-up DC/DC converter for thermoelectric generator with wide input voltage range: 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2012)* [online]. Hangzhou, China, 2012, s. 52-57 [cit. 2015-02-02]. ISBN 1467301590. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6237058>
- [27] SNIHIR, Iryna, William REY, Evgeny VERBITSKIY, Afifa BELFADHEL-AYEB a Peter H.L. NOTTEN. *Journal of Power Sources: Battery open-circuit voltage estimation by a method of statistical analysis*. [online]. 2006, 1484–1487 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305016460>
- [28] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 1. vyd. Praha: BEN, 1996, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [29] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. Malá elektrotechnická knihovna. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [30] LINEYKIN, Simon a Sam BEN-YAAKOV. *2005 IEEE 36th PowerElectronic [i.e. Electronics] Specialists Conference (PESC): Analysis of thermoelectric coolers by a spice-compatible equivalent-circuit model*. Recife, Brazil, 12-16 June 2005 [online]. Piscataway, N.J.: IEEE Service Center, 2005, s. 608-612. ISBN 9780780390331.

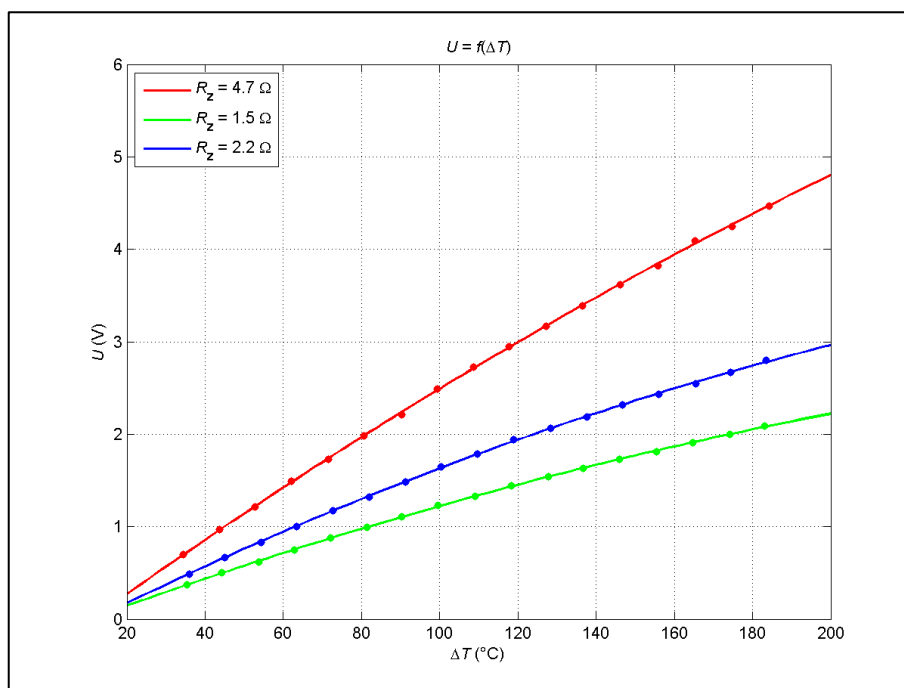
# Přílohy

## Příloha I – Výsledky měření Peltierových modulů

Pro každý měřený modul jsem vynesl trojici grafů. Na prvním z nich jsou naměřené průběhy napětí na různých zatěžovacích odporech. Na druhém vypočítaný ztrátový výkon na měřených zatěžovacích odporech a na třetím grafu jsou vypočítané parametry náhradního elektrického zapojení. Jedná se o průměr ze dvou nezávislých měření na různých zatěžovacích odporech.

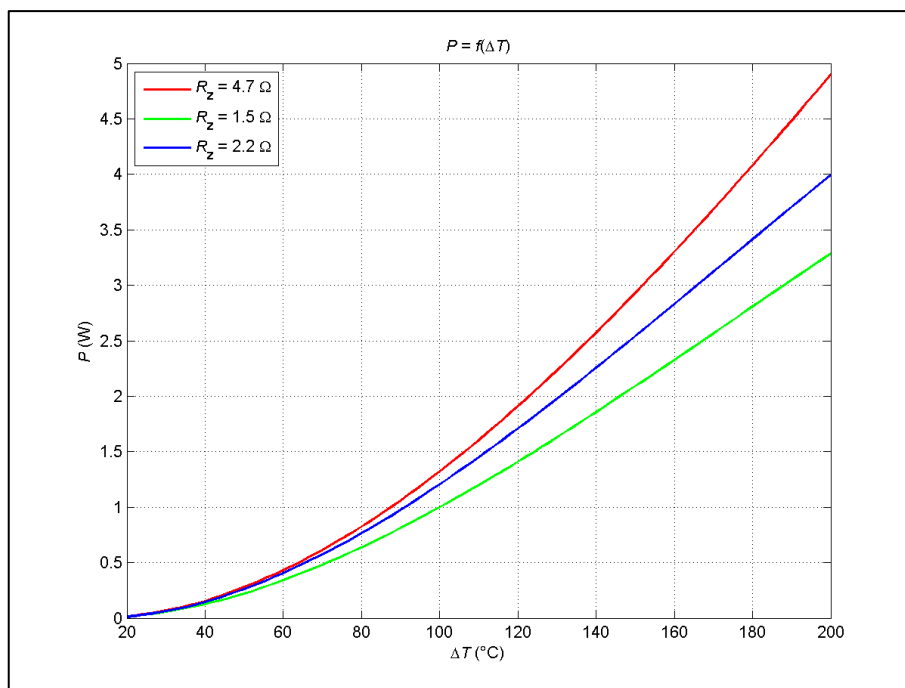
### TEC1-12703

tloušťka modulu 4,7 mm

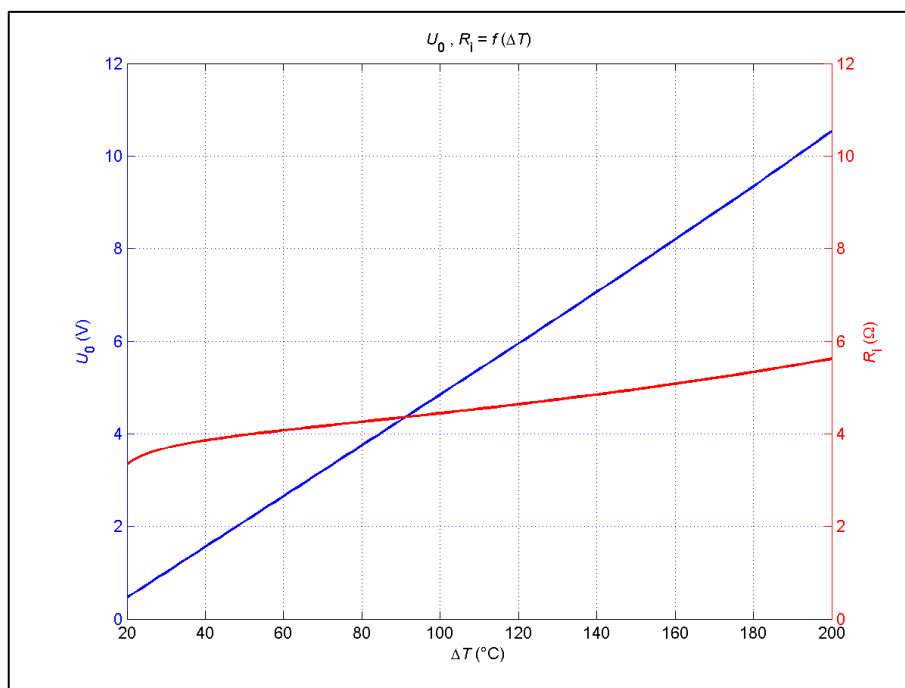


TEC1-12703 – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot

V případě Peltierova modulu TEC1-12703 se jedná o variantu T100, maximální přípustná teplota je tedy 138 °C a dlouhodobá pracovní teplota maximálně 100 °C. Tento fakt ovšem nebyl po prostudování údajů od prodejce zcela potvrzen, proto jsem rozhodl provést měření ve stejném teplotním rozsahu jako u ostatních článků. Přestože první měření modul vydržel, při dalších se na něm začaly projevovat nevratné mechanické deformace, čímž se potvrdilo, že se jedná o variantu T100.



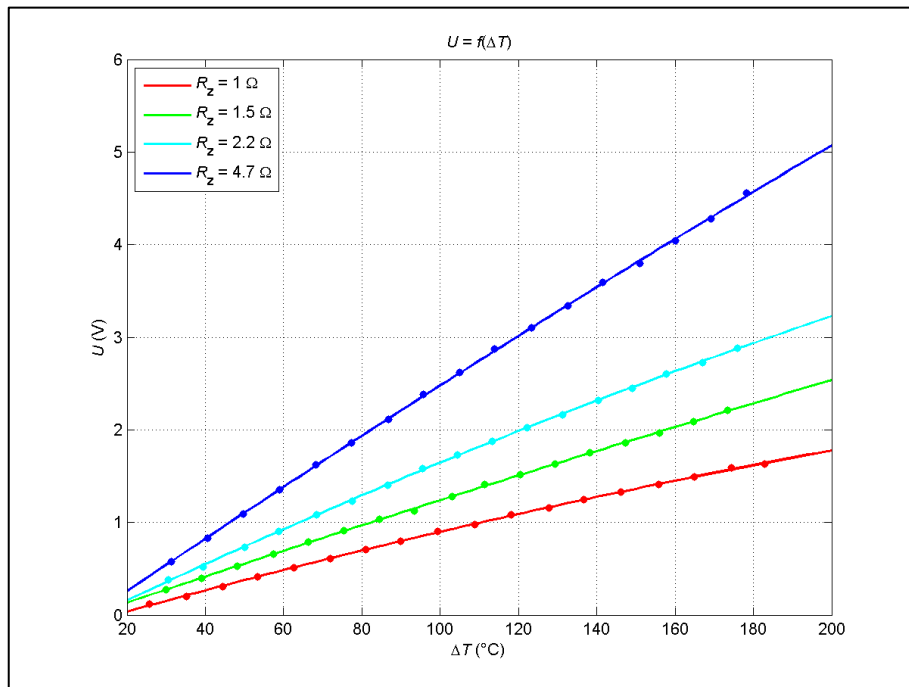
TEC1-12703 – Závislost výkonu na rozdílu teplot



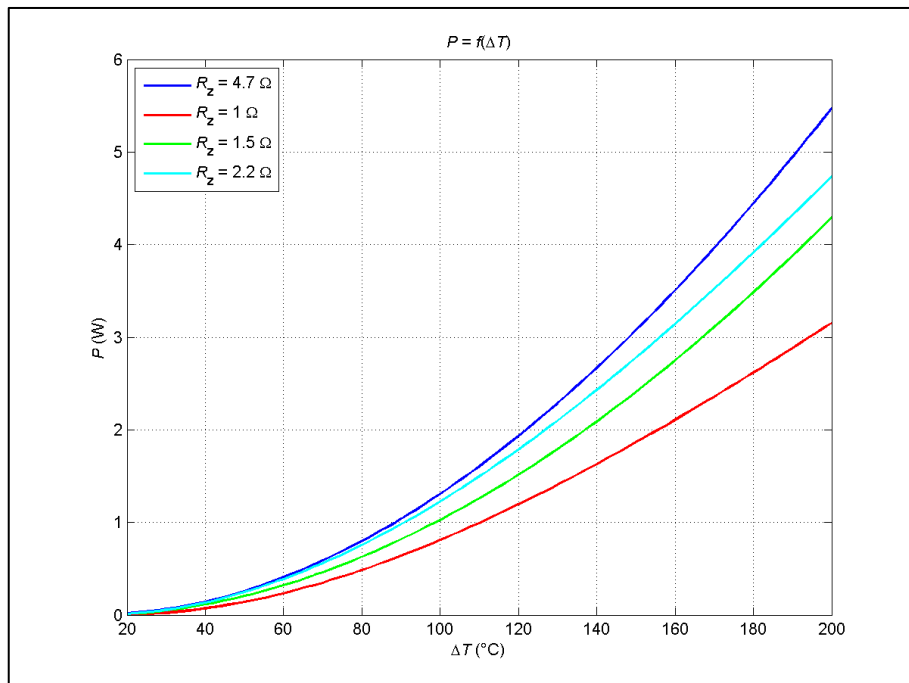
TEC1-12703 – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

## TEC1-12705HT

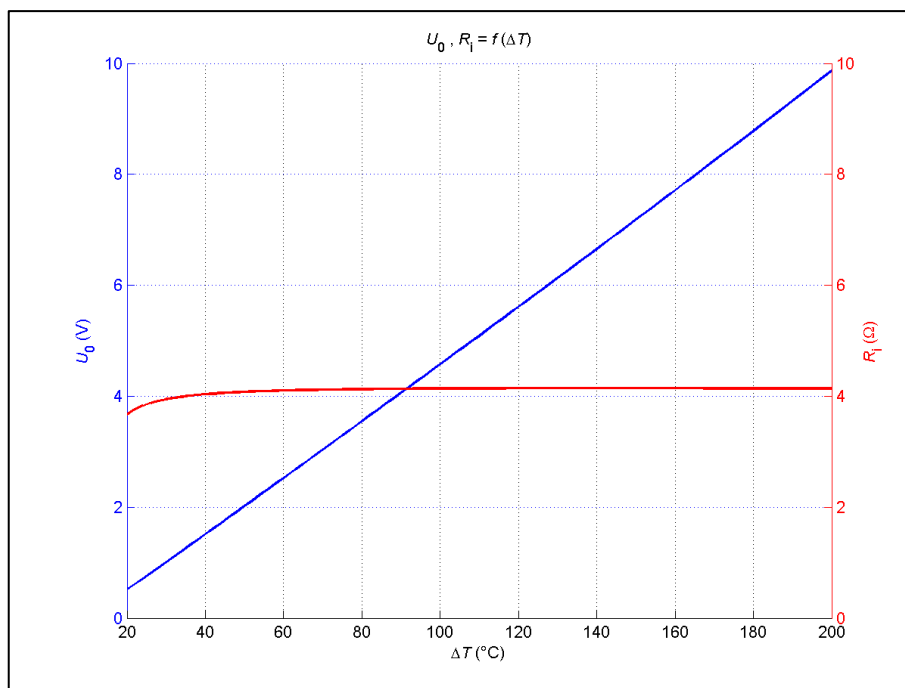
tloušťka modulu 4,2 mm, maximální pracovní teplota 225 °C



TEC1-12705HT – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot



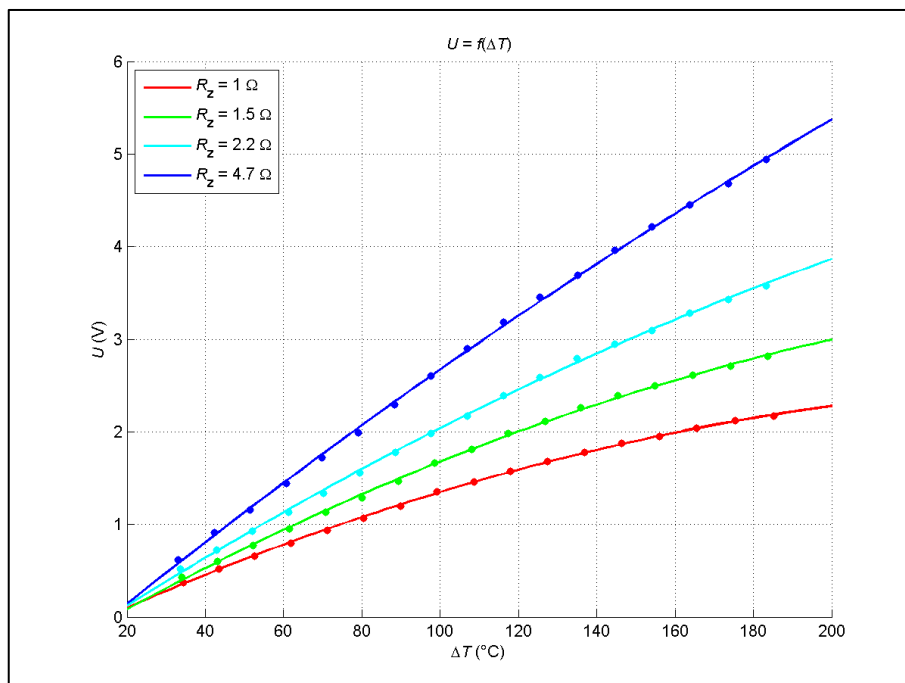
TEC1-12705HT – Závislost výkonu na rozdílu teplot



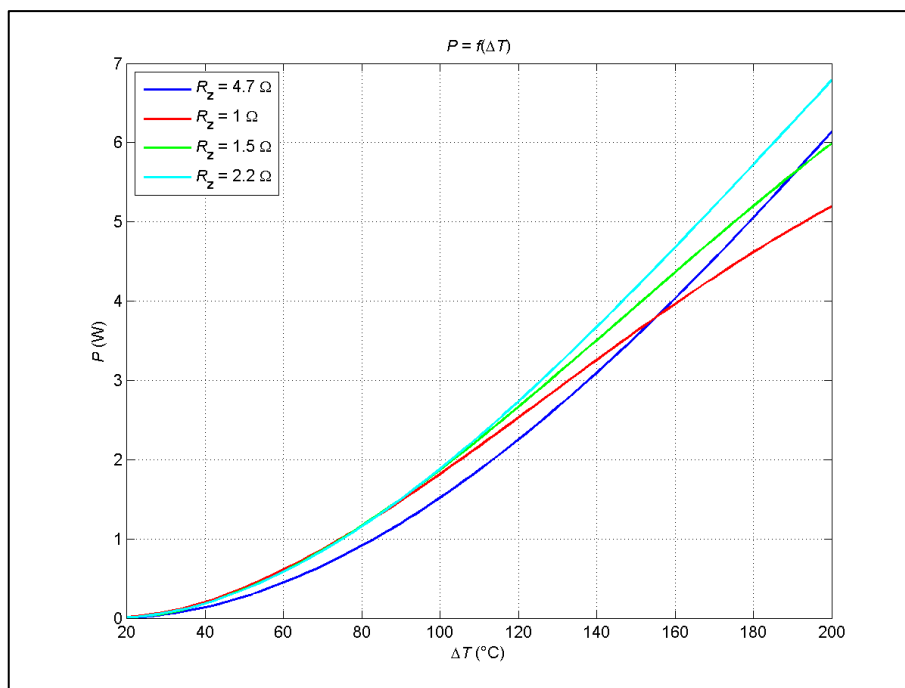
TEC1-12705HT – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

### TEC1-12710HTS

tloušťka modulu 3,3 mm, maximální pracovní teplota 225 °C, modul zalitý silikonem

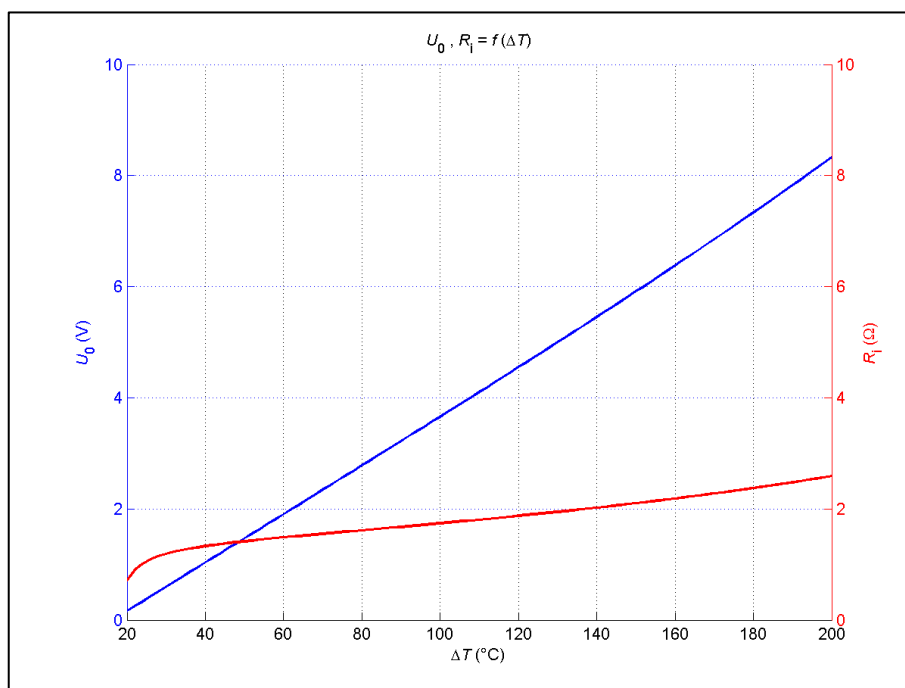


TEC1-12710HTS – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot



TEC1-12710HTS – Závislost výkonu na rozdílu teplot

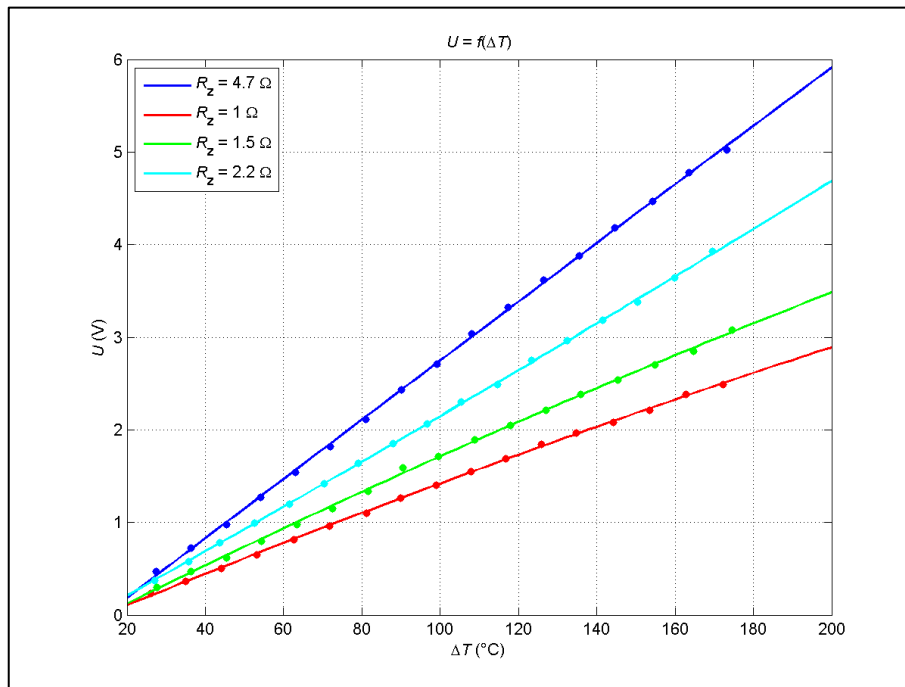
Na tomto grafu je vidět, že při  $\Delta T \approx 140 \text{ }^\circ\text{C}$  se náhle mění charakter výkonových křivek pro  $R_z = 1 \Omega$  a  $R_z = 1,5 \Omega$  a ty pak nadále neodpovídají očekávaným průběhům. Může se jednat o reakci na nízký zatěžovací odpor nebo pravděpodobněji může jít o systematickou chybu měření.



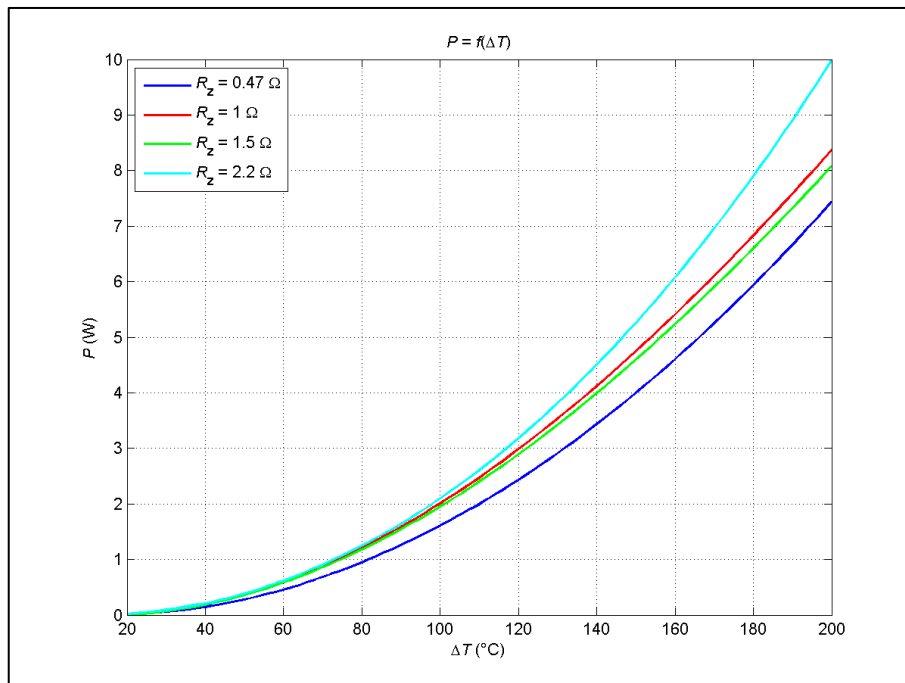
TEC1-12710HTS – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

## TEG1-127-2.0-1.6

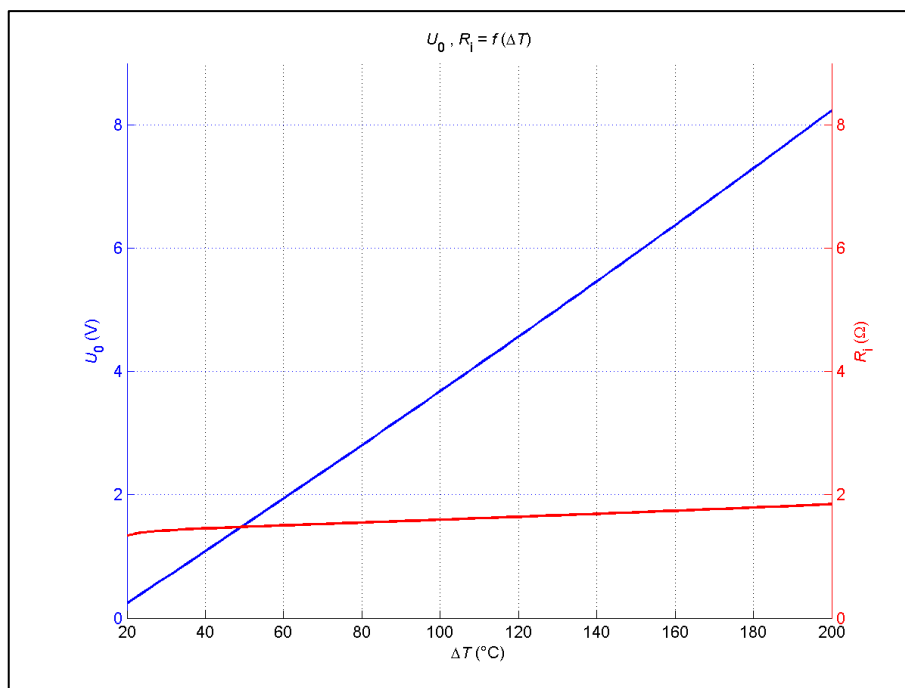
tloušťka modulu 3,8 mm, rozměr 5 × 5 cm



TEG1-127-2.0-1.6 – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot



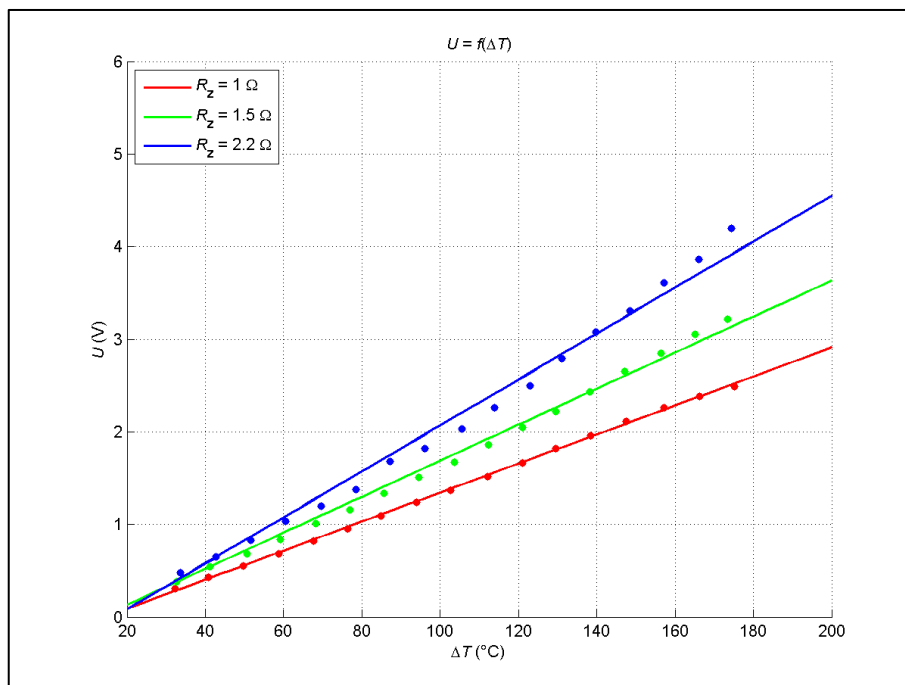
TEG1-127-2.0-1.6 – Závislost výkonu na rozdílu teplot



TEG1-127-2.0-1.6 – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

### **TEG1-127-2.0-1.3**

tloušťka modulu 3,8 mm, rozměr 5 × 5 cm

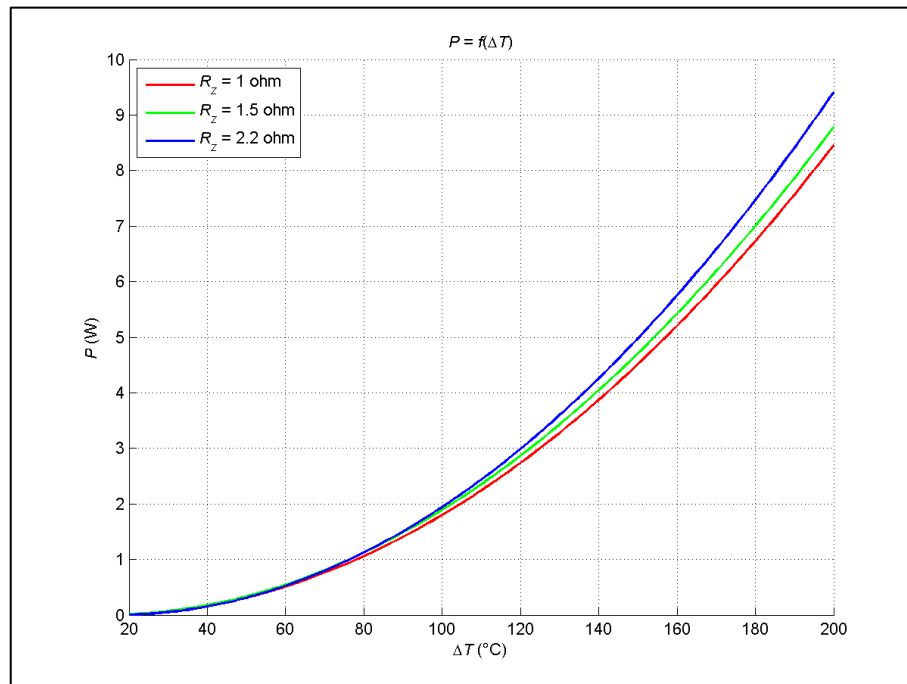


TEG1-127-2.0-1.3 – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot

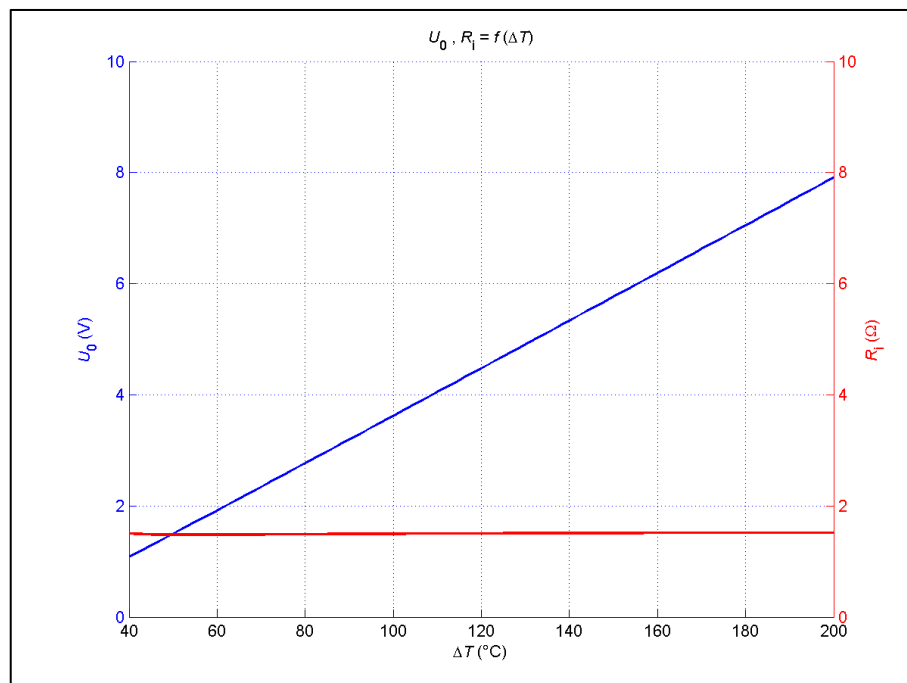
Naměřené body v tomto případě nebyly příliš konzistentní. Jelikož jsem neměl možnost měření zopakovat, proložil jsem naměřená data polynomem prvního řádu namísto druhého



řádu jako u ostatních měření. Výsledky měření jsou tak mírně zkreslené, nicméně pro účel porovnání s ostatními moduly dostačují.



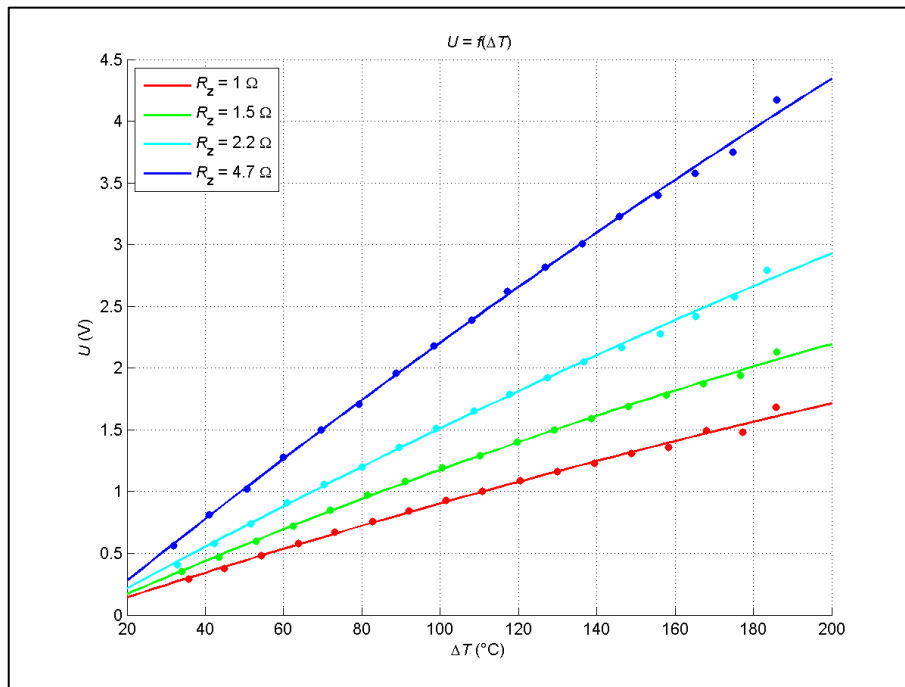
TEG1-127-2.0-1.3 – Závislost výkonu na rozdílu teplot



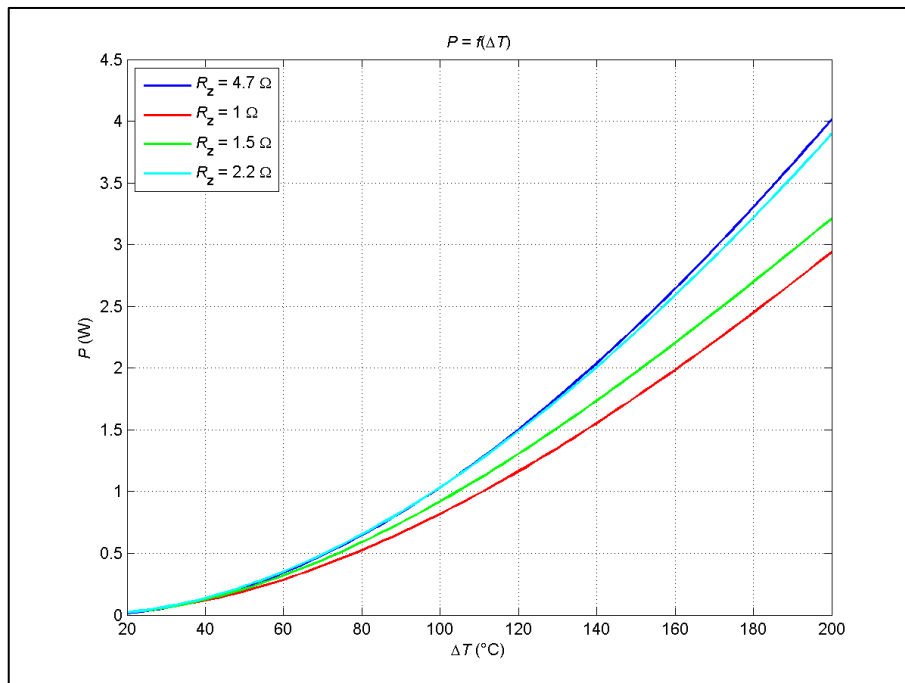
TEG1-127-2.0-1.3 – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

## TEC1-12710HTS – dvojice modulů

Měření dvojice modulů TEC1-12710HTS na sobě.

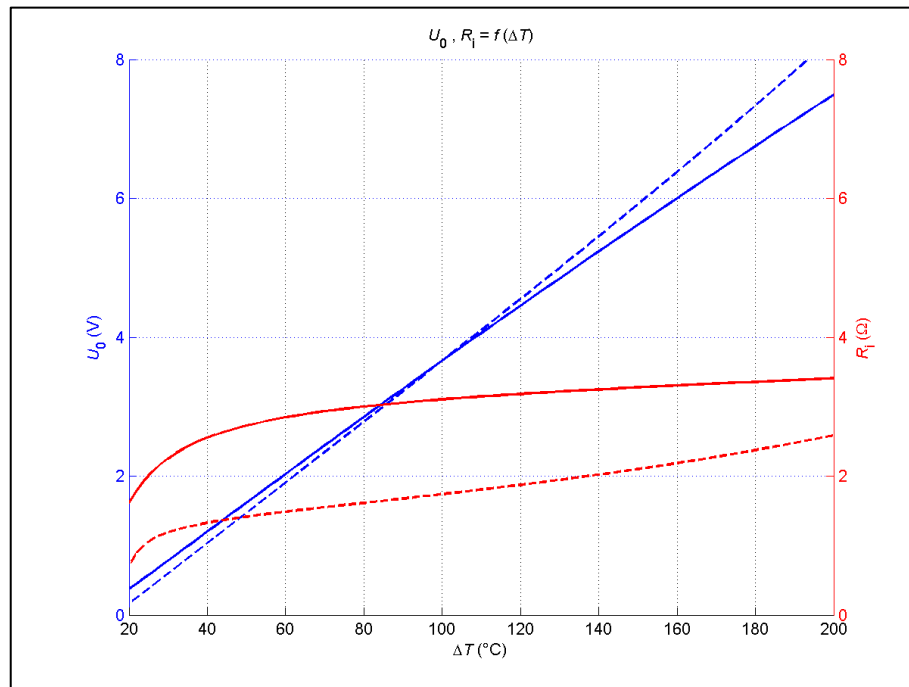


TEC1-12710HTS (dvojice) – Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot



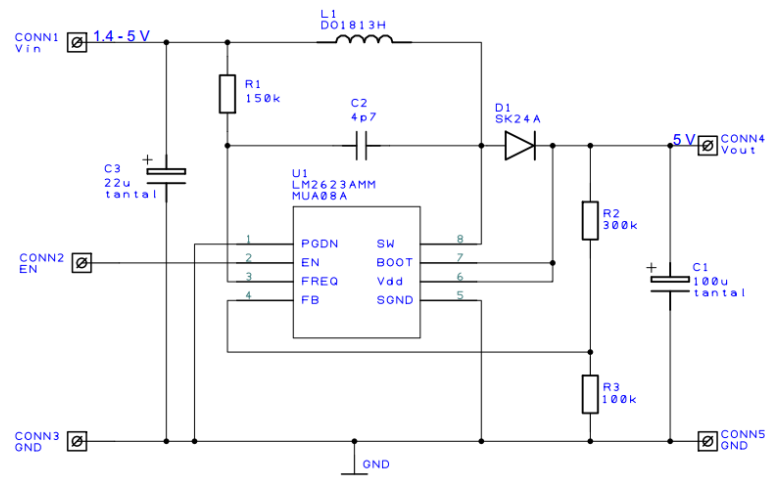
TEC1-12710HTS (dvojice modulů) – Závislost výkonu na rozdílu teplot

V následujícím grafu jsou pro porovnání čárkovaně zobrazeny průběhy pro měření s jediným modulem.

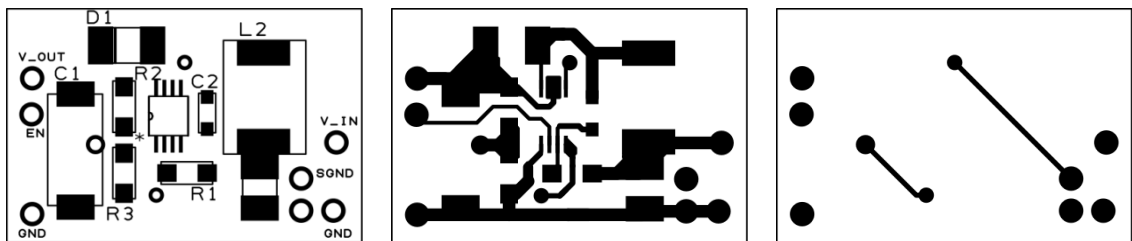


TEC1-12710HTS (dvojice) – Závislost parametrů náhradního zapojení na rozdílu teplot

## Příloha II – Modul s LM2623 – výrobní data



Modul LM2623 – schéma zapojení

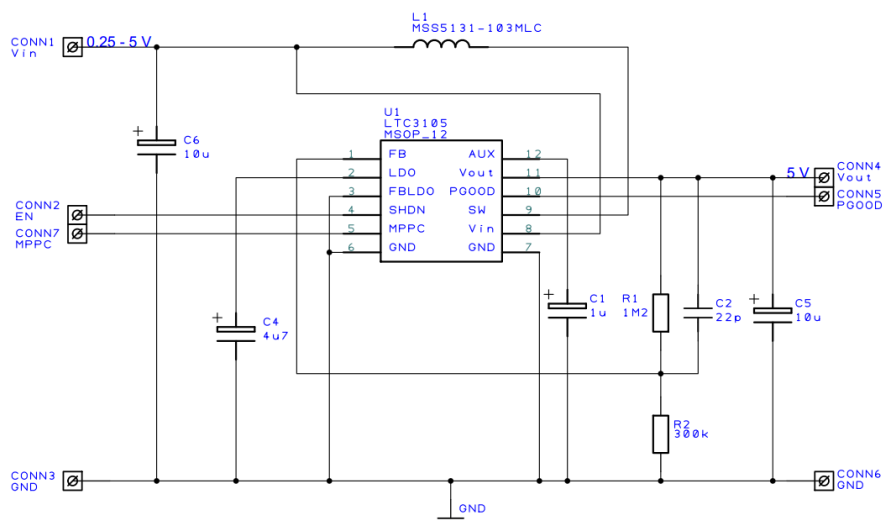


Modul LM2623 – DPS (28 × 18,5 mm)

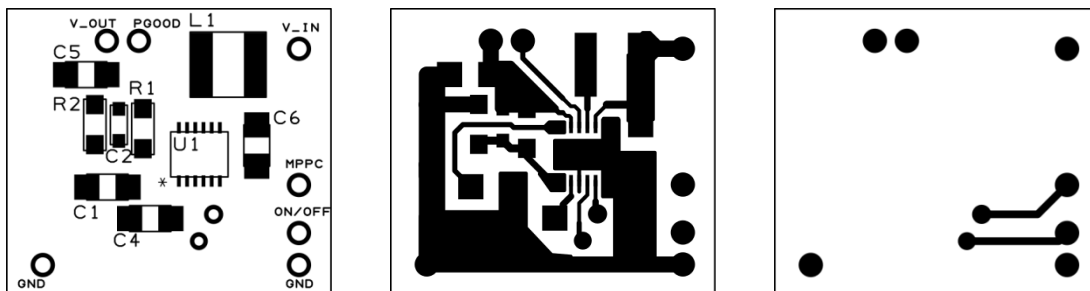
Označení	Typ/Hodnota	Poznámka
C1	100u	SMD, tantal
C2	4p7	SMD, keramický, 0603
C3	22u	SMD, tantal
CONN1	trn 0,6 mm	
CONN2	trn 0,6 mm	
CONN3	trn 0,6 mm	
CONN4	trn 0,6 mm	
CONN5	trn 0,6 mm	
D1	SK24A	SMD, SMA
L1	DO1813H	SMD
R1	Rezistor_SMD_0805	SMD, 0805
R2	Rezistor_SMD_0805	SMD, 0805
R3	Rezistor_SMD_0805	SMD, 0805
U1	LM2623	MUA08A

LM2623 – seznam součástek

### Příloha III – Modul s LTC3105 – výrobní data



Modul LTC3105 – schéma zapojení



Modul LTC3105 – DPS (25,5 × 22,5 mm)

Označení	Typ/Hodnota	Poznámka
C1	4u7	SMD, A
C2	4p7, keramický	C0603
C4	4u7, tantal	SMD, A
C5	10u, tantal	SMD, A
C6	10u	SMD, A
CONN1	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN2	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN3	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN4	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN5	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN6	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
CONN7	trn 0,6 mm	trn 0,6 mm
L1	MSS5131-103MLC	SMD
R1	1M2	SMD, 0805
R2	300k	SMD, 0805
U1	LTC3105	MSOP_12

Modul LTC3105 – seznam součástek



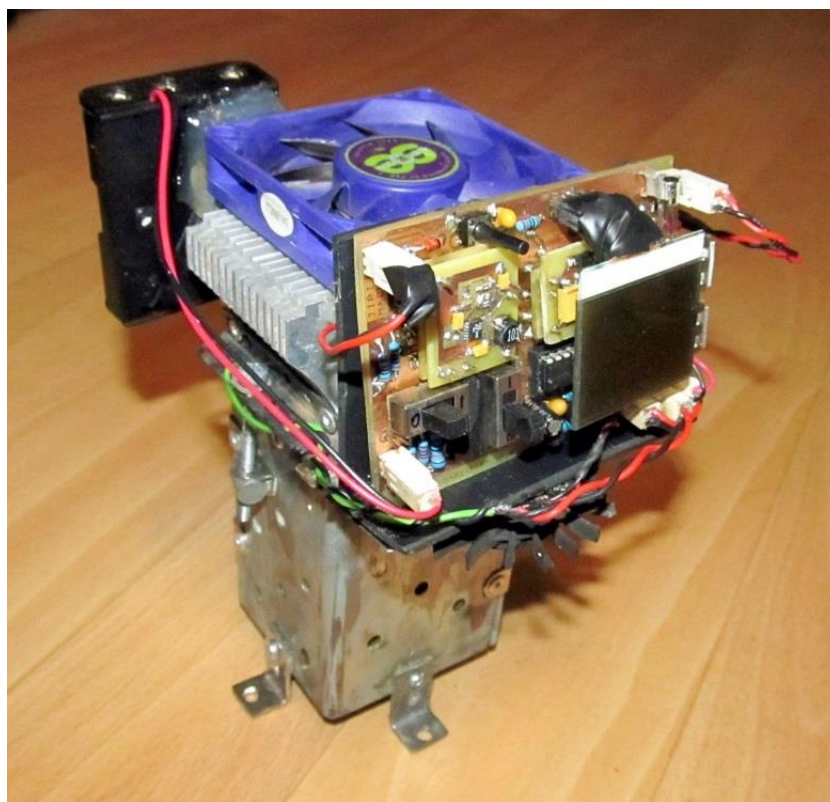


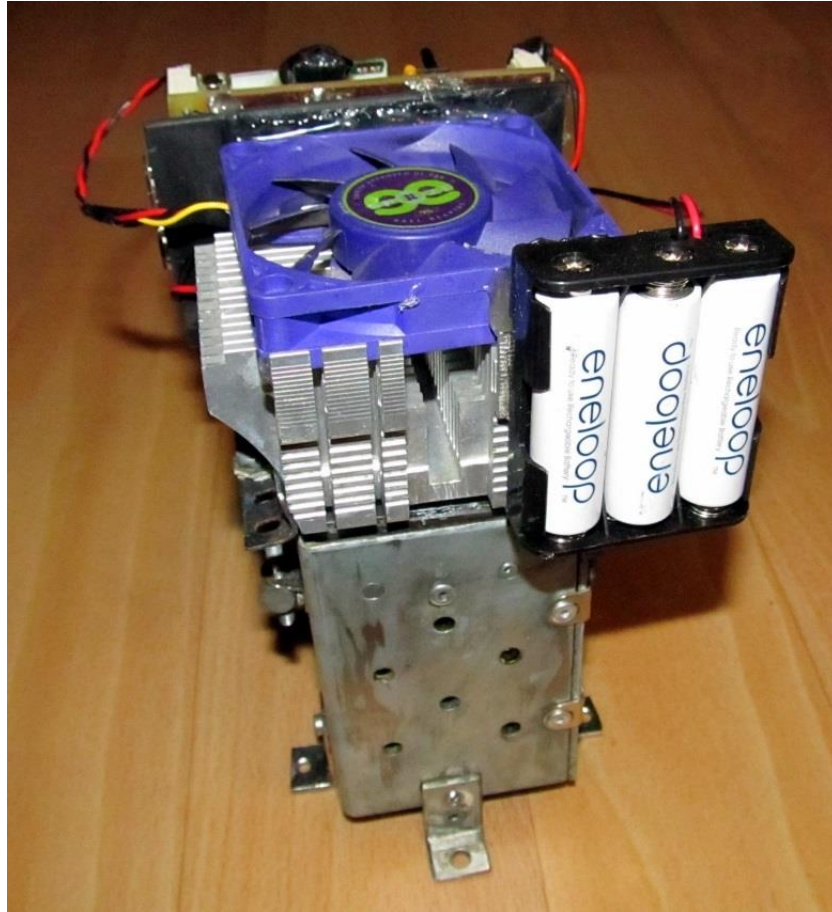
Označení	Typ/Hodnota	Poznámka		Označení	Typ/Hodnota	Poznámka
C1	10u/16V	elektrolyt, 2,5 mm		R12	1k8	
C2	100n	keramický		R13	260k	
C3	10u/16V	tantal, 2,5 mm		R14	120k	
C4	22u/16V	elektrolyt, 2,5 mm		R15	270R	
C5	10u/16V	tantal, 2,5 mm		R16	2k7	
C6	10u/16V	tantal, 2,5 mm		R17	270R	
CONN1	PSH02	rozteč 2,54 mm		R18	2k7	
CONN2	USB	USB A female		R19	100k	
CONN3	USB	USB A female		R20	20k	
CONN4	PSH02	rozteč 2,54 mm		R21	20k	
CONN5	PSH02	rozteč 2,54 mm		R22	100k	
CONN6	PSH02	rozteč 2,54 mm		R23	10k	SMD, 0805
CONN7	PSH02	rozteč 2,54 mm		SW1	Relé DSS41A05	
CONN8	PSH02	rozteč 2,54 mm		SW2	Přepínač T 561	
D1	BZX85V004.7			SW3	Přepínač T 561	
D2	LED_3	LED_3		SW4	Mikrospínač 6 mm	
D3	1N4148	DO41		T1	BSS138	SMD, SOT23
D4	LED_3	LED_3		T2	BSS138	SMD, SOT23
D5	1N4148	DO41		T3	BSS138	SMD, SOT23
D6	1N4148	DO41		T4	BSS138	SMD, SOT23
LED1	LCD_3310			T5	BSS138	SMD, SOT23
R1	1k8			T6	BSS138	SMD, SOT23
R2	Pojistka 1 A	20 mm		T7	BSS138	SMD, SOT23
R3	Pojistka 1,25 A	20 mm		U1	LM2623_modul	
R4	Res_10mm			U2	LTC3105_modul	
R6	10k			U3	PIC16LF1559	DIL-20
R7	10k	SMD, 0805		U4	LM334	TO92B
R8	75k			U5	LM334	TO92B
R9	50k			U6	HT7533	TO-92
R10	40k					
R11	50k					

Seznam součástek



## Příloha V – Fotografie zařízení





## **Seznam příloh na CD**

- Příloha A – celkové schéma zapojení
- Příloha B – naměřená data při měření termoelektrických generátorů
- Příloha C – zdrojové soubory obslužného softwaru
- Příloha D – katalogové listy
- Příloha E – fotografie přístroje