



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ZAŘÍZENÍ PRO KALIBRACI TEPLOTNÍCH SENZORŮ

THE DEVICE FOR TEMPERATURE SENSORS CALIBRATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Tomíček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2020



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Pavel Tomíček

**ID:** 203362

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Zařízení pro kalibraci teplotních senzorů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte, popište a realizujte zařízení umožňující kalibraci teplotních senzorů. Zařízení bude sestávat z teplotní komory s Peltierovým článkem pracující v zadaném rozsahu. Komora bude řízena mikrokontrolérem umožňující nastavení přesné teploty, popřípadě teplotního profilu. Ovládání bude umožněno pomocí displeje a klávesnice a bude rovněž umožňovat komunikaci s počítačem.

Při návrhu nejprve prostudujte použité technologie, vyberte vhodné součástky a zařízení navrhněte. Následně zařízení zrealizujte a proveďte závěrečná měření. Uvedené kroky vývoje zařízení přehledně popište v textové části bakalářské práce.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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



## **Abstrakt**

Cílem této práce je navrhnout zařízení umožňující kalibraci teplotních snímačů. Zařízení se skládá z teplotní komory s Peltierovým článkem. Část práce se zabývá prostředky pro měření, nastavení a regulaci teploty. Popisuje návrh obvodového zapojení a návrh DPS. Komora umožňuje nastavení přesné teploty a teplotního profilu. Specifickou vlastností komory je její schopnost automaticky kalibrovat čidla typu Pt100 a Pt1000. Ovládání komory je umožněno pomocí uživatelského rozhraní na zařízení nebo pomocí počítače. Dosažený teplotní rozsah uvnitř komory je  $-7,5\text{ °C}$  až  $115\text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 0,10\text{ °C}$ .

## **Klíčová slova**

Teplota, teplotní komora, PRT, Peltierův článek, PID regulace, kalibrace

## **Abstract**

The goal of this thesis is to design a device that allows calibrating temperature sensors. The device is made of a thermal chamber with Peltier module. Part of this work discusses means of temperature measurement, control and regulation. This work describes design of circuit and PCB. The device can precisely control temperature and temperature profile. It can also automatically calibrate Pt100 and Pt1000 sensors. User can control the device either by interface on the device or from a computer. Temperature range inside the thermal chamber is from  $-7,5\text{ °C}$  to  $115\text{ °C}$  with  $\pm 0,10\text{ °C}$  error.

## **Keywords**

Temperature, thermal chamber, PRT, Peltier module, PID control, calibration

## **Bibliografická citace**

TOMÍČEK, Pavel. *Zařízení pro kalibraci teplotních senzorů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127063>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Vladimír Levek Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: **8. června 2020**

.....  
Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Levkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, věnovaný čas, trpělivost, ochotu a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1 PROBLEMATIKA SNÍMÁNÍ A REGULACE TEPLoty</b> .....	<b>2</b>
1.1 SNÍMAČE TEPLoty .....	2
1.1.1 <i>Jednočipová PN polovodičová čidla</i> .....	2
1.1.2 <i>Termočlánky</i> .....	3
1.1.3 <i>NTC termistory</i> .....	3
1.1.4 <i>RTD čidla</i> .....	5
1.2 PELTIERŮV ČLÁNEK .....	8
1.2.1 <i>Peltierův jev</i> .....	8
1.2.2 <i>Konstrukce Peltierova článku</i> .....	9
1.2.3 <i>Použití Peltierova článku</i> .....	10
1.3 REGULACE TEPLoty.....	10
1.3.1 <i>On/Off regulace</i> .....	10
1.3.2 <i>PID regulace</i> .....	11
<b>2 NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>18</b>
2.1 OBVOD PELTIEROVA ČLÁNKU .....	19
2.1.1 <i>Peltierův článek</i> .....	19
2.1.2 <i>Řízení Peltierova článku</i> .....	19
2.1.3 <i>Filtr</i> .....	21
2.1.4 <i>Snímač napětí a proudu Peltierova článku</i> .....	22
2.1.5 <i>Chladicí ventilátor</i> .....	23
2.2 BUDÍCÍ A SNÍMACÍ OBVOD ČIDEL .....	24
2.2.1 <i>Referenční čidlo a rezistory</i> .....	25
2.2.2 <i>Vstupní filtry</i> .....	26
2.2.3 <i>A/D převodník</i> .....	29
2.3 DIGITÁLNÍ ŘÍZENÍ .....	33

2.3.1	<i>Mikrokontrolér</i> .....	33
2.3.2	<i>Uživatelské rozhraní</i> .....	35
2.3.3	<i>Převodník USB/UART</i> .....	36
2.3.4	<i>Čidlo okolní teploty</i> .....	37
2.4	NAPÁJECÍ ZDROJE .....	38
<b>3</b>	<b>KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>41</b>
3.1	NÁVRH DPS.....	41
3.2	MECHANICKÁ KONSTRUKCE .....	42
3.3	PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ .....	47
3.3.1	<i>Řízení výkonu Peltierova článku</i> .....	47
3.3.2	<i>Řízení teploty PID regulátorem</i> .....	48
3.3.3	<i>Menu</i> .....	48
3.3.4	<i>Komunikace s PC</i> .....	51
<b>4</b>	<b>TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ</b> .....	<b>53</b>
4.1	TEPLOTNÍ ROZSAH .....	53
4.2	PŘESNOST A HOMOGENITA NASTAVENÉ TEPLoty .....	53
4.3	STABILITA NASTAVENÉ TEPLoty .....	55
4.4	KALIBRACE TEPLOTNÍHO ČIDLA .....	55
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>57</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>60</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>62</b>
	<b>SEZNAM ZKRATEK</b> .....	<b>63</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>65</b>

# Úvod

Postavit zařízení pro kalibraci teplotních snímačů jsem se rozhodl poté, co jsem chtěl zjistit, jak přesná jsou čidla Pt100 a Pt1000, která vlastním. Vytvořil jsem ledovou lázeň z destilované vody, čidla do ní vnořil a nechal temperovat. Následně jsem změřil jejich odpor a vypočetl změřenou teplotu. Vzhledem k použití ledové lázně by změřená teplota měla být 0 °C. Bohužel teplota dosahovala odchylky několika stupňů Celsia. Rozhodl jsem se tedy najít řešení pro zvýšení přesnosti měření a kalibraci čidel. Zároveň je to dobrá příležitost získat praktické zkušenosti s návrhem komplexního zařízení.

Pro kalibraci odporových teplotních čidel je nutné změřit odpor čidla při několika teplotách. Přesnost kalibrace je podmíněná přesně definovanou teplotou při které je odpor čidla měřen. Nejpřesnější teploty a tedy kalibrace lze dosáhnout pomocí tzv. pevných bodů teplotní stupnice ITS-90. Jejich realizace je ale velmi náročná a používají se proto pouze pro nejpřesnější metrologické účely. Dalšími možnostmi jak kalibraci provést je pomocí jednoúčelového kalibrátoru, nebo teplotní komory.

Jednoúčelový kalibrátor pro mě není vhodný, jelikož pro něj nemám mnoho využití. Mnohem vhodnější je malá teplotní komora, která mi nezabere mnoho místa na stole, umožní přesné nastavení teploty a má rozsáhlejší použití. Nové komerčně dostupné teplotní komory jsou pro mě příliš rozměrné a cenově nedostupné. Z těchto důvodů jsem se rozhodl postavit vlastní.

Teplotní komora je zařízení, které udržuje v určitém tepelně izolovaném prostoru konstantní teplotu za určitých podmínek. Lze ji použít nejen pro kalibraci čidel, ale také pro měření teplotního koeficientu odporů nebo klimatické testování elektronických výrobků.

Cílem této práce je vytvořit teplotní komoru s Peltierovým článkem, které bude schopna přesně nastavit a udržet teplotu. Komora bude mít tři funkční módy z důvodu maximální flexibility. V prvním módu bude automaticky provádět kalibraci čidel Pt100 a Pt1000. V dalším módu bude udržovat jednu uživatelem nastavenou teplotu. V posledním módu bude teplota následovat teplotní profil.

V první kapitole je popsána problematika snímání a regulace teploty. Jsou ukázány snímače teploty, Peltierovy články a regulátory. Důraz je kladen na snímače typu RTD, mezi které patří čidla Pt100 a Pt1000. Jsou diskutovány regulátory typu On/Off a PID. V další kapitole je navrženo schéma zapojení komory. V následující kapitole je popsána navržena DPS, mechanická konstrukce a programové vybavení komory. Poslední kapitola se věnuje otestování některých parametrů zařízení teplotní jako je rozsah, přesnost, stabilita a homogenita teploty.

# 1 Problematika snímání a regulace teploty

V této části bakalářské práce jsou uvedeny prostředky pro měření teploty, změnu teploty a regulaci teploty. Nejprve jsou popsány nejpoužívanější druhy elektrických čidel. Je kladen důraz na čidla typu RTD (*Resistance Temperature Detectors*) a především na jejich variantu PRT (*Platinum Resistance Thermometer*). Jako prostředek pro změnu teploty je popsán Peltierův článek. Regulaci teploty lze provést pomocí On/Off regulace, nebo PID (*Proporcionálně Integračně Derivační*) regulace.

## 1.1 Snímače teploty

Snímače teploty detekují teplotu předmětu nebo prostředí a převádí ji na jiný parametr např. elektrický odpor nebo napětí. Mezi nejpoužívanější elektrické typy čidel patří jednočipová PN polovodičová čidla, termočláanky, NTC (*Negative Temperature Coefficient*) termistory a RTD čidla [1]. Porovnání vlastností těchto čidel je v tabulce 1.1.

Tab. 1.1 Vlastnosti běžně dostupných snímačů teploty

	Jednočipová PN polovodičové čidla	Termočláanky	NTC termistory	RTD čidla
Rozsah teplot [°C]	-55 až 150	-270 až 1700	-80 až 300	-240 až 650
Přesnost [°C]	0,5 až 1	0,5 až 5	0,05 až 1	0,1 až 1
Stabilita	dobrá	dobrá	dobrá	výborná
Tepelná kapacita	velká	malá	průměrná	velká
Citlivost	výborná	malá	výborná	malá
Samoohřev	průměrný	žádný	velký	malý

Pro správnou funkci čidel je potřeba zvolit vhodné budící a měřicí obvody, které umožní čidla provozovat a nebudou je omezovat. Výjimkou jsou jednočipová PN polovodičová čidla, jelikož potřebné obvody mají integrovány na čipu spolu se snímacím prvkem [2].

### 1.1.1 Jednočipová PN polovodičová čidla

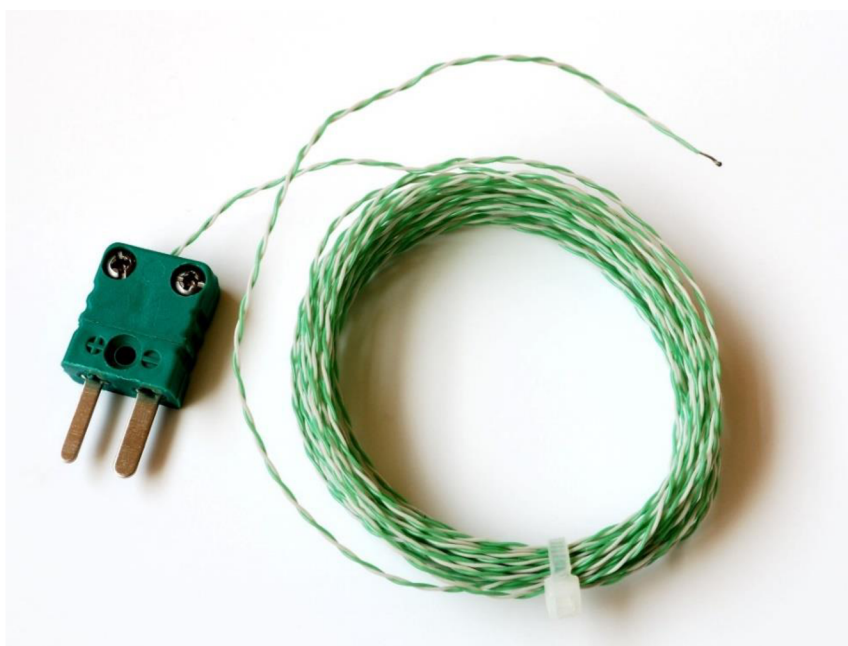
Jednočipová PN polovodičová čidla jsou vhodná pro nenáročné aplikace kde není nutná vysoká přesnost a široký rozsah teplot. Uplatnění nachází například pro měření teploty prostředí nebo pro monitorování teploty výkonových prvků. Jejich použití usnadňuje návrh softwaru



a hardwaru zařízení, jelikož snímací prvek a veškeré obvody pro jeho buzení a měření jsou integrovány na jednom čipu. Pro snímání teploty se využívá závislosti difuzního napětí diod na teplotě, nebo bandgap reference upravené pro snímání teploty [2]. Výstup těchto čidel může být analogový, nebo digitální. Analogový výstup má lineární závislost napětí na teplotě např.  $10 \text{ mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Digitální výstup je realizován sběrnicí např. SPI (*Serial Peripheral Interface*) nebo 1-Wire a k čidlu se poté přistupuje stejně jako k jakékoliv jiné digitální periférii. Čidla se vyrábějí v standardních pouzdrech pro integrované obvody jako TO-92, nebo SO-8.

### 1.1.2 Termočlánky

Termočlánky se skládají ze dvou elektricky spojených kovů, na kterých vzniká vlivem teploty termoelektrické napětí. Vlastnosti termočlánků závisí na použitých kovech. Teoreticky se dá použít jakékoliv kombinace kovů, ale v praxi se používá přibližně 8 druhů termočlánků, které se liší především přesností a rozsahem teplot. Jako jediná elektrická čidla nevyžadují žádné napájení a netrpí samoohřevem. Jejich použití je výhodné v případě, kdy je nutná mechanická odolnost čidla, malá tepelná kapacita, široký rozsah měření a není důraz na přesnost [2]. Ukázka typického termočlánku je na obrázku 1.1.

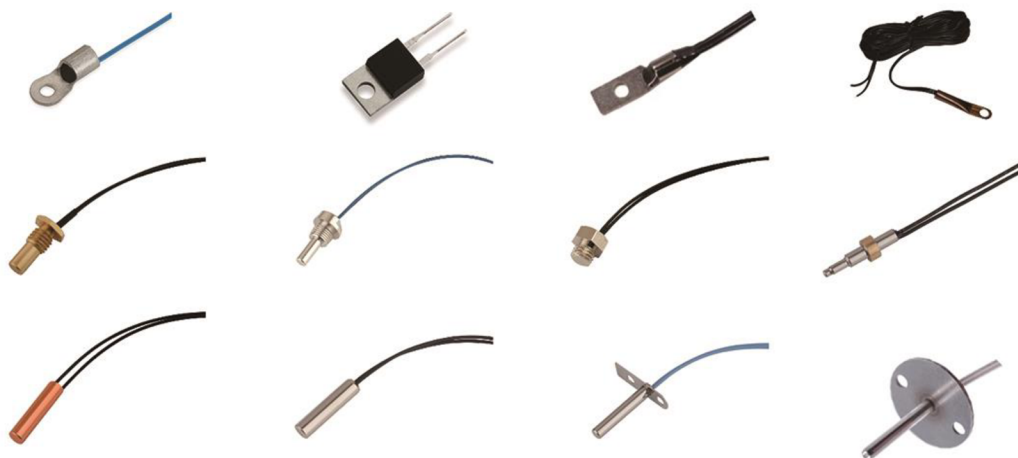


Obr. 1.1 Typický termočlánek (převzato z [3])

### 1.1.3 NTC termistory

NTC termistory jsou rezistory, jejichž odpor je silně závislý na teplotě. Závislost odporu na teplotě je záporná a exponenciální, díky tomu mají velmi vysokou citlivost okolo  $-5 \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Vyrábějí se spékáním oxidů kovů za vysoké teploty a tlaku. Tato technologie umožňuje jejich

v mnoha tvarech a různých materiálových složení, kterými lze relativně přesně určit parametry vyráběných termistorů. Na obrázku 1.2 je ukázka konstrukcí NTC termistorů.



Obr. 1.2 Konstrukce několika NTC termistorů (převzato z [4])

Jejich použití není omezeno jen na teplotní snímače, ale dají se použít také pro omezení náběhového proudu [1]. Přesnost nejlepších běžně dostupných termistorů je udávána 0,05 °C, tato hodnota je ale zavádějící, jelikož platí pouze pro malý teplotní rozsah okolo 37 °C a s rostoucí odchylkou od této teploty přesnost klesá, pro celý teplotní rozsah pak výrobce mnohdy přesnost neuvádí.

Termodynamická teplota  $T$  NTC termistorů je vyjádřena pomocí Steinhart-Hartovy rovnice [1]

$$T = \frac{1}{A + B \ln R + C (\ln R)^3} \quad (1.1)$$

kde  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou Steinhart-Hartovy koeficienty individuálního čidla a  $R$  je změřený odpor.

Steinhart-Hartova rovnice velice dobře aproximuje teplotu a chyba se pohybuje v setinách °C. Tato přesnost je vyvážena složitým stanovením koeficientů  $A$ ,  $B$  a  $C$ . Pro zjištění těchto koeficientů je nutno provést měření alespoň při třech teplotách. Díky poměrně náročnému kalibračnímu procesu se používá zjednodušená rovnice s jediným koeficientem  $B$ , který je lze stanovit pomocí měření při dvou teplotách (např. bod mrazu a bod varu vody). Rovnice pro aproximaci teploty využívající koeficient  $B$  má následující vztah [1]

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{r_\infty}\right)} \quad (1.2)$$

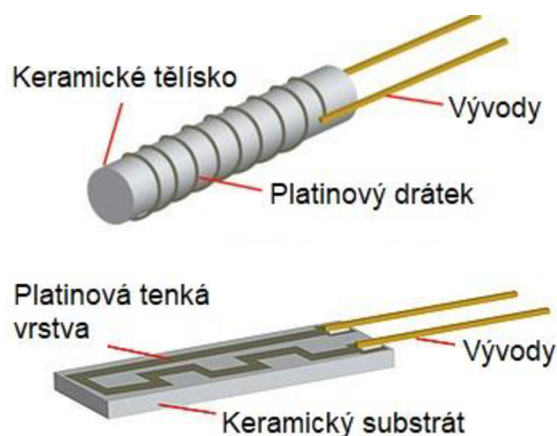
kde  $r_{\infty}$  je koeficient čidla závislý na jedné z teplot (většinou 25 °C) a je vypočten dle vztahu [1]

$$r_{\infty} = R_0 e^{\frac{B}{T_0}} \quad (1.3)$$

kde  $T_0$  je termodynamická teplota při které byl změřen odpor  $R_0$ .

#### 1.1.4 RTD čidla

RTD čidla jsou založena na principu změny odporu čistého kovu vlivem teploty. Snímací prvek může být vyroben například z niklu nebo mědi. Mezi nejpoužívanější se však řadí čidla s platinovým snímacím prvkem a nominálním odporem při teplotě 0 °C 100 Ω nebo 1000 Ω. Tyto čidla se označují jako Pt100, respektive Pt1000 a označují se zkratkou PRT. Často jsou zkratkou RTD myšleny pouze PRT čidla. Jsou vyráběna ve dvou základních konstrukčních variantách, a to vinuté a tenkovrstvé. Na obrázku 1.3 je ukázka vinuté a tenkovrstvé konstrukce čidla.



Obr. 1.3 Ukázka vinuté konstrukce (nahore) a tenkovrstvé konstrukce PRT čidla (převzato z [5])

PRT čidla se vyznačují výbornou stabilitou, jasně definovaným výstupem, výbornou opakovatelností měření a dlouhou životností [1]. Právě z těchto důvodů se používají pro nejpřesnější metrologické účely. Po kalibraci lze pomocí těchto snímačů dosáhnout přesnosti v tisícinách °C [6]. Mezi nevýhody těchto čidel patří velká cena, samoohřev a malá citlivost okolo 0,385 %·°C<sup>-1</sup>. Vzhledem k malé citlivosti je pro dosažení velké přesnosti nutné použít velmi kvalitně navržené měřicí obvody.

Čidla PRT se dle normy vyrábějí ve čtyřech třídách, které určují nejistotu a rozsah teplot, ve kterých je nejistota definována. Třídy jsou definovány v normě ČSN EN 60751, která

vychází z mezinárodní normy IEC 60751 [6]. Požadavky na čidlo dle jednotlivých tříd jsou v tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Třídy PRT čidel dle normy IEC 60751

Třída	Rozsah teplot [°C]		Nejistota [°C]
	Tenkovrstvé čidlo	Vinuté čidlo	
AA (F 0.1)	0 až 150	-50 až 250	$\pm(0,1+0,0017t)$
A (F 0.15)	-30 až 300	-100 až 450	$\pm(0,15+0,002t)$
B (F 0.3)	-50 až 500	-196 až 600	$\pm(0,3+0,0057t)$
C (F 0.6)	-50 až 600	-196 až 600	$\pm(0,6+0,017t)$

Lze se také setkat s třídami 1/3 DIN, 1/5 DIN a 1/10 DIN, tyto třídy vycházejí z normy DIN 43760:1980-10, která sice byla v roce 1987 zrušena, ale třídy se používají doposud. Tyto třídy vycházejí z třídy B ale nejistota při 0 °C je menší, pro třídu 1/3 DIN je třetinová tedy  $\pm(0,1+0,0057t)$  °C. Také existují odlišnosti v teplotním rozsahu jednotlivých tříd [6].

Čidla PRT se vyskytují ve verzích s odlišným materiálovým složením, díky tomu se čidla rozdělují na několik druhů pomocí koeficientu  $\alpha$ . Koeficient  $\alpha$  je materiálová konstanta a je definovaná normou. Používá se buď tzv. americký standart kde  $\alpha = 0,003916$  °C<sup>-1</sup> nebo v dnešní době převládající tzv. evropský standart definovaný v normě IEC 60751 jako  $\alpha = 0,00385$  °C<sup>-1</sup>. Ve své podstatě určuje koeficient  $\alpha$  směšnici přímky lineární aproximace v rozsahu 0 °C až 100 °C. Existují i další hodnoty koeficientu  $\alpha$ , ale jejich použití je výjimečné [6].

Pro vyjádření závislosti odporu na teplotě a naopak, lze využít substituci z tabulkové hodnoty nebo matematický výpočet pomocí aproximace. Použití tabulky je vhodné pro aplikace s kritickou dobou získávání výsledků měření a není problém s velikostí tabulky v programové paměti. Použití aproximace je velmi flexibilní, jelikož existuje několik rozdílných druhů, které se liší přesností, teplotním rozsahem a samozřejmě složitostí výpočtu. V praxi běžně používanou je Callendar-van Dusenova aproximace, definovaná v normě ITS-27 jako [7]

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2), \quad t > 0 \text{ °C} \quad (1.4)$$

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3), \quad t \leq 0 \text{ °C} \quad (1.5)$$

kde  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou koeficienty čidla,  $R_0$  je odpor čidla při teplotě 0 °C a  $R_t$  je odpor při teplotě  $t$ . Koeficienty  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou definovány normou IEC 60751 pro ideální čidlo evropského standartu tj.  $\alpha = 0,00385$  °C<sup>-1</sup>, hodnoty těchto koeficientů jsou  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup>,  $B = -5,775 \cdot 10^{-7}$  °C<sup>-2</sup> a  $C = -4,183 \cdot 10^{-12}$  °C<sup>-4</sup> [7]. Ačkoliv se velice běžně udává, že pro použití Callendar-van Dusenovy aproximace pod 0 °C je nutné použít rovnici 1.5 je toto tvrzení značně

zavádějící, jelikož podstatné odchylky od rovnice 1.4 se vyskytují až od hodnoty přibližně  $-40\text{ °C}$  [8].

Pro zvýšení přesnosti měření je nutné čidlo zkalibrovat. Při kalibraci čidla se měří odpor PRT čidla při přesně definovaných teplotách a koeficienty  $A$ ,  $B$  a  $C$  se vypočítají dle následujících vztahů

$$A = \frac{R_{t_2} - R_0 - B(R_0 t_2^2)}{R_0 t_2} \quad (1.6)$$

$$B = \frac{t_2(R_{t_3} - R_0) - t_3(R_{t_2} - R_0)}{R_0 t_2 t_3 (t_3 - t_2)} \quad (1.7)$$

$$C = \frac{R_{t_1} - R_0(1 + A t_1 + B t_1^2)}{R_0 t_1^3 (t_1 - 100)} \quad (1.8)$$

kde  $t_1$  je teplota menší než  $0\text{ °C}$ ,  $t_2$  je teplota v rozmezí  $0\text{ °C}$  až  $t_3$ . Pokud je čidlo kalibrováno pouze pro teploty nad  $0\text{ °C}$  není koeficient  $C$  počítán.

Callendar-van Dusenova aproximace je vhodná pro určení koeficientů PRT čidla, jelikož určení koeficientů přesnější aproximace je mnohem složitější. Vztah pro výpočet záporné teploty pomocí uvedené aproximace je složitý a je nutné jej řešit numericky [1]. Existují ale jiné aproximace, které jsou přímo určeny pro výpočet teploty. Jednou z nich je aproximace racionální lomenou funkcí v následujícím tvaru [9]

$$t = c_0 + \frac{R(c_1 + R(c_2 + R(c_3 + R c_4)))}{1 + R(c_5 + R(c_6 + R c_7))} \quad (1.9)$$

Tato aproximace je velice přesná a lze ji použít pro široký teplotní rozsah, kde průměrná chyba v rozsahu  $-200\text{ °C}$  až  $850\text{ °C}$  je pouze  $0,015\text{ °C}$ . Hodnoty koeficientů  $c_0$  až  $c_7$  pro ideální čidlo s  $\alpha = 0,00385\text{ °C}^{-1}$  jsou v tabulce 1.3.

Tab. 1.3 Koeficienty aproximace racionální lomenou funkcí pro PRT čidlo

n	0	1	2	3	4	5	6	7
$c_n$	-245,19	2,5293	-0,066046	$4,0422 \cdot 10^{-3}$	$-2,0697 \cdot 10^{-6}$	-0,025422	$1,6883 \cdot 10^{-3}$	$-1,3601 \cdot 10^{-6}$

Samoohřev je negativní vlastnost čidla, jenž může při nesprávném návrhu měřicího soustavy způsobit značnou chybu. Ačkoliv je samoohřev v některých případech žádaný (typicky průtokoměry), pro přesné měření teploty je nutné jej omezit. Samoohřev je způsoben Jouleovým teplem, které vznikne vznikne v čidle průtokem proudu. V katalogovém listu čidla lze najít hodnotu samoohřevu např.  $0,5\text{ mW} \cdot \text{°C}^{-1}$ . Tato hodnota značí, jaký ztrátový výkon je

na čidle třeba vyvolat, aby se jeho vnitřní teplota změnila o 1 °C. Samoohřev PRT čidla lze omezit několika způsoby:

- snížením měřicího proudu,
- buzením čidla pouze po krátkou dobu nutnou pro měření,
- zlepšení tepelného kontaktu čidla a měřeného objektu.

Zvlášť vhodná je kombinace buzení čidla pouze po krátkou dobu nutnou pro měření a zlepšení tepelného kontaktu čidla s měřeným objektem. Poté bude vliv samoohřevu potlačen i při použití vyššího měřicího proudu, který zvýší odstup užitečného napětí od šumu.

## 1.2 Peltierův článek

Peltierův článek je zařízení fungující jako tepelné čerpadlo, které přenáší teplo z jednoho místa na druhé. Důsledkem toho je, že jedna strana Peltierova článku se chladí a druhá ohřívá.

### 1.2.1 Peltierův jev

Každý Peltierův článek se skládá ze dvou vodičů s rozdílnými Peltierovými koeficienty  $\Pi_1$  a  $\Pi_2$ . Pro správnou funkci musí být přítomny vždy alespoň dva přechody mezi těmito materiály. Při průtoku proudu  $I$  dojde k absorpci tepla na jednom přechodu a k ohřevu druhého přechodu. Díky tomu dojde k přesunu tepla z jednoho přechodu na druhý. Množství přeneseného tepla závisí na materiálovém složení a velikosti proudu. Při změně směru proudu dojde ke změně směru přesunu tepla.

Pokud je Peltierův článek vyroben z polovodičů tak při pohybu elektronu z P typu polovodiče do N typu polovodiče se musí elektron dostat na vyšší energetickou úroveň a tím absorbovat teplo. Při pohybu elektronu z N typu polovodiče do P typu polovodiče se elektron přesouvá na nižší energetickou úroveň a zároveň vydává tepelnou energii. Množství přeneseného tepla  $Q$  za jednotku času lze vyjádřit rovnicí [10]

$$Q = I \cdot (\Pi_1 - \Pi_2) \quad (1.10)$$

Množství přeneseného tepla je ovlivněno Jouleovým teplem a rozdílem teploty mezi teplotou a studenou stranou Peltierova článku. Jouleovo teplo způsobuje ohřívání celého Peltierova článku a tím snižuje jeho účinnost. Jelikož roste exponenciálně s proudem a přenášené teplo lineárně je vhodné minimalizovat proud a tím zvýšit účinnost. S rostoucím rozdílem teplot klesá účinnost, běžné články jsou schopné dosáhnout maximální rozdílu teplot přibližně 65 °C při ideálních podmínkách. Pokud je třeba dosáhnout většího teplotního rozdílu lze zapojit Peltierovy články do kaskády. Tím dojde ke snížení množství přeneseného tepla a účinnosti, jelikož je nutné odvádět teplo nejen z chlazeného objektu ale také z předchozích Peltierových článků [10].

Peltierův jev je opakem Seebeckova jevu a velice úzce s ním souvisí. Tento jev vytváří napětí při rozdílu teplot, zatímco Peltierův jev vytváří rozdíl teplot při průtoku proudu. Další podobnost lze vidět u Peltierova koeficientu  $\Pi$  a Seebeckova koeficientu  $S$  materiálu, které lze jednoduše přepočítat z jednoho na druhý pomocí vztahu [10]

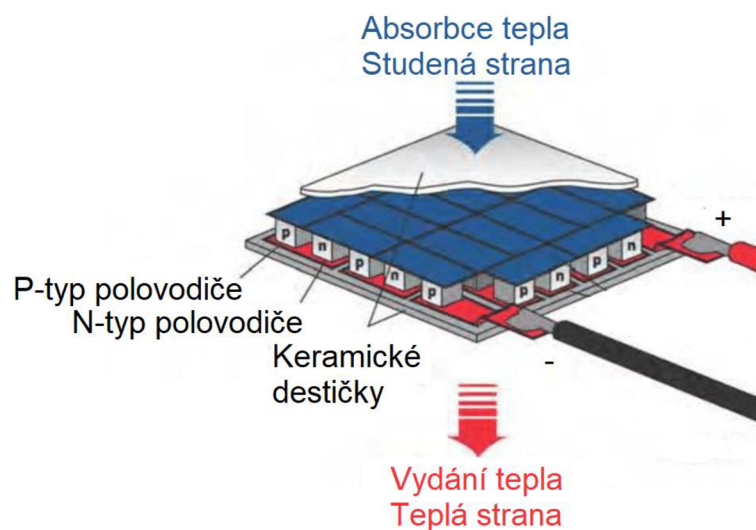
$$\Pi = T \cdot S \quad (1.11)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota.

Na Peltierově článku lze pozorovat i Seebeckův jev, díky čemuž je možné jej použít i jako generátor elektrické energie nebo snímač teploty [10].

## 1.2.2 Konstrukce Peltierova článku

Moderní Peltierovy články se skládají ze dvou keramických destiček, mezi kterými jsou kvádry z P a N typu polovodiče. Jako polovodič se používá tellurid bismutitý dopovaný antimonem a selenem. Keramické destičky slouží jako nosný substrát, který dodává Peltierovému článku mechanickou odolnost a elektricky jej izoluje od okolí. Na obrázku 1.4 je zobrazena konstrukce typického Peltierova článku.



Obr. 1.4 Konstrukce Peltierova článku (převzato z [11])

Pokud je třeba zajistit voděodolnost je do volného prostoru mezi keramickými destičkami nanášen silikonový tmel. Na keramickém substrátu je nanášen vodivý motiv, který slouží k propojení polovodičových kvádrů a připojení vodičů. Polovodičové kvádry jsou připájeny na vodivý motiv buď pájkou na bázi bismutu s teplotou tavení okolo 138 °C nebo pájkou na bázi cínu s teplotou tavení okolo 230 °C [11].

### 1.2.3 Použití Peltierova článku

Většina Peltierových článků je schopná pracovat pouze do teploty 70 °C až 90 °C. Pro použití při vyšší teplotě je nutné použít vysokoteplotní Peltierovy články, jejichž pracovní teplota běžně dosahuje cca 200 °C. Existují také speciální typy pracující až do 800 °C [12]. Při provozu jakéhokoliv typu je nutné, aby na teplé straně byl instalován dostatečně velký chladič, který zabrání přehřátí a jeho zničení [11].

Ačkoliv je Peltierův jev způsoben proudem je možné Peltierův článek budit napětím [11]. Výhoda buzení napětím spočívá v jednodušším návrhu zařízení. Buzení lze provést dvěma způsoby, a to buď pomocí lineární nebo PWM (*Pulse Width Modulation*) regulace. Z důvodu větší účinnosti je vhodné použít PWM. Za spínací prvek je žádoucí vložit filtr typu dolní propust. Tento filtr provede integraci (za určitých podmínek) nespojitě PWM regulace, tím dojde k vyhlazení napětí, zvýšení účinnosti a snížení rušení.

## 1.3 Regulace teploty

Regulace teploty slouží k nastavení a udržení teploty dle požadavků uživatele. Pro regulaci teploty je typické použití On/Off regulace. Použití PID regulace je také možné, ale vzhledem ke složitější realizaci není tak časté.

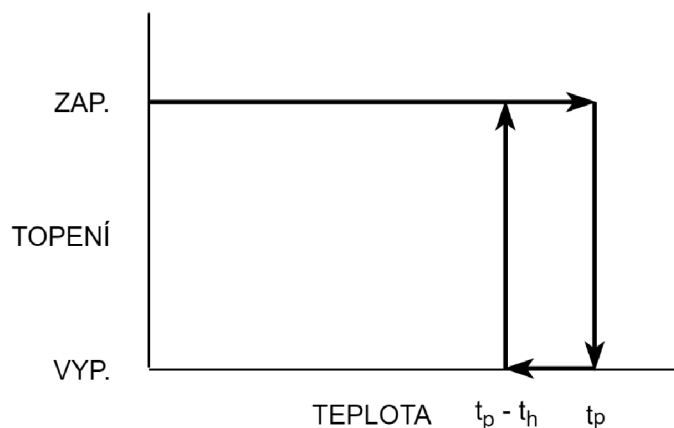
### 1.3.1 On/Off regulace

Princip On/Off regulace spočívá v zapnutí akčního členu při klesnutí regulované veličiny pod dolní mezní hodnotu a vypnutí akčního členu při překročení požadované hodnoty regulované veličiny [13]. Parametry této regulace jsou:

- požadovaná hodnota  $t_p$ ,
- hystereze  $t_h$ .

Grafické vyjádření průběhu zapnutí a vypnutí akčního členu (topení) v závislosti na regulované veličině (teplota) je na obrázku 1.5.





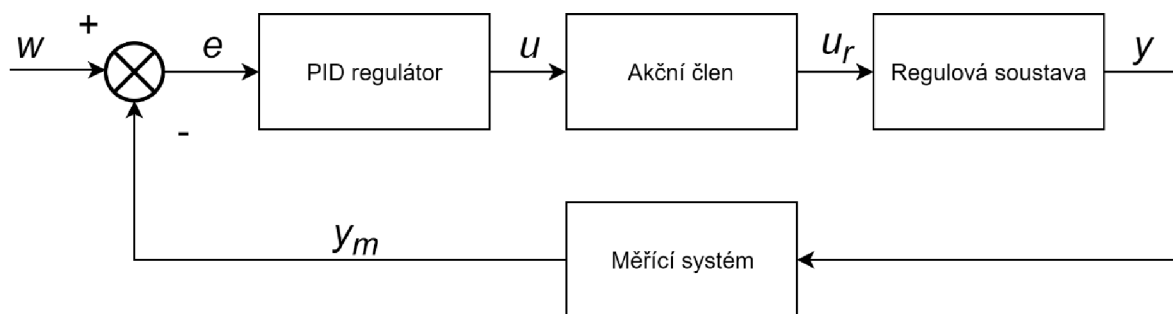
Obr. 1.5 Závislost stavu akčního členu (topení) na regulované veličině (teplota) u On/Off regulace (převzato z [13])

Použití On/Off regulace je velice jednoduché a používá se v termostatech. Značná nevýhoda spočívá v kmitání regulované veličiny mezi teplotami  $t_p - t_h$  a  $t_p$ . Důsledkem kmitání je velice obtížné nastavení přesné hodnoty, jelikož pro přesnější nastavení je třeba snížit hysterezi [13]. Při jejím snížení dojde ke zvýšení frekvence spínání akčního členu. Snižovat ji však nejde neomezeně, jelikož při malé hodnotě se projeví šum a spínání akčního členu bude v podstatě náhodné a nedojde k dosažení požadované přesnosti. Pro přesné nastavení regulované veličiny je tedy nutné použít jiný regulátor.

### 1.3.2 PID regulace

PID regulace je univerzální a vhodná pro aplikace, kde je kritická přesnost regulované veličiny [13].

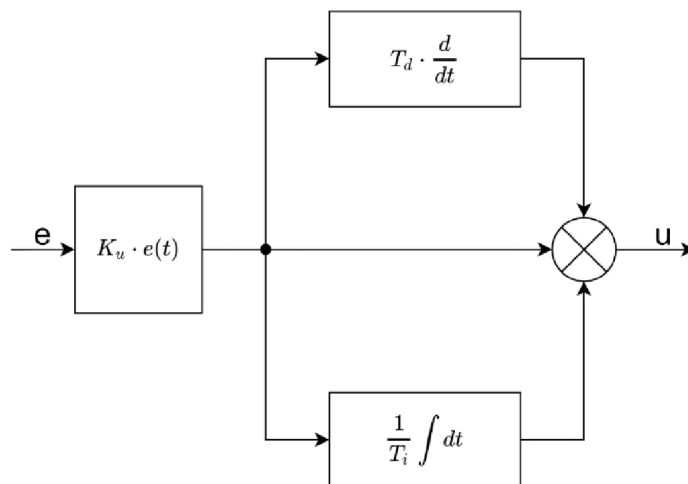
Pro realizaci PID realizace se používá uzavřená regulační smyčka na obrázku 1.6. Ve smyčce dochází k porovnávání regulované veličiny  $y$  s její požadovanou hodnotou  $w$ . Z jejich rozdílu a dalších parametrů PID regulátor vypočte novou hodnotu veličiny  $u$ , která řídí akční člen a tím mění hodnotu regulované veličiny. Alternativou k uzavřené smyčce je otevřená smyčka, která ale nedosahuje kvalit uzavřené smyčky a její použití není vždy možné [14].



Obr. 1.6 Uzavřená regulační smyčka (převzato z [14])

Na rozdíl od jednodušších druhů regulace je PID regulace schopna provádět regulaci v závislosti na předchozích stavech soustavy a také na rychlosti změny regulované veličiny. Díky tomu dosahuje přesnější a stabilnější regulace [14].

Regulátor se skládá ze tří složek a to: proporcionální, integrační a derivační. Existuje několik způsobů zapojení jednotlivých složek, pozornost bude věnována pouze jednomu, jenž je zobrazen na obrázku 1.7.



Obr. 1.7 PID regulátor (převzato z [15])

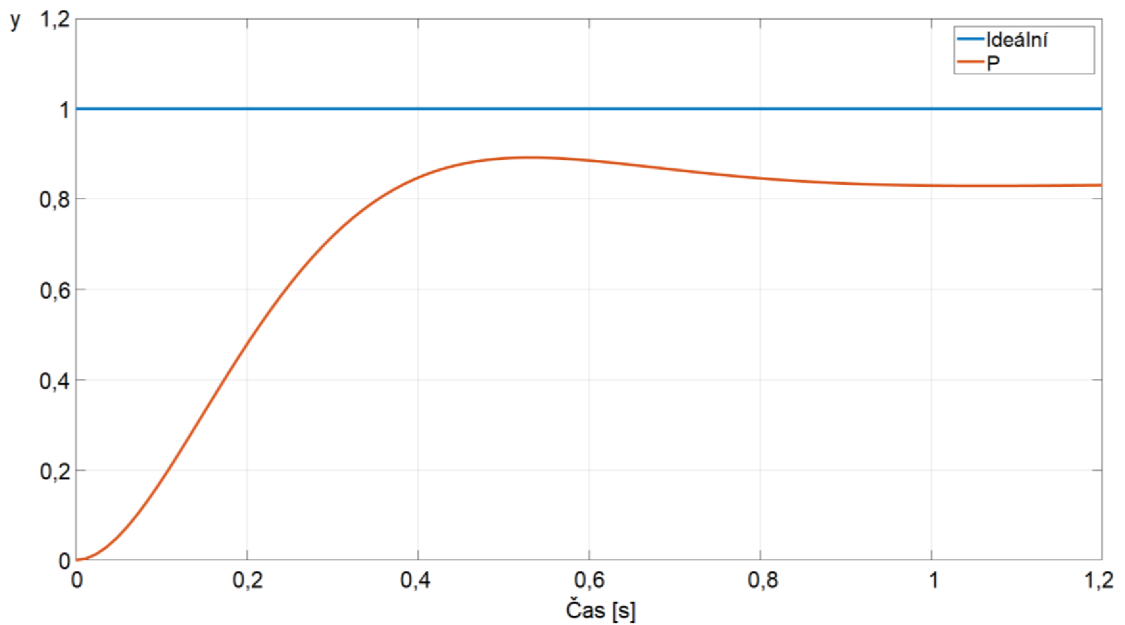
kde  $K_u$  je zesílení proporcionální složky,  $T_d$  je derivační časová konstanta a  $T_i$  je integrační časová konstanta. Hodnoty jednotlivých složek definují chování regulátoru.

Výstup tohoto regulátoru v časové oblasti lze popsat rovnicí [15]

$$u(t) = K_u \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\sigma) d\sigma + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.12)$$

### Proporcionální složka

Proporcionální (P) složka zesiluje regulační odchylku. Při použití pouze P složky má regulátor statickou odchylku ve všech případech, kromě stavu kdy je regulační odchylka nulová. Tento stav nastává když se regulovaná veličina rovná požadované hodnotě. Tohoto stavu však nemůže dosáhnout. Při příliš velké proporcionální složce se systém stane nestabilním [15]. Odezva P regulátoru na jednotkový skok je na obrázku 1.8.

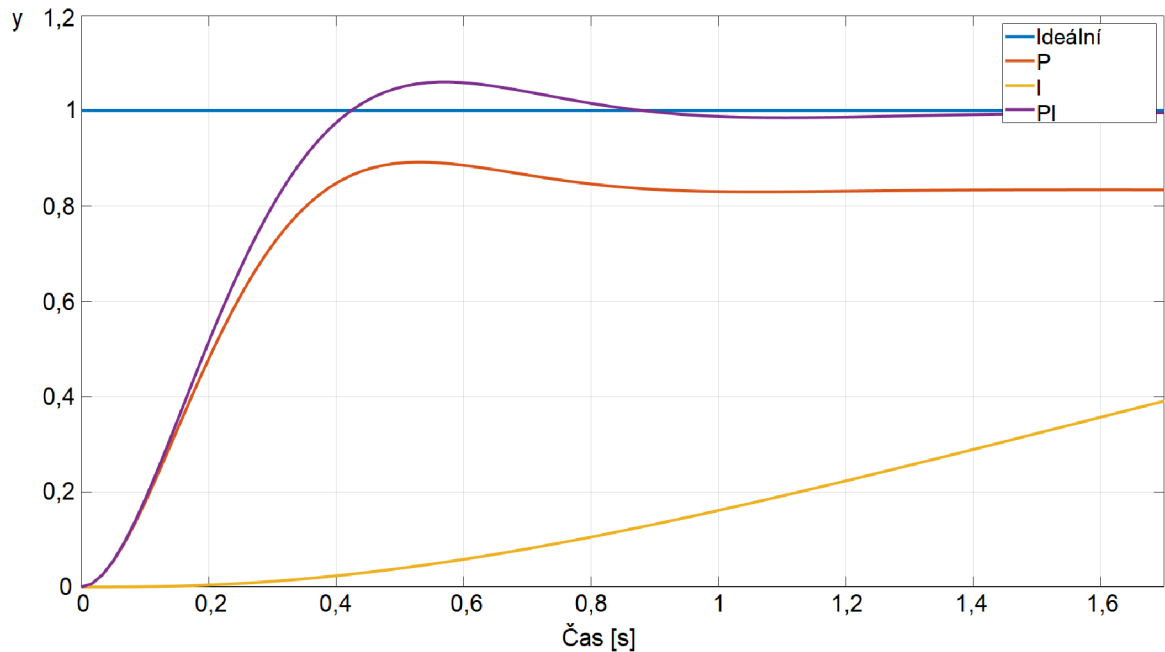


Obr. 1.8 Odezva P regulátoru na jednotkový skok

Graf na obrázku 1.8 ukazuje, že při použití pouze P složky se vyskytuje statická odchylka.

### **Integrační složka**

Integrační (I) složka integruje regulační odchylky z minulosti. Použití samotné I složky je možné, ale regulátor je velmi pomalý a náchylný k oscilacím. Pokud se použije kombinace P a I složek vznikne PI regulátor, který je schopen eliminovat regulační odchylku a není příliš pomalý. Při použití I složky může nastat tzv. wind-up efekt kdy dojde k vzniku masivní odchylky při poruchovém stavu a neočekávanému chování při odstranění poruchy [15]. Odezva P, I a PI regulátoru na jednotkový skok je na obrázku 1.9.

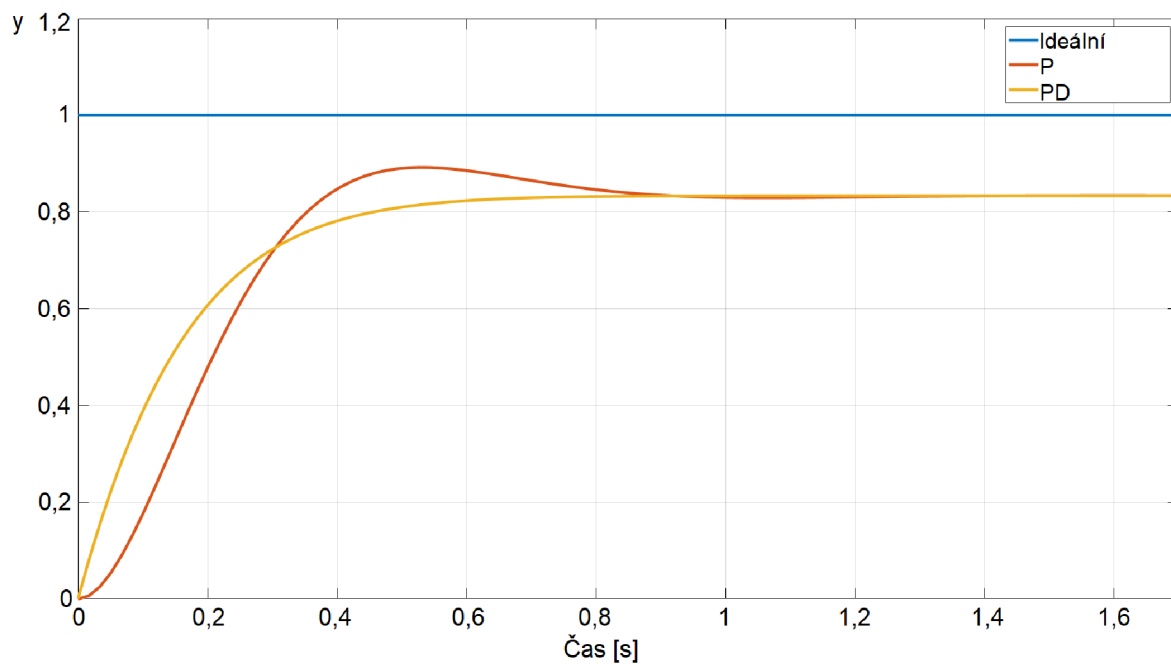


Obr. 1.9 Odezva P, I a PI regulátoru na jednotkový skok

Graf na obrázku 1.9 ukazuje, že samotný I regulátor je velice pomalý a nebude schopen reagovat na rychlé změny. Při použití PI regulátoru se odstraní statická odchylka a regulátor se zrychlí.

### Derivační složka

Derivační (D) složka reaguje na změnu rychlosti regulační odchylky. Rychlá změna regulační odchylky způsobí velkou změnu řídicí veličiny, díky tomu systém lépe reaguje na náhlé změny referenční veličiny a regulované veličiny. Samotná složka D se nepoužívá, nachází uplatnění pouze spolu s P nebo PI složkami a vytvoří tak PD, respektive PID regulátor. Příliš velká D složka způsobí nestabilitu systému. D složka se chová jako filtr typu horní propust pro regulační odchylku a může jednoduše způsobit nestabilitu systému a také zvýšit jeho náchylnost na šum [15]. Odezva P a PD regulátoru na jednotkový skok je na obrázku 1.10.

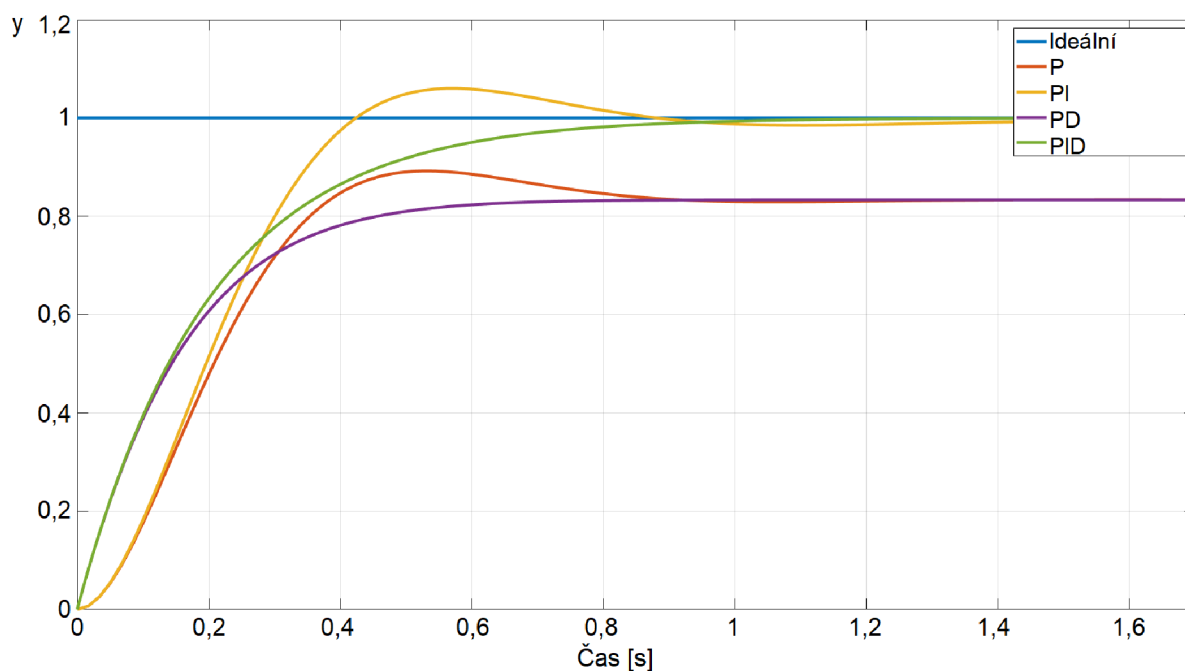


Obr. 1.10 Odezva P a PD regulátoru na jednotkový skok

Graf na obrázku 1.10 ukazuje, že při použití PD regulátoru dochází k rychlejšímu ustálení, ale vyskytuje se statická odchylka.

### Současné působení složek PID

Při použití všech složek vznikne PID regulátor. Tento regulátor je ve většině případů vhodnější použít než regulátor složený jen z některých složek [15]. Odezva P, PI, PD a PID regulátoru na jednotkový skok je na obrázku 1.11.



Obr. 1.11 Odezva P, PI, PD a PID regulátoru na jednotkový skok

Na obrázku 1.11 je patrné, že PI regulátor odstraní statickou odchylku P složky. PD regulátor reaguje rychleji než samotná P složka. PID regulátor kombinuje výhody PI a PD tím, že zrychlí odezvu, odstraní překmity a statickou odchylku.

### Ladění složek PID regulátoru

Každý PID regulátor obsahuje tři konstanty, jednu pro každou složku. Tyto konstanty je nutné naladit, aby bylo dosaženo požadovaného chování regulátoru. Teoreticky nejlepší způsob spočívá ve vytvoření matematického modelu systému a konstanty pak lze dopočítat pro požadovanou odezvu. Vytvořit matematický model reálné soustavy je však značně komplikované a je tedy nutné naladit PID regulátor experimentálně. Nalezení konstant experimentálně nemusí být jednoduché a je nutné mít dobré znalosti o funkci systému a teorii PID regulátoru. Optimální hodnoty konstant záleží na specifické aplikaci a požadavky na regulátor lze klást různé např. minimální překmit nebo rychlé ustálení. Ať jsou požadavky jakékoliv je nutné zajistit, aby systém byl za všech okolností stabilní a nekmital netlumenými kmity. Doba ustálení regulované veličiny by také měla být minimalizována [15].

Existuje několik metod návrhu regulátorů. Volba metody závisí na tom, jestli lze systém dočasně provozovat s otevřenou smyčkou tzv. off-line ladění. Pokud není možné systém provozovat s otevřenou smyčkou je třeba použít tzv. on-line ladění. Velmi známou metodou on-line ladění je Ziegler-Nicholsova metoda. Tato metoda spočívá v prvotním nastavení I a D časových konstant na nulu a zvyšování zesílení P složky, dokud nedojde k netlumeným kmitům na výstupu. Poté se odečte kritické zesílení  $K_c$  a změří se perioda oscilací  $T_c$  [15].

Kritické zeílení  $K_c$  je rovno nastavenému zesílení P složky. Konstanty P, I a D složky se pak dopočtou pomocí převodních vztahů z tabulky 1.4.

Tab. 1.4 Převodní vztahy Ziegler-Nicholsovy metody

Regulátor	$K_u$ [-]	$T_i$ [s]	$T_d$ [s]
P	$0,5 \cdot K_c$	-	-
PD	$0,65 \cdot K_c$	-	$0,12 \cdot T_c$
PI	$0,45 \cdot K_c$	$0,85 \cdot T_c$	-
PID	$0,65 \cdot K_c$	$0,5 \cdot T_c$	$0,12 \cdot T_c$

Ziegler-Nicholsova metoda je vhodná pro prvotní nastavení konstant. Další ladění se provádí dle zkušeností návrháře regulátoru a často spočívá v aplikaci metody „pokus-omyl“.

### Implementace PID regulátoru

PID regulátor nelze implementovat do softwaru, jelikož PID regulátor pracuje se spojitým časem a mikrokontrolér nikoliv. Ale je možné PID regulátor upravit, aby pracoval s diskretním časem. V procesu je integrace nahrazena sumací a derivace nahrazena diferencí. Touto úpravou vznikne PSD regulátor, který je ekvivalentní PID regulátoru. V literatuře je velice běžné, že se místo pojmu PSD regulátor používá PID regulátor. Pokud se tedy provede úprava rovnice (1.12) vznikne následující rovnice, kterou je možné implementovat do softwaru [15]

$$u(n) = K_u e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (e(n) - e(n-1)) \quad (1.13)$$

kde  $K_u$  je zesílení P složky,  $K_i$  a  $K_d$  jsou diskretní ekvivalenty časových konstant  $T_i$  a  $T_d$ , které se vypočtou následovně [15]

$$K_i = \frac{K_u T}{T_i} \quad (1.14)$$

$$K_d = \frac{K_u T_d}{T} \quad (1.15)$$

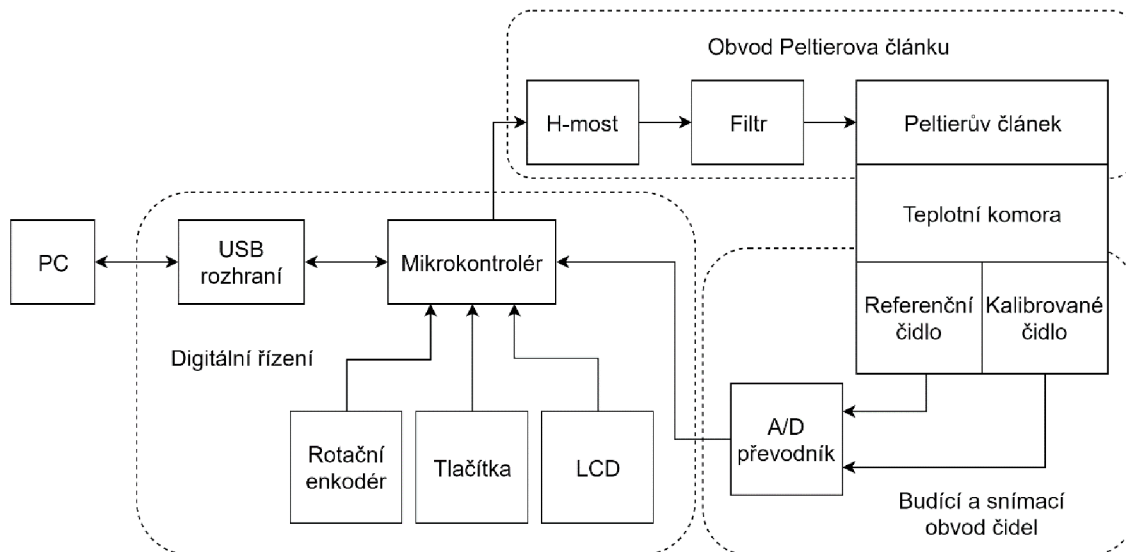
kde konstanta  $T$  je vzorkovací perioda systému a měla by být kratší než nejmenší časová konstanta v systému.

## 2 Návrh zařízení

Cílem této práce je navrhnout teplotní komoru, která umožní automatickou kalibraci čidel Pt100 a Pt1000. Komora je tvořena z tepelně izolovaného boxu opatřeného Peltierovým článkem. Součástí komory je také chladič a nezbytná řídicí jednotka. Řídicí jednotka bude měřit teplotu čidel, udržovat teplotu v komoře na požadované hodnotě a komunikovat s uživatelem. Uživatelské rozhraní je tvořeno displejem, čtyřmi tlačítky a rotačním enkodérem. Dálkové ovládání přes počítač je umožněno pomocí sběrnice USB (*Universal Serial Bus*). Požadavky kladené na komoru jsou:

- teplotní rozsah 0 °C až 80 °C,
- přesností nastavení teploty  $\pm 0,15$  °C v celém teplotním rozsahu,
- stabilita nastavené teploty  $\pm 0,02$  °C,
- rozlišení měření 0,01 °C,
- čtyřvodičové měření kalibrovaného a referenčního čidla,
- snadná obsluha,
- napájecí napětí 12 V.

Návrh komory je rozdělen do čtyř částí: obvod Peltierova článku, budící a snímací obvod čidel, digitální řízení a napájecí zdroj. Blokové schéma řídicí jednotky je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Blokové schéma řídicí jednotky

Obvod Peltierova článku se skládá z H-mostu pro přepólování napětí a regulaci výkonu Peltierova článku. Za H-mostem je umístěn filtr typu dolní propust pro integraci nespojitého výstupního napětí z H-mostu. Budící a snímací obvod čidel čtyřvodičově měří teplotu dvou čidel poměrem k referenčnímu rezistoru. Jedno čidlo je typu Pt100 a měří skutečnou teplotu



komory. Druhé čidlo podstupuje kalibraci a může být typu Pt100 nebo Pt1000. Digitální řízení reguluje teplotu v komoře dle požadavků uživatele a komunikuje s ním.

## 2.1 Obvod Peltierova článku

V této kapitole je navržena a popsána část obvodu, která slouží k buzení Peltierova článku a zajištění jeho bezpečného provozu. Skládá se z Peltierova článku, H-mostu, snímače proudu, výstupního filtru, chladicího ventilátoru a snímače napětí.

### 2.1.1 Peltierův článek

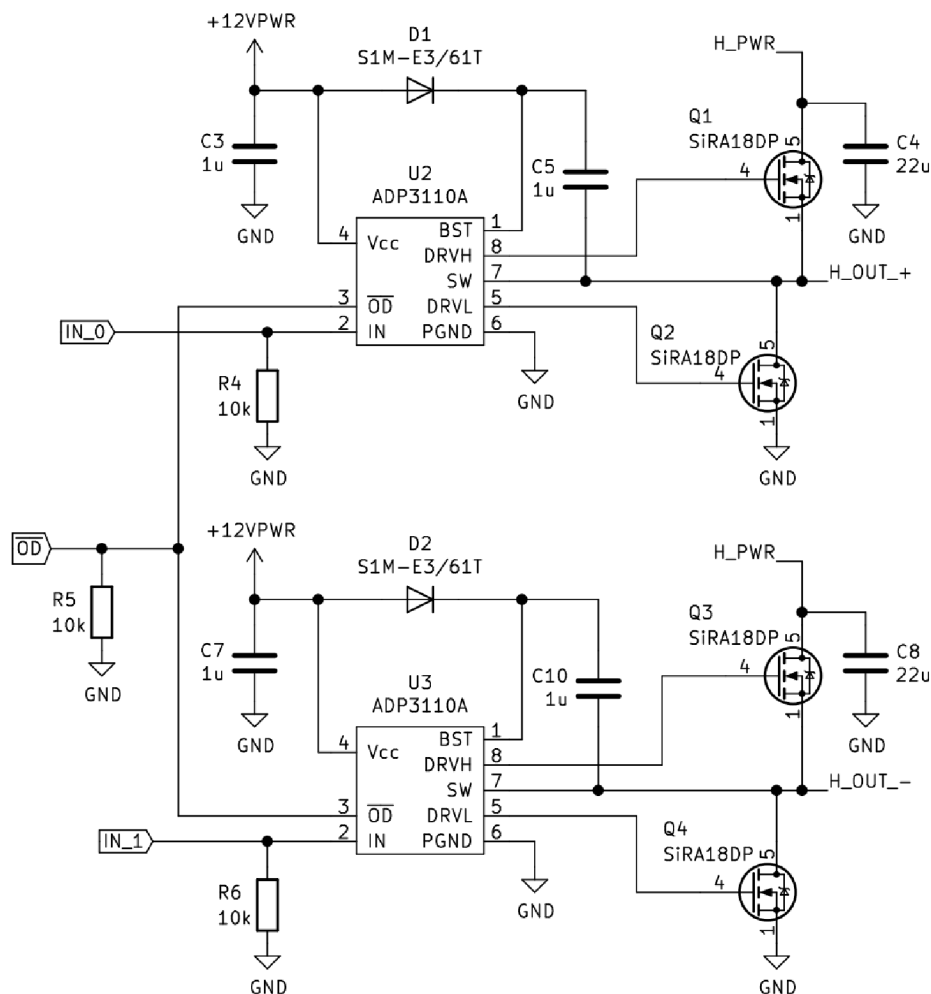
Požadavky při výběru Peltierova článku byly následující: maximální provozní teplota alespoň 90 °C, izolace proti vlhkosti a velký chladicí výkon. Izolace je nutná, jelikož zabrání poškození článku v případě kondenzace vzdušné vlhkosti za nízké teploty. S ohledem na tyto požadavky byl vybrán Peltierův článek Hebei TEC1-12710HTS [16]. Jeho maximální provozní teplota dosahuje hodnoty 225 °C a článek obsahuje silikonovou izolaci zajišťující jeho voděodolnost. Při napájení napětím 12 V je proud jím tekoucí přibližně 7 A. Na tento proud jsou navrženy budící obvody.

### 2.1.2 Řízení Peltierova článku

H-most byl zvolen pro jeho schopnost přepólovat zátěž a regulovat výkon spínáním tranzistorů pomocí PWM. Za ním byl umístěn LC filtr typu dolní propust pro integraci nespojitě PWM. H-most byl navržen ze čtyř NMOS tranzistorů a dvou budičů polomostů.

Při výběru tranzistorů byl kladen důraz na vyváženost parametrů jako jsou odpor kanálu v sepnutém stavu a celková kapacita hradla. Z těchto důvodů byly vybrány tranzistory SiRa18DP společnosti Vishay [17]. Odpor kanálu v sepnutém stavu dosahuje hodnoty maximálně 7,5 mΩ a kapacita hradla nanejvýš 1 nF.

Budiče polomostu musí obsahovat bootstrap obvod pro buzení high-side tranzistoru, ochranu proti otevření obou tranzistorů zároveň a musí disponovat možností oba tranzistory zavřít. Vhodné také je, aby byly budiče schopny rychle distribuovat požadované množství náboje do vstupů tranzistorů a tím snížili jejich ztrátový výkon. Byly vybrány budiče ADP3110A společnosti ON Semiconductor [18]. Pro správu funkci bootstrap obvodů je nutné ke každému budiči připojit diodu a kondenzátor. Dále jsou umístěny pull-down rezistory na ovládací vstupy budičů pro zabezpečení definované napěťové úrovně řídicích vstupů před inicializací mikrokontroléru. Schéma H-mostu je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Schéma H-mostu

Řízení H-mostu probíhá pomocí třech signálů IN\_0, IN\_1 a OD. Signály IN\_0 a IN\_1 jsou komplementární PWM s frekvencí  $f_{PWM}$  100 kHz. Ta byla zvolena jako kompromis mezi ztrátami tranzistorů a nároky na filtr. Střidy signálů IN\_0 a IN\_1 určují polaritu a velikost napájecího napětí Peltierova článku, čímž regulují jeho výkon a směr toku tepla. Signál OD (*Output Disable*) zavírá všechny čtyři tranzistory a odpojuje tak Peltierův článek od napájení.

Pro bezpečný provoz tranzistorů je nutné, aby maximální výkonová ztráta na nich nezpůsobila nepřipustně velký ohřev nad jejich maximální povolenou teplotu přechodu. Ztrátový výkon tranzistorů je způsoben převážně dvěma druhy ztrát. První jsou ztráty  $P_{ON}$  způsobené odporem kanálu  $R_{DS(ON)}$  v sepnutém stavu. Další jsou dynamické ztráty  $P_{SW}$  zapříčiněny přechodem mezi stavy kdy není plně otevřen ani plně zavřen. Ztráty  $P_{ON}$  se vypočtou ze známého vztahu pro výkon [19]

$$P_{ON} = I_O^2 R_{DS(ON)} = 7^2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 0,37 \text{ W} \quad (2.1)$$

kde  $I_O$  je proud v sepnutém stavu. Pro výpočet ztrát  $P_{SW}$  je nutné znát hodnotu proudu  $I_g$ , kterým je buzeno hradlo. Tento proud se určí dle Ohmova zákona

$$I_g = \frac{U_{GS}}{R_{gate} + R_{driver}} = \frac{12}{3,2 + 3} = 1,94 \text{ A} \quad (2.2)$$

kde  $U_{GS}$  je napětí mezi hradlem a source tranzistoru,  $R_{gate}$  je odpor hradla a  $R_{driver}$  je výstupní odpor budiče. Dynamické ztráty  $P_{SW}$  se vypočtou dle vztahu [19]

$$P_{SW} = U_{SW} I_O f_{PWM} \frac{Q_g}{I_g} = 12 \cdot 7 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{21,5 \cdot 10^{-9}}{1,94} = 93 \text{ mW} \quad (2.3)$$

kde  $U_{SW}$  je napájecí napětí tranzistoru a  $Q_g$  je celkový náboj hradla. Celkový ztrátový výkon  $P$  tranzistoru je součtem dílčích ztrát

$$P = P_{ON} + P_{SW} = 0,37 + 93 \cdot 10^{-3} = 0,49 \text{ W} \quad (2.5)$$

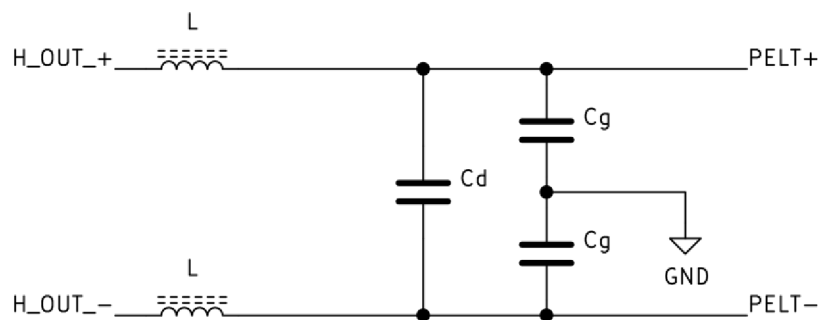
Dle katalogového listu výrobce je tepelný odpor  $R_{thJA}$  mezi přechodem a okolím  $70 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ . Tato hodnota platí pro trvalé zatížení při osazení tranzistoru na DPS (*Deska plošných spojů*) velikosti 1x1 palec. Teplota přechodu  $T_j$  se pak určí dle vztahu

$$T_j = T_A + R_{thJA} P = 50 + 70 \cdot 0,49 = 84,3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

Teplota  $T_A$  je teplota okolí tranzistorů. Teplota přechodu tranzistorů při trvalém maximálním zatížení může dosáhnout  $84,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , což je pod maximální přípustnou teplotou přechodu  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  a tranzistory lze bezpečně použít.

### 2.1.3 LC filtr

Jelikož napájení Peltierova článku PWM signálem snižuje jeho účinnost, je nutné PWM signál vystupující z H-mostu vyhladit. Byl zvolen pasivní LC filtr 2. řádu typu dolní propust, který filtruje jak diferenciální signály, tak signály se společnou zemí. Schéma filtru je na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Schéma LC filtru pro vyhlazení napětí Peltierova článku

Pro výpočet hodnot součástek bylo nutné zvolit mezní frekvenci  $f_m$  a určit odpor zátěže  $R_{LOAD}$ , v tomto případě odpor Peltierova článku. Mezní frekvence byla zvolena 2 kHz, což je

50x méně než je frekvence PWM a je tak splněna podmínka integrace. Odpor Peltierova článku byl odečten z katalogového listu a jeho hodnota je přibližně  $1,5 \Omega$  [16]. Hodnoty součástek se vypočtou následovně [20]

$$L = \frac{R_{LOAD}\sqrt{2}}{4\pi f_m} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot 2000} = 85 \mu\text{H} \quad (2.10)$$

$$C_d = \frac{1}{2,2\pi f_m R_{LOAD}\sqrt{2}} = \frac{1}{2,2 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2}} = 34 \mu\text{F} \quad (2.11)$$

$$C_g = \frac{C_d}{5} = \frac{34 \cdot 10^{-6}}{5} = 6,8 \mu\text{F} \quad (2.12)$$

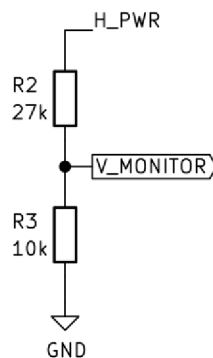
Hodnoty filtru byly zvoleny z dostupných řad  $L = 100 \mu\text{H}$ ,  $C_d = 47 \mu\text{F}$ ,  $C_g = 10 \mu\text{F}$ . Proudová zatížitelnost zvolených cívek musí být alespoň 7 A.

#### 2.1.4 Snímač napětí a proudu Peltierova článku

Pro měření velikosti napětí Peltierova článku byl navržen napěťový dělič. Ten upravuje velikost napájecího napětí 12 V na hodnotu vhodnou pro měření A/D (*Analogově Digitálním*) převodníkem mikrokontroléru, maximálně tedy 4,096 V. Hodnota odporu R3 byla zvolena 10 k $\Omega$ . Pro výpočet hodnoty odporu R2 je použit vztah

$$R_2 = R_3 \left( \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} - 1 \right) = 10 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{12}{3} - 1 \right) = 30 \text{ k}\Omega \quad (2.13)$$

Hodnota odporu R2 byla zvolena 27 k $\Omega$ . Výstupní napětí 3 V bylo zvoleno tak, aby při zvýšení napájecího napětí nad nominální hodnotu byl A/D převodník schopen měřit a nedošlo k jeho saturaci. Se zvolenými rezistory je schopen měřit vstupní napětí až 15,2 V. Schéma navrženého děliče je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Schéma děliče napětí pro snímání napětí Peltierova článku

Pro zajištění bezpečného provozu Peltierova článku, je třeba snímat proud, který jím teče. K tomuto účelu byl vybrán integrovaný obvod MAX4173HESA+ společnosti Maxim

Integrated [21]. Tento obvod slouží jako převodník stejnosměrného proudu na napětí. Funguje na principu diferenciálního zesilovače, který zesiluje úbytek napětí na snímacím rezistoru.

Výstupní napětí je požadováno v rozsahu 0 až 4 V pro využití plného rozsahu A/D převodníku v mikrokontroléru. Maximální napětí  $U_{INMAX}$ , které lze zesilovačem snímat se vypočte jako

$$U_{INMAX} = \frac{U_{OUTMAX}}{A_u} = \frac{4}{100} = 40 \text{ mV} \quad (2.7)$$

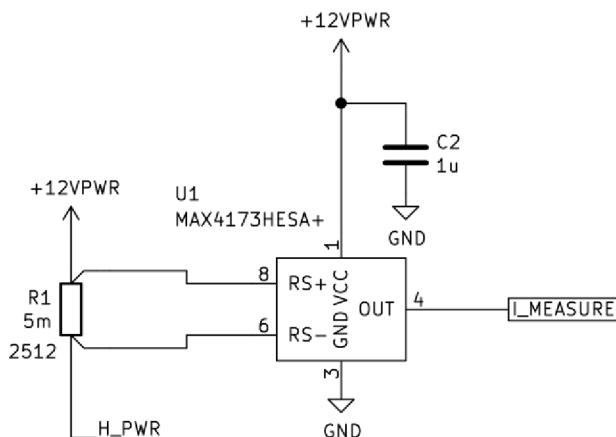
kde  $A_u$  je zesílení převodníku. Musí být umožněno měřit maximální proud Peltierovým článkem tj. 7 A. Při běžné toleranci napájecího napětí lze počítat s vyšším maximálním proudem  $I_{MAX}$  o hodnotě až 8 A. Hodnota rezistoru R1 se pak vypočte dle Ohmova zákona

$$R_1 = \frac{U_{INMAX}}{I_{MAX}} = \frac{0,04}{8} = 5 \text{ m}\Omega \quad (2.8)$$

Rezistor s odporem 5 m $\Omega$  je běžně dostupný. Je nutné vypočítat maximální ztrátový výkon rezistoru dle vztahu

$$P_{MAX} = I_{MAX}^2 R_1 = 8^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,32 \text{ W} \quad (2.9)$$

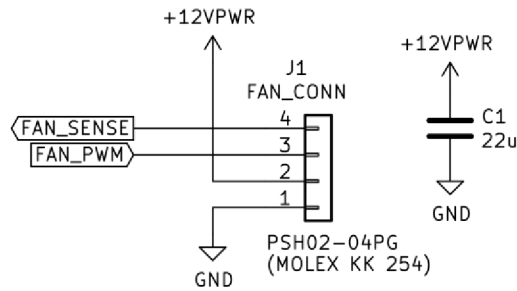
Ztrátový výkon je v roven 0,32 W. Byl zvolen rezistor v pouzdře 2512, které má výkonovou zatížitelnost 1W. Schéma obvodu pro měření proudu je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5 Schéma obvodu pro měření proudu

## 2.1.5 Chladící ventilátor

Chladící ventilátor se nachází na chladiči, který je připevněn k teplé straně Peltierova článku. Připojení ventilátoru se provádí čtyřmi vodiči. Schéma zapojení je na obrázku 2.6.

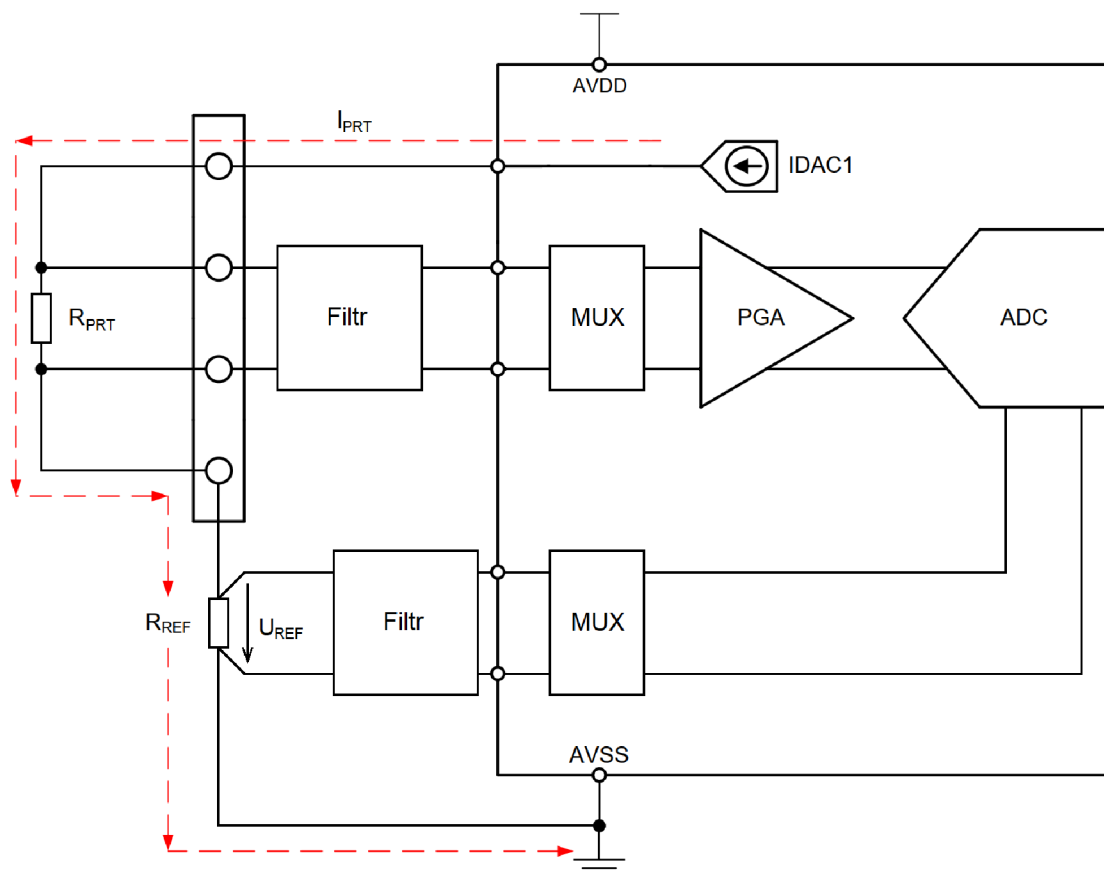


Obr. 2.6 Schéma zapojení chladícího ventilátoru

Regulace otáček ventilátoru se provádí pomocí PWM s frekvencí 25 kHz, která řídí logické obvody integrované ve ventilátoru.

## 2.2 Budící a snímací obvod čidel

Budící a snímací část slouží ke snímání teploty komory a čidla podstupující kalibraci. Jako snímací prvek pro měření teploty komory je použito čidlo Pt100. Čidlo podstupující kalibraci může být Pt100 nebo Pt1000. Odpor těchto čidel je měřen jako poměr k referenčnímu rezistoru. Principiální schéma měřícího obvodu je na obrázku



Obrázek 2.1 Principiální schéma obvodu pro čtyřvodičové měření odporu poměrovou metodou

Připojení čidla  $R_{PRT}$  a referenčního rezistoru  $R_{REF}$  je čtyřvodičově, tudíž se neuplatní odpor přívodních vodičů. Čidlo a referenční rezistor jsou buzeny proudem  $I_{PRT}$ , který je dodáván proudovým zdrojem integrovaným v A/D převodníku. Proud  $I_{PRT}$  vytváří na referenčním rezistoru  $R_{REF}$  úbytek napětí  $U_{REF}$ . Tento úbytek tvoří referenční napětí A/D převodníku. Jelikož je nutné měřit dvě čidla zároveň jsou vstupní obvody (filtry, referenční rezistor) duplikovány a je vytvořena druhá měřící větev. Zesilovač PGA (*Programmable Gain Amplifier*) a samotný A/D převodník ADC (*Analog to Digital Converter*) jsou přepínány mezi větvemi pomocí analogových multiplexerů. V druhé větvi je možné přepínat referenční rezistor. Kdy jeden rezistor je použit pro měření odporů čidla Pt100 a druhý pro měření odporu čidla Pt1000.

### 2.2.1 Referenční čidlo a rezistory

Referenční čidlo slouží k přesnému měření teploty komory a její regulaci. Bylo zvoleno čidlo NB-PTCO-058. Je typu Pt100, tenkovrstvé konstrukce a třídy přesnosti AA [22]. Teplotní rozsah tohoto čidla se liší od normované velikosti a výrobce jej udává  $-30\text{ °C}$  až  $200\text{ °C}$ , bude tedy schopno pracovat v požadovaném rozsahu. Budicí proud  $I_{PRT}$  pro čidlo Pt100 byl zvolen  $500\text{ }\mu\text{A}$  jako kompromis mezi šumem a samoohřevem. Je vhodné ověřit, jak velká je chyba způsobená ohřátím čidla vlivem samoohřevu  $\Delta t_{SH}$  pomocí vztahu

$$\Delta t_{SH} = \frac{P}{E} = \frac{I_{PRT}^2 R_{PRTMAX}}{E} = \frac{(500 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 131}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,065\text{ °C} \quad (2.14)$$

kde  $R_{PRTMAX}$  je maximální odpor čidla a  $E$  je koeficient samoohřevu. Hodnota koeficientu samoohřevu je platná pro čidlo umístěné ve volném prostoru s rychlostí proudění vzduchu  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V komoře je čidlo umístěno na hliníkové krabičce, která z něj teplo odvádí, chyba je tedy menší než je vypočteno.

Pro poměrové měření odporu je nutné, aby hodnota referenčního rezistoru byla větší než hodnota měřeného odporu. Pokud by tak nebylo, tak by při průtoku proudu  $I_{PRT}$  úbytek napětí na měřeném čidle byl větší než úbytek na referenčním rezistoru  $U_{REF}$ , což by způsobilo saturaci A/D převodníku. Také není vhodné volit referenční rezistor příliš velký, jelikož by se více uplatnil šum a nevyužil by se maximální rozsah A/D převodníku.

Pro měření čidel Pt100 byl zvolen rezistor MCTF0805TTX1001 o hodnotě  $1\text{ k}\Omega$ . Pro měření čidel Pt1000 byl zvolen budicí proud  $50\text{ }\mu\text{A}$  a rezistor MCTF0805TTX1002 o hodnotě  $10\text{ k}\Omega$ . Oba zvolené rezistory mají toleranci  $\pm 0,01\%$  a teplotní závislost odporu  $\pm 10\text{ ppm}\cdot\text{°C}^{-1}$  [23]. Připojení referenčních rezistorů je pro potlačení odporu vodičů řešeno čtyřvodičově.

V tabulce 2.1 jsou shrnuty důležité parametry měřícího obvodu

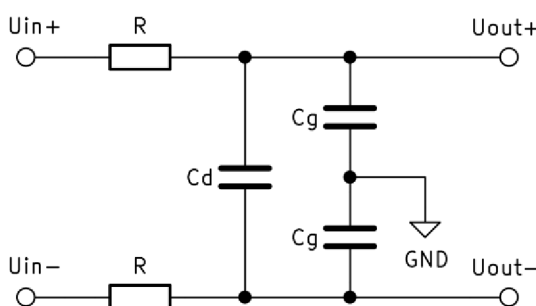
Tab. 2.1 Shrnutí parametrů měřícího obvodu

Čidlo	$U_{REF}$ [V]	$I_{PRT}$ [ $\mu$ A]	$R_{REF}$ [k $\Omega$ ]	$R_{PRTMAX}$ [ $\Omega$ ]
Pt100	0,5	500	1	131
Pt1000	0,5	50	10	1310

Referenční napětí je shodné jak při použití čidla Pt100 i Pt1000. Úbytek napětí na čidle je také shodný.

## 2.2.2 Vstupní filtry

Použití filtrů na vstupu A/D převodníku při poměrovém měření odporu je vhodné pro potlačení vlivu šumu působící na zařízení a přívodní vodiče čidel. Jeden filtr je na vzorkovacím vstupu a druhý na vstupu pro referenční napětí. Je nutné, aby oba filtry měly totožnou mezní frekvenci a topologii z důvodu identického potlačení šumu budícího proudového zdroje [24]. Byl zvolen pasivní RC filtr 1. řádu typu dolní propust, který filtruje jak diferenciální signály, tak signály se společnou zemí. Mezní frekvence  $f_m$  pro diferenciální signály byla zvolena 250 Hz. Mezní frekvence pro signály se společnou zemí byla zvolena 10x větší než pro diferenciální signály z důvodu potlačení offsetu [24]. Tohoto rozdílu bylo dosaženo zvolením vhodných hodnot kapacity kondenzátorů. Topologie použitých filtrů je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7 Topologie použitých RC filtrů

Kapacity kondenzátorů byla zvoleny  $C_d = 47$  nF a  $C_g = 4,7$  nF pro oba filtry. Jejich dielektrikum bylo zvoleno typu NP0, z důvodu vyšší přesnosti kapacity a vyšší stability [24]. Odpor rezistorů se liší pro každou větev měřícího obvodu. Hodnoty odporů by měly být maximálně 10 k $\Omega$ , z důvodu potlačení tepelného šumu a omezení chyby způsobené úbytkem napětí na nich [24]. Hodnoty odporů  $R_V$  pro vzorkovací kanál se vypočtou dle následujícího vztahu [24]



$$R_V = \frac{\frac{1}{f_m} - 2\pi C_d R_{PRTAV}}{4\pi C_d} = \frac{\frac{1}{250} - 2 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot 115}{4 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9}} = 6,72 \text{ k}\Omega \quad (2.15)$$

Změna odporu  $R_V$  vlivem změny odporu čidla  $R_{PRT}$  je zanedbatelná, stačí tedy počítat s průměrnou hodnotou odporu čidla  $R_{PRTAV}$  v požadovaném teplotním rozsahu. Hodnota odporu  $R_V$  byla zvolena odpor 6,8 k $\Omega$ . Mezní frekvence filtru vzorkovacího vstupu pro diferenciální signály  $f_{mV}$  se vypočte pomocí vztahu [24]

$$f_{mV} = \frac{1}{2\pi C_d (R_{PRTAV} + 2R_V)} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (115 + 2 \cdot 6800)} = 246 \text{ Hz} \quad (2.16)$$

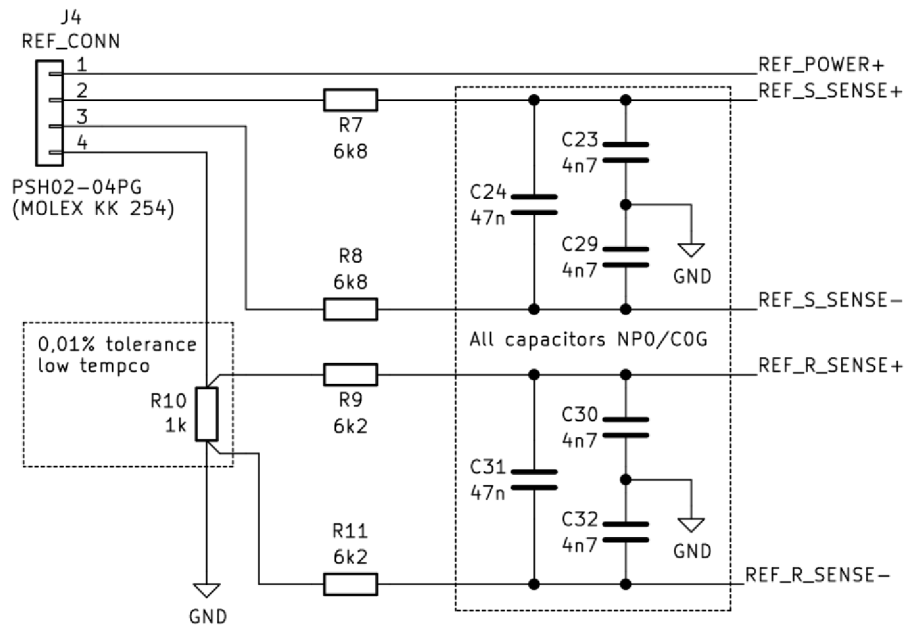
Pro výpočet odporu  $R_R$ , který je použit na vstupu referenčního napětí byla použita následující rovnice [24]

$$R_R = \frac{\frac{1}{f_m} - 2\pi C_d R_{REF}}{4\pi C_d} = \frac{\frac{1}{250} - 2 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot 1000}{4 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9}} = 6,27 \text{ k}\Omega \quad (2.17)$$

Hodnota odporu  $R_R$  byla zvolena 6,2 k $\Omega$ . Mezní frekvence filtru referenčního vstupu pro diferenciální signály  $f_{mR}$  se vypočte dle vztahu [24]

$$f_{mR} = \frac{1}{2\pi C_d (R_{REF} + 2R_R)} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (1000 + 2 \cdot 6200)} = 253 \text{ Hz} \quad (2.18)$$

Jelikož jsou mezní frekvence srovnatelné je šum proudového zdroje rovnoměrně potlačen a neuplatní se. Schéma vstupního kanálu pro měření referenčního čidla je na obrázku 2.8.



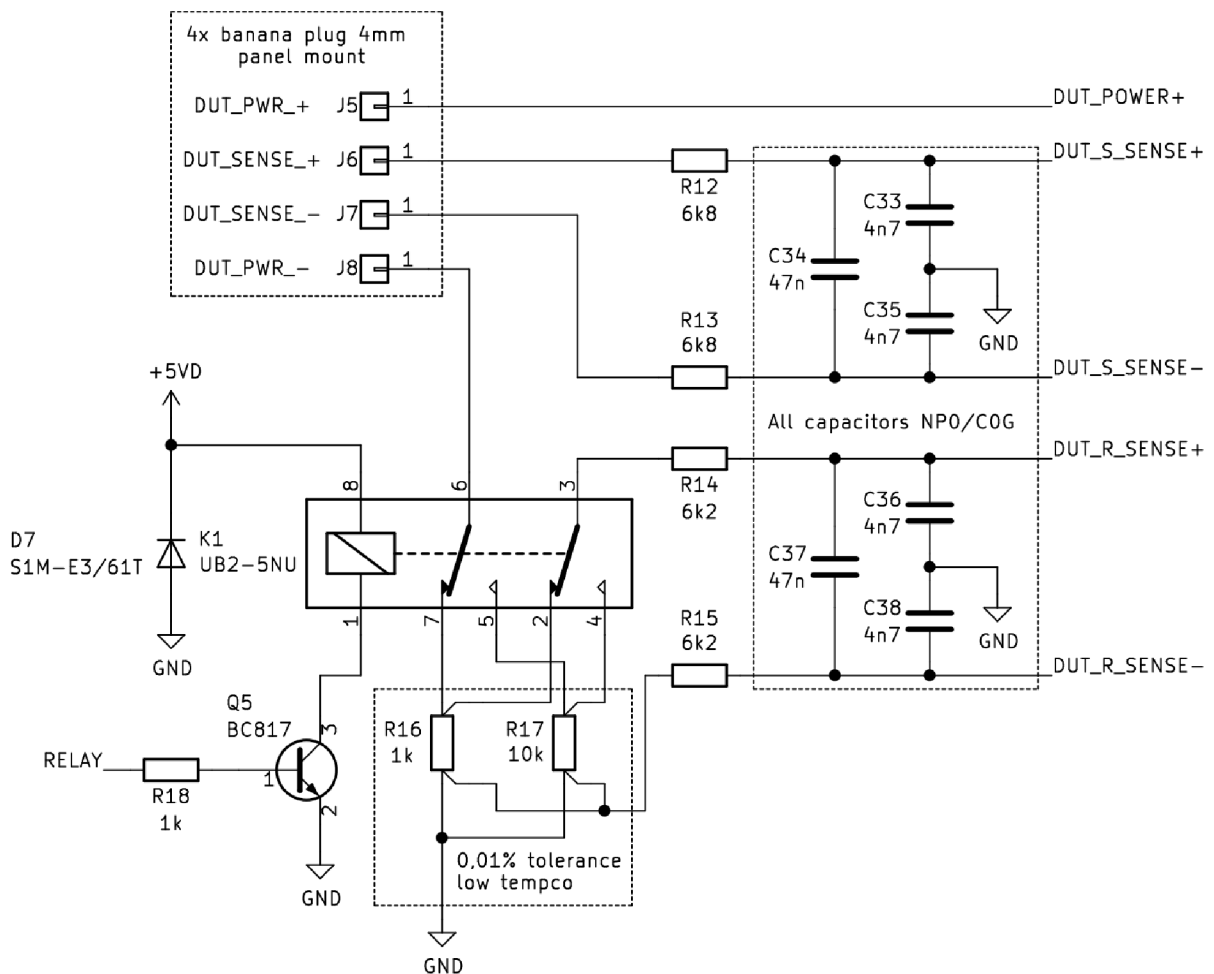
Obr. 2.8 Schéma zapojení vstupního obvodu pro měření referenčního čidla

Výše uvedené hodnoty odporů a mezních frekvencí byly vypočteny pro čidlo Pt100. Připojením čidla Pt1000 a přepnutím referenčního rezistoru se mezní frekvence ovlivní, jejich hodnota se pak vypočte dle vztahů [24]

$$f_{mV} = \frac{1}{2\pi C_d(R_{PRTAV} + 2R_V)} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (1150 + 2 \cdot 6650)} = 234 \text{ Hz} \quad (2.19)$$

$$f_{mR} = \frac{1}{2\pi C_d(R_{REF} + 2R_R)} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (10000 + 2 \cdot 6200)} = 152 \text{ Hz} \quad (2.20)$$

Mezní frekvence nejsou srovnatelné a šum zdroje proudu nebude zcela potlačen [24]. Schéma zapojení vstupního obvodu pro měření kalibrovaného čidla je na obrázku 2.9.



Obr. 2.9 Schéma zapojení vstupního obvodu pro měření kalibrovaného čidla

Zapojení vychází z předchozího zapojení na obrázku 2.8, ale je přidána možnost přepínat referenční rezistory. Pro přepínání bylo zvoleno relé typu DPDT (*Double Pole Double Throw*), které je zapojeno tak, aby byl potlačen odpor kontaktů a nedošlo k ovlivnění měření. Dioda D7 slouží jako ochrana proti pulzu napětí, který na cívce relé vznikne při rozpojení tranzistoru Q5.

### 2.2.3 A/D převodník

Pro měření odporu dvou různých PRT čidel je vhodné, aby A/D převodník obsahoval dva proudové zdroje, dva diferenciální vzorkovací vstupy, dva diferenciální vstupy pro připojení referenčního napětí a programovatelný zesilovač. Také je nutné, aby měl minimální šum a offset. Převodník musí mít dostatečný počet bitů, aby umožnil měření s rozlišením alespoň 0,01 °C. Změna odporu odpovídající požadovanému rozlišení se vypočte ze vztahu pro teplotní závislost

$$\Delta R_{MIN} = R_0 \alpha \Delta t = 100 \cdot 0,00385 \cdot 0,01 = 3,85 \text{ m}\Omega \quad (2.21)$$

Maximální měřitelná hodnota odporu  $R_{MAX}$  se vypočte dle vztahu

$$R_{MAX} = \frac{R_{REF}}{A_{uPGA}} = \frac{1000}{4} = 250 \text{ }\Omega \quad (2.22)$$

kde  $A_{uPGA}$  je zesílení programovatelného zesilovače PGA v A/D převodníku. Hodnota zesílení 4 byla zvolena tak, aby byl využit co největší rozsah převodníku při maximálním odporu čidla  $R_{PRTMAX}$ . Minimální počet bitů A/D převodníku  $n$  je pak následující

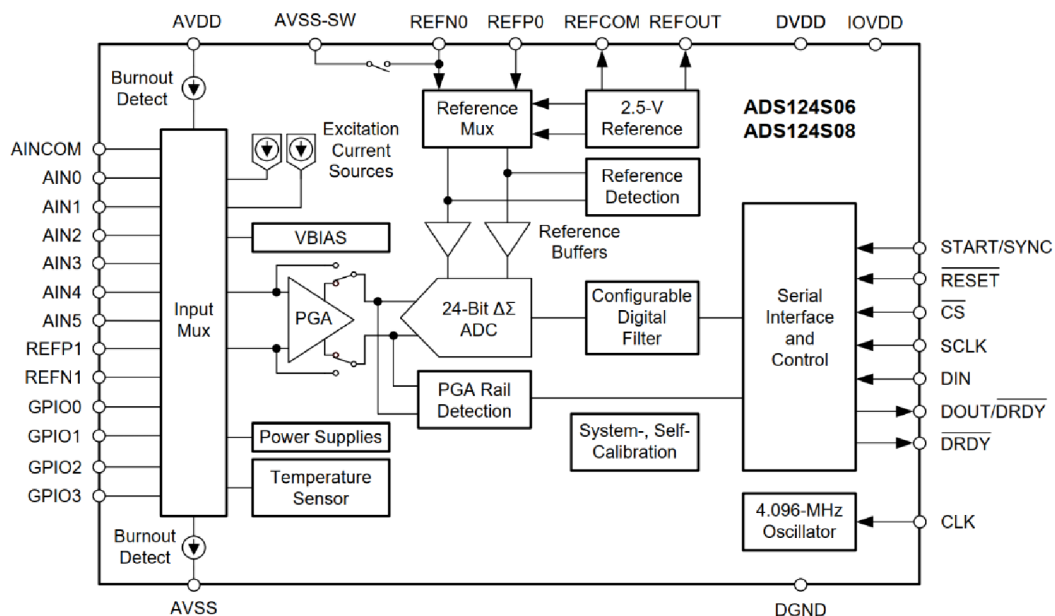
$$n = \frac{\log \frac{R_{MAX}}{\Delta R}}{\log 2} = \frac{\log \frac{250}{3,85 \cdot 10^{-3}}}{\log 2} = 15,9 \quad (2.23)$$

Teoreticky je dostačující 16bitový převodník, ale došlo by k omezení možnosti zvětšit rozlišení, proto byl zvolen 24bitový převodník.

Byl zvolen A/D převodník ADS124S06 společnosti Texas Instruments. Je to přesný 24bitový, delta-sigma A/D převodník, který disponuje mnoha periferiemi sloužící pro zjednodušení návrhu a snížení množství součástek [25]. Některé z periferií, které jsou v zařízení použity jsou

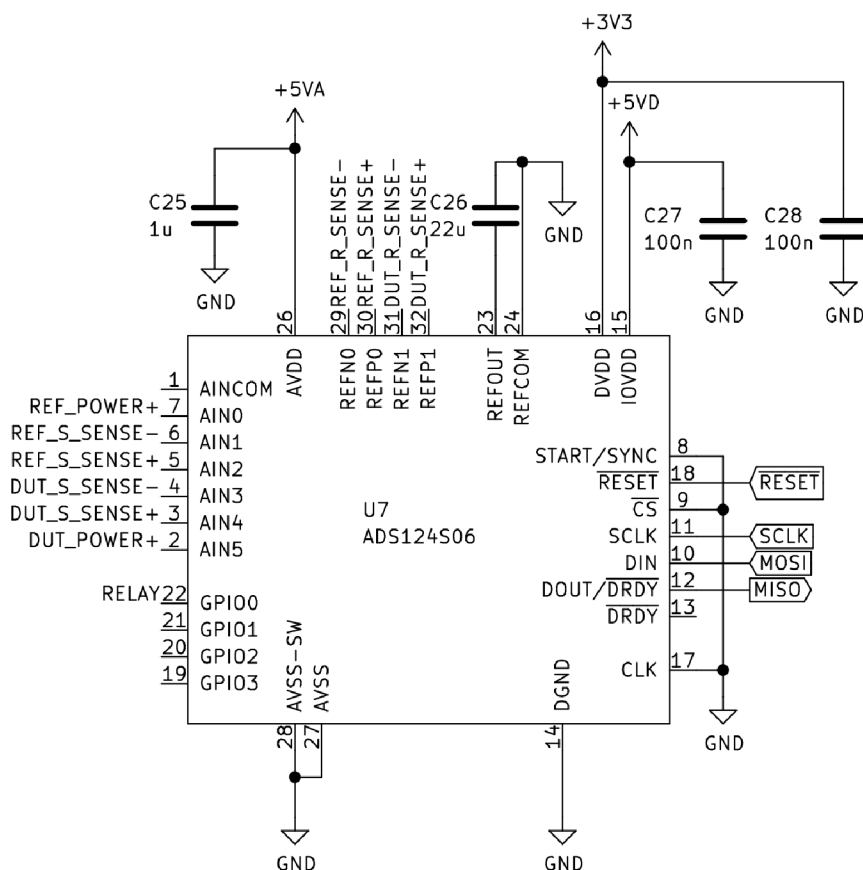
- digitální filtr pro omezení 50 Hz a 60 Hz šumu,
- zesilovač s programovatelným zesílením od 1 do 128,
- přesná 2,5 V napěťová reference,
- dva programovatelné zdroje proudu,
- GPIO (*General Purpose Input Output*) vývod.

Blokové schéma převodníku ADS124S06 je na obrázku 2.10.



Obr. 2.10 Blokové schéma A/D převodníku ADS124S06 (převzato z [25])

Schéma zapojení A/D převodníku je na obrázku 2.11.



Obr. 2.11 Schéma zapojení samotného A/D převodníku (převzato z [25])

Přístup k převodníku je sběrnicí SPI. Za účelem omezení šumu je napájení analogové části provedeno 5V lineárním regulátorem, který napájí pouze tuto část A/D převodníku. Digitální jádro A/D převodníku je napájeno 3,3V lineárním regulátorem. Vstupně výstupní IO (*Input Output*) periferie je napájena 5V lineárním regulátorem pro zajištění kompatibility logických úrovní s mikrokontrolérem, který je napájen 5 V.

Pro použití A/D převodníku je nutné zajistit, aby byly potřebné parametry v pracovním rozsahu. Jedná se především o

- minimální hodnotu referenčního napětí,
- vstupní napětí A/D převodníku,
- vstupní napětí programovatelného zesilovače.

Minimální hodnota referenčního napětí je dle katalogového listu 0,5 V. Úbytek napětí na referenčním rezistoru, je dle tabulky 2.1 právě 0,5 V pro čidlo Pt100 i Pt1000. První parametr je v pracovním rozsahu.

Pro ověření dalšího parametru je nejprve nutné vypočítat úbytek napětí na čidle  $U_{DIFF}$  následovně

$$U_{DIFF} = I_{PRT} R_{PRTMAX} = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 131 = 66 \text{ mV} \quad (2.24)$$

Napětí mezi zemí a jedním vývodem čidla je o velikosti  $U_{REF}$  tudíž 0,5 V. Napětí mezi zemí a druhým vývodem je o velikosti  $U_{REF} + U_{DIFF}$  tedy 0,566 V. Tato napětí budou stejná i pro čidlo Pt1000, protože proud  $I_{PRT}$  je 10x menší a odpor  $R_{PRTMAX}$  je 10x větší. Maximální diferenciální napětí, které je možné přivést na vstup A/D převodníku  $U_{DIFFMAX}$  se vypočte dle vztahu

$$U_{DIFFMAX} = \frac{U_{REF}}{A_{uPGA}} = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ V} \quad (2.25)$$

Jelikož úbytek na čidle je menší než napětí  $U_{DIFFMAX}$  je vstupní napětí v pracovním rozsahu A/D převodníku. Dále je třeba ověřit vstupní napětí vzhledem k zemi a napájecímu napětí. Minimální  $U_{INMIN}$  a maximální  $U_{INMAX}$  napětí pro signál mezi vstupem zesilovače a zemí se zjistí dle vztahů

$$U_{INMIN} = 0,15 + U_{DIFF} \cdot \frac{(A_{uPGA} - 1)}{2} = 0,15 + 0,066 \cdot \frac{4 - 1}{2} = 0,249 \text{ V} \quad (2.26)$$

$$U_{INMAX} = U_{CC} - 0,15 - U_{DIFF} \cdot \frac{(A_{uPGA} - 1)}{2} = 5 - 0,15 - 0,066 \cdot \frac{4 - 1}{2} = 4,751 \text{ V} \quad (2.27)$$

Vstupní napětí 0,5 V a 0,566 V jsou v rozsahu  $U_{INMIN}$  až  $U_{INMAX}$  a jsou tedy v pracovním rozsahu programovatelného zesilovače.

Jednotlivé parametry, které ovlivňují přesnost navrženého měřícího obvodu jsou chyby A/D převodníku a tolerance referenčního rezistoru. Chyba způsobená programovatelným zesilovačem je zanedbatelná a nebude uvažována [25]. Vstupní proud do vstupů A/D převodníku způsobí úbytek napětí na odporu a tím vytvoří offset, ale jeho velikost je zanedbatelná. Chyby A/D převodníku jsou především vstupní offset  $\Delta U_{OFFSET}$  (dle katalogového listu  $2 \mu\text{V}$ ), chyba zesílení  $\Delta U_{GE}$  a chyba linearity  $\Delta U_{INL}$ , které se vypočtou následovně

$$\Delta U_{GE} = U_{REF} GE = 0,5 \cdot 120 \cdot 10^{-6} = 60 \mu\text{V} \quad (2.28)$$

$$\Delta U_{INT} = U_{REF} INL = 0,5 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 7,5 \mu\text{V} \quad (2.29)$$

kde hodnoty  $GE$  (*Gain Error*) a  $INL$  (*Integral Nonlinearity*) jsou parametry A/D převodníku a jsou udávány v katalogovém listu [25]. Celková chyba A/D převodníku  $\Delta U_{TUE}$ , která kombinuje dílčí chyby se vypočte dle vztahu

$$\Delta U_{TUE} = \sqrt{U_{OFFSET}^2 + U_{GE}^2 + U_{INT}^2} = \sqrt{(2 \cdot 10^{-6})^2 + (60 \cdot 10^{-6})^2 + (7,5 \cdot 10^{-6})^2} \quad (2.30)$$

$$\Delta U_{TUE} = 60,5 \mu\text{V}$$

Větší část chyby je způsobena chybou zesílení  $\Delta U_{GE}$ . Tuto chybu je možné kalibrací zmenšit a tím značným způsobem zmenšit celkovou chybu  $\Delta U_{TUE}$ . Velikost chyby A/D převodníku při měření odporu se vypočte jako

$$\Delta R_{TUE} = \frac{\Delta U_{TUE}}{U_{REF}} \cdot \frac{R_{REF}}{A_{uPGA}} = \frac{60,5 \cdot 10^{-6}}{0,5} \cdot \frac{1000}{4} = 30,3 \text{ m}\Omega \quad (2.31)$$

Tolerance změřené hodnoty odporu je přímo úměrná toleranci použitého referenčního rezistoru, která je  $\pm 0,01 \%$ . Přesnost měření odporu  $\Delta R_{MO}$  je součtem chyby A/D převodníku a tolerance referenčního rezistoru tedy  $\Delta R_{MO} = \pm(0,0303 + 0,0001 R_{PRT}) \Omega$ . Tato přesnost je určena pro teplotu okolí  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Přesnost měřícího obvodu  $\Delta t_{MO}$  vyjádřená v vyjádřená ve  $^\circ\text{C}$  se odvodí následovně

$$\begin{aligned} \Delta t_{MO} &= \frac{\Delta R_{MAX}}{\alpha R_0} + \Delta t_{APR} = \frac{0,0303 + 0,0001 R_{PRT}}{\alpha R_0} + \Delta t_{APR} = \\ &= \frac{0,0303 + 0,0001(R_0 \cdot (1 + \alpha t))}{\alpha R_0} + \Delta t_{APR} = \\ &= \frac{0,0303}{\alpha R_0} + \frac{0,0001}{\alpha} + 0,0001 t + \Delta t_{APR} = \\ &= \frac{0,0303}{0,00385 \cdot 100} + \frac{0,0001}{0,00385} + 0,0001 t + 0,015 \\ \Delta t_{MO} &= \pm(0,12 + 0,0001 t) \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.32)$$

V chybě  $\Delta t_{MO}$  je taky započtena chyba způsobená použitou aproximací  $\Delta t_{APR}$  ( $\pm 0,015$  °C [9]). Pro výpočet celkové přesnosti měření teploty je nutné zohlednit chybu čidla  $\Delta t_{Pt}$ , která u zvoleného čidla NB-PTCO-058 činí  $\pm(0,1+0,0017t)$  °C [22]. Celková přesnost měření teploty  $\Delta t$  se je součtem dílčích chyb

$$\begin{aligned}\Delta t &= \Delta t_{AD} + \Delta t_{Pt} = (0,105 + 0,0001t) + (0,1 + 0,0017t) & (2.33) \\ \Delta t &= \pm(0,22 + 0,0018t) \text{ °C}\end{aligned}$$

Chyba  $\Delta t_{SH}$  způsobená samoohřevem je zanedbána. Velikost chyby při 0 °C bude  $\pm 0,22$  °C. V maximu teplotního rozsahu tj. 80 °C bude chyba  $\pm 0,36$  °C. Kalibrace tuto chybu z velké části eliminuje.

## 2.3 Digitální řízení

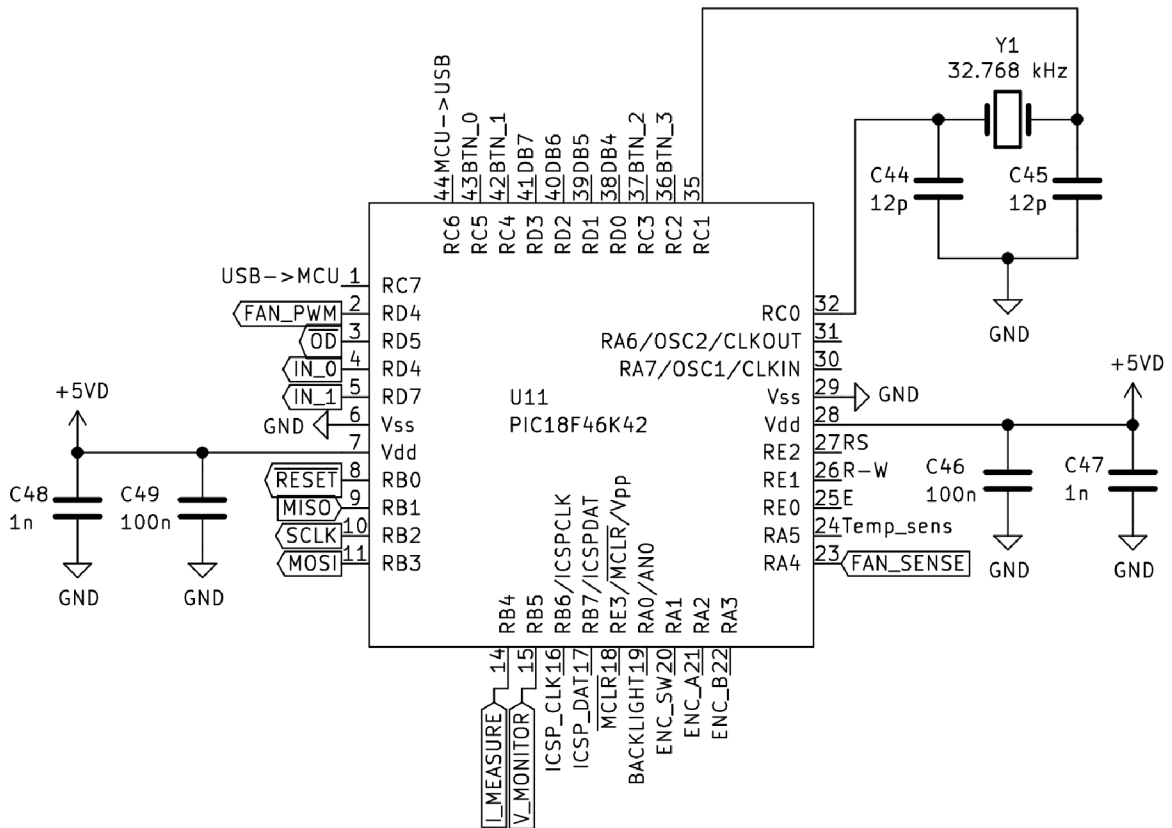
Ovládání zařízení je řešeno mikrokontrolérem. Ten zajišťuje regulaci teploty v komoře a komunikaci s uživatelem. Uživatel může komoru ovládat pomocí tlačítek, rotačního enkodéru a LCD displeje na zařízení. Dále je možné komoru řídit dálkově přes počítač pomocí sběrnice USB. Zařízení také obsahuje digitální teplotní čidlo pro měření teploty okolí.

### 2.3.1 Mikrokontrolér

Požadavky pro výběr mikrokontroléru byly následující:

- 33 GPIO vývodů,
- 3 PWM periferie,
- 64 KB flash paměti,
- 512 B EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) paměti,
- frekvence hodinového signálu 64 MHz,
- možnost připojení sekundárního oscilátoru s frekvencí 32,768 kHz,
- 1 řadič sběrnice SPI,
- 1 řadič sběrnice UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).

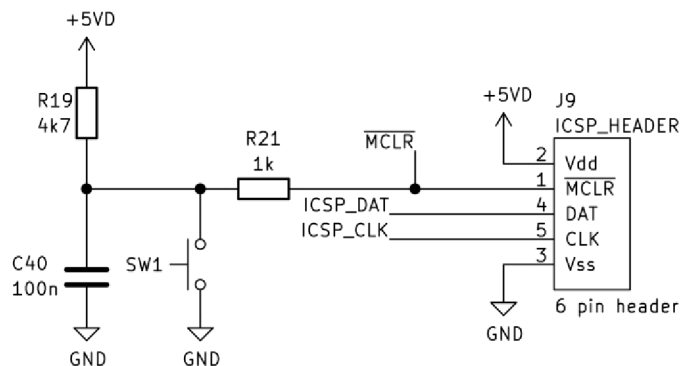
Byl vybrán mikrokontrolér PIC18F46K42 společnosti Microchip [26]. Schéma zapojení mikrokontroléru je na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Schéma zapojení mikrokontroléru

Pro vytvoření přesného hodinového signálu s frekvencí 1 Hz, který umožní vytvoření teplotních profilů závislých na čase, byl k mikrokontroléru připojen 32,768 kHz oscilátor Y1 a kondenzátory C44 a C45.

Programování je zajištěno ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) rozhraním. Pro připojení programátoru do obvodu se používá buď šesti pólová kolíková lišta, nebo konektor RJ12 v konfiguraci 6P6C. Jelikož zařízení není určeno pro programování uživatelem, byla zvolena kolíková lišta. Schéma zapojení ICSP rozhraní a resetovacího tlačítka je na obrázku 2.13.



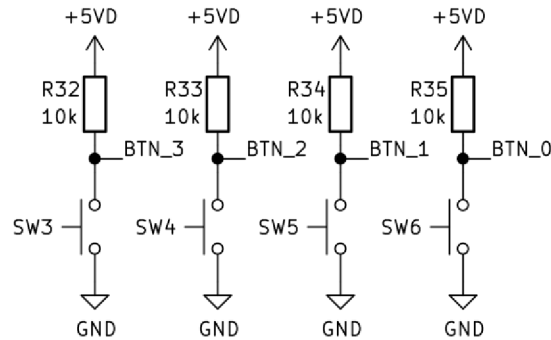
Obr. 2.13 Schéma zapojení ICSP rozhraní a resetovacího tlačítka



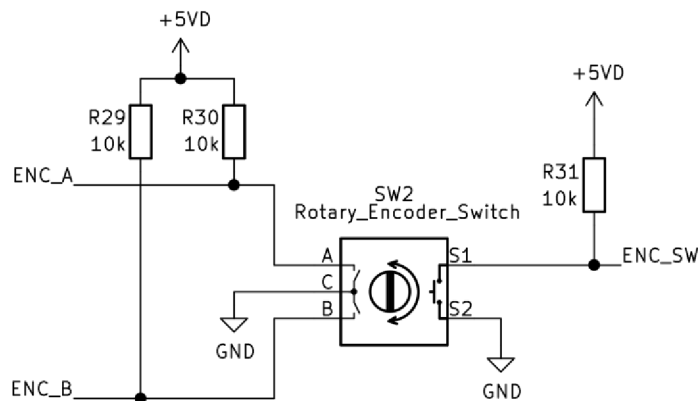
Zapojení a hodnoty součástek byly zvoleny dle doporučení [27].

### 2.3.2 Uživatelské rozhraní

Pro ovládání zařízení byla navržena čtyři tlačítka a jeden rotační enkodér. Schéma zapojení tlačítek a rotačního enkodéru je na obrázcích 2.14 respektive 2.15.



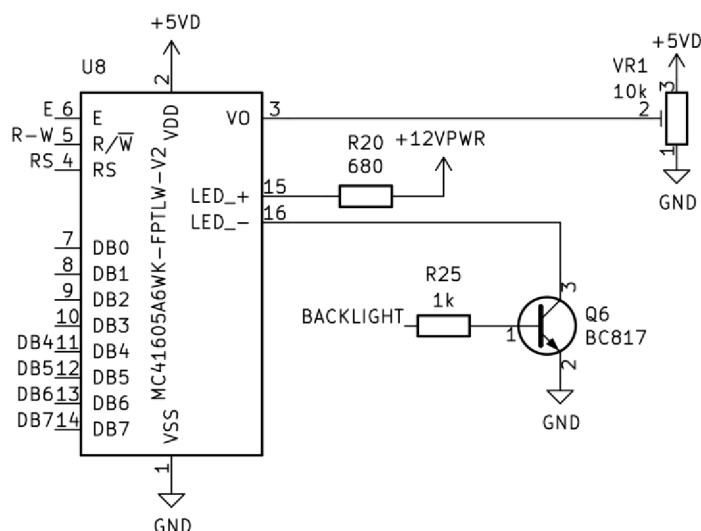
Obr. 2.14 Schéma zapojení tlačítek



Obr. 2.15 Schéma zapojení rotačního enkodéru

Tlačítka, výstup enkodéru ENC\_A a spínač enkodéru jsou připojeny na vstup mikrokontroléru, který lze obsluhovat přerušovací rutinou. Ošetření zákmitů tlačítek a rotačního enkodéru je řešeno softwarově.

Jako rozhraní pro zobrazení provozních údajů uživateli byl zvolen alfanumerický LCD displej MC41605A6WK-FPTLW-V2 [28]. Tento displej má rozlišení zobrazovací plochy 16x4 znaků, což umožňuje zobrazení dostatečného množství informací a usnadňuje obsluhu. Displej používá standartní rozhraní kompatibilní s klasickým řadičem HD44780. Schéma zapojení displeje je na obrázku 2.16.



Obr. 2.16 Schéma zapojení LCD displeje

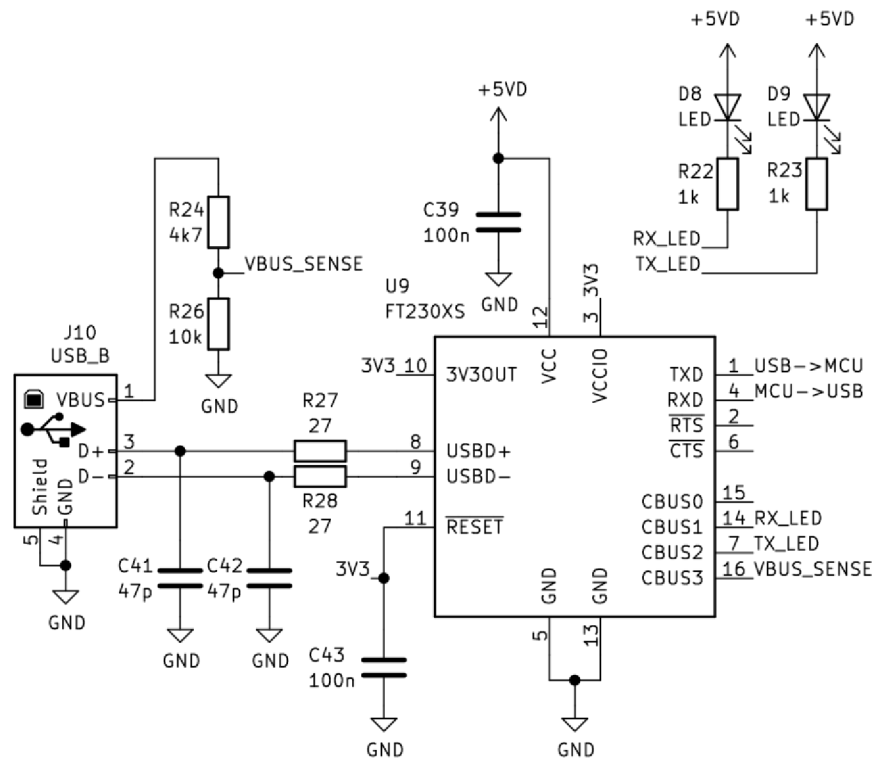
Pro nastavení kontrastu displeje je použit trimr VR1. Pro snížení nároků na 5V regulátory bylo napájení podsvícení zvoleno z 12 V napájecí větve. Bylo tedy nutné navrhnout předřadný rezistor dostatečné velikosti, který omezí proud  $I_{LED}$  LED (*Light Emitting Diode*) diodou. Hodnota předřadného odporu R20 byla vypočtena dle vztahu

$$R_{20} = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12 - 3}{0,015} = 600 \Omega \quad (2.34)$$

kde  $U_{CC}$  je napájecí napětí LED diody a  $U_{LED}$  je úbytek napětí diody. Byla zvolena hodnota 680  $\Omega$ . Jelikož je displej transreflektivní není použití podsvícení vždy nutné, byl proto přidán tranzistor Q6, který jej umožní spínat.

### 2.3.3 Převodník USB/UART

Obsluhu USB sběrnice lze vyřešit několika způsoby ať už implementací USB protokolu do hlavního mikrokontroléru, použitím druhého mikrokontroléru nebo pomocí dedikovaného převodníku. První dvě varianty jsou velice flexibilní, ale náročné na implementaci a prostředky mikrokontroléru. Byl zvolen třetí způsob, a to použití dedikovaného převodníku. Byl vybrán integrovaný obvod FT230X společnosti FTDI, který má v sobě implementovaný celý interface pro přístup k USB 2.0 sběrnici [29]. Schéma zapojení převodníku je na obrázku 2.17.

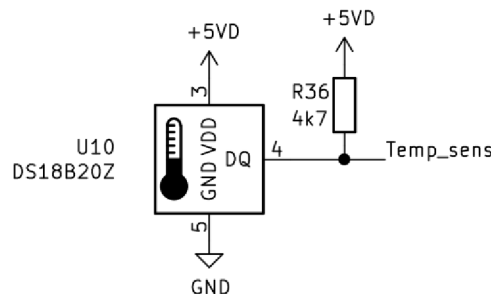


Obr. 2.17 Schéma zapojení převodníku USB/UART (převzato z [29])

Komunikace mezi převodníkem a mikrokontrolérem probíhá po sběrnici UART. Dioda D8 slouží pro indikaci přenosu dat do USB sběrnice. Dioda D9 slouží pro indikaci přenosu dat z USB sběrnice. Převodník je napájen zdrojem ze zařízení, takže nebude zatěžovat USB sběrnici.

### 2.3.4 Čidlo okolní teploty

Jelikož minimální a maximální dosažitelná teplota komory je závislá na okolní teplotě, je vhodné ji snímat. Pro snímání bylo vybráno digitální čidlo DS18B20 společnosti Maxim Integrated [30]. Schéma zapojení čidla okolní teploty je na obrázku 2.18.



Obr. 2.18 Schéma zapojení čidla okolní teploty

Připojení čidla je pomocí 1-Wire sběrnice. Pro správnou funkci této sběrnice je nutno dodat pull-up rezistor, dle doporučení výrobce byla zvolena hodnota 4,7 k $\Omega$ . Čidlo je umístěno na okraji DPS. Tato poloha byla zvolena tak, aby byla vzdálená od obvodu Peltierova článku, který bude vytvářet teplo, které by značně ovlivnilo měření.

## 2.4 Napájecí zdroje

Zařízení je napájeno 12V stejnosměrným zdrojem. Pro výběr jeho proudové zatížitelnosti byla vytvořena tabulka předpokládané spotřeby všech zařízení připojených k napájecím větvím v obvodu.

Tab. 2.2 Předpokládaná spotřeba zařízení

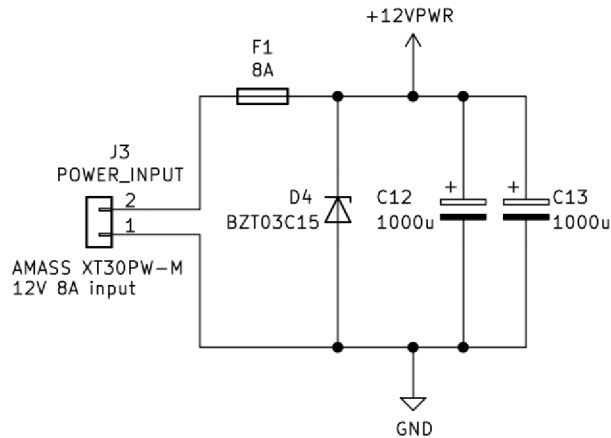
Napětí větve	5 V	Napětí větve	3,3 V
Označení ve schématu	+5VA	Označení ve schématu	+3V3
Zařízení	Spotřeba [mA]	Zařízení	Spotřeba [mA]
A/D převodník analogová část	1,5	A/D převodník digitální část	0,5
Celkem	1,5	Celkem	0,5

Napětí větve	5 V	Napětí větve	12 V
Označení ve schématu	+5VD	Označení ve schématu	+12VPWR
Zařízení	Spotřeba [mA]	Zařízení	Spotřeba [mA]
Mikrokontrolér	12	Peltierův článek	7000
LCD displej	1,5	Budiče polomostu	5
Převodník USB/UART	8	Snímač proudu	1
Teplotní čidlo	1,5	Snímač napětí	0,3
A/D převodník IO periferie	0,3	Ventilátor	250
Relé	20	Podsvícení LCD	15
Tlačítka	2		
Rotační enkodér	1		
LED diody	5		
Celkem	51,3	Celkem	7271,3

Celková spotřeba při napájecím napětí 12 V	7324 mA
--	---------

Celková maximální spotřeba zařízení je 7,3 A. Pro zachování výkonové rezervy byl zvolen zdroj s proudovou zatížitelností alespoň 8 A. Připojení zdroje je pomocí konektoru XT30 s jmenovitým proudem 15 A. Pro ochranu zařízení byla zvolena pojistka a zenerova dioda. Díky tomu je zařízení chráněno proti zkratu, přepětí a přepólování napájecího napětí. Pro vyvolání stavu přepětí a přepálení pojistky musí být napájecí napětí alespoň 15 V. Pojistka je trubičková

5x20 mm dimenzovaná na 8 A. Schéma zapojení napájecího vstupního obvodu je na obrázku 2.19.



Obr. 2.19 Schéma zapojení napájecího vstupního obvodu

Pro snížení napětí 12 V na 5 V a 3,3 V byly zvoleny lineární regulátory LD1117S50TR pro 5V větve a LD1117S33TR pro 3,3V větev [31]. Celkem jsou použity dva 5V a jeden 3,3V regulátor. Jeden 5V regulátor napájí analogovou část A/D převodníku. Druhý napájí jeho IO periferii, relé a celé digitální řízení. 3,3V regulátor napájí digitální jádro A/D převodníku.

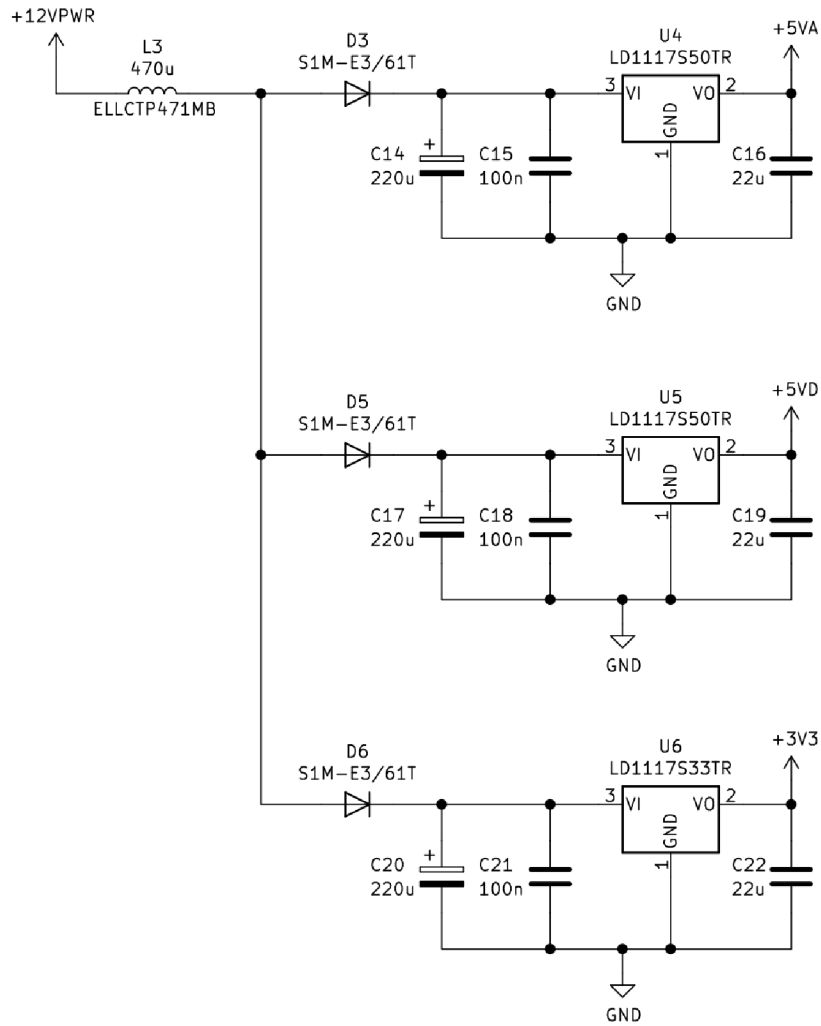
Pro použití regulátorů je nutné ověřit, zda dojde k jejich přehřátí vlivem odebíraného proudu. Největší výkonová ztráta je na regulátoru generující napětí pro napájení digitálního řízení, relé a IO periferii A/D převodníku. Tento regulátor dodává při maximální zátěži proud  $I_{+5VD}$ , jehož hodnota je dle tabulky 2.2 rovna 51,3 mA. Výkonová ztráta regulátoru  $P_{REG}$  se vypočte následovně

$$P_{REG} = I_{+5VD}(U_{+12VPWR} - U_{+5VD}) = 51,3 \cdot 10^{-3} \cdot (12 - 5) = 0,35 \text{ W} \quad (2.35)$$

Tato ztráta způsobí zvýšení teploty přechodu na teplotu

$$T_j = T_A + R_{thJA}P_{REG} = 50 + 110 \cdot 0,35 = 88,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.36)$$

Teplota přechodu regulátoru by měla dosáhnout maximálně 88,5 °C, což je pod maximální přípustnou teplotou 125 °C a regulátor je možné použít. Schéma zapojení regulátorů je na obrázku 2.20.



Obr. 2.20 Schéma zapojení regulátorů

Diody zabraňují vybíjení blokovacích kondenzátorů příslušného regulátoru do ostatních částí obvodu. Kondenzátory spolu s cívkou tvoří LC filtr typu dolní propust, které slouží k potlačení vlivu poklesů napětí 12 V větve vlivem spínání H-mostu. Hodnota součástek byla určena tak aby mezní frekvence byla ve stovkách Hz dle vztahu

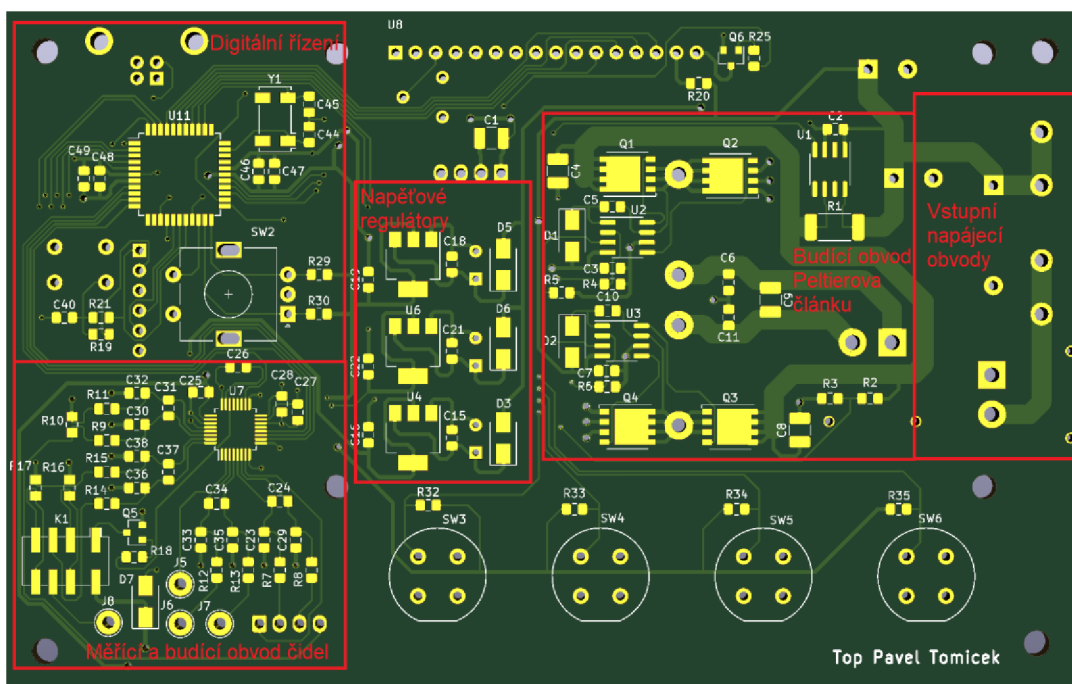
$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{470 \cdot 10^{-6} \cdot 220 \cdot 10^{-6}}} = 494 \text{ Hz} \quad (2.37)$$

## 3 Konstrukce zařízení

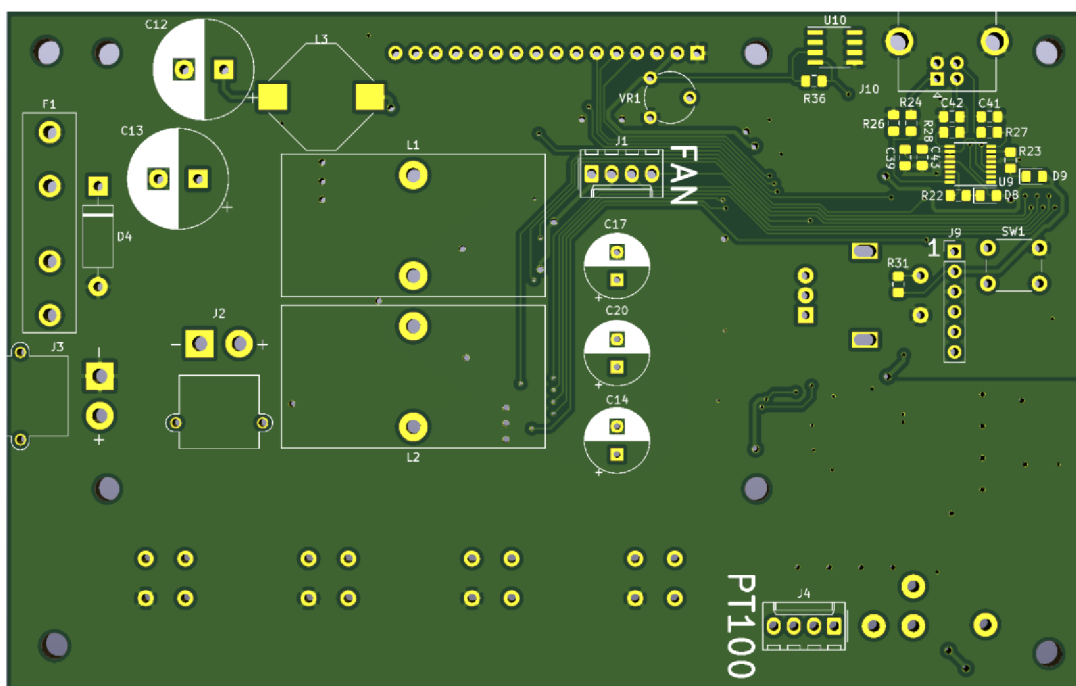
Zařízení je tvořeno komorou, ke které je připojen Peltierův článek a chladič s ventilátorem. Komora je obalena izolací pro zvýšení tepelného odporu mezi ní a okolím. Na vrchní části zařízení je umístěna řídicí jednotka opatřena mikrokontrolérem, uživatelským rozhraním, měřicími obvody, napájecími zdroji, budícím obvodem Pelierova článku a dalšími částmi obvodu. V této kapitole je popsán návrh DPS, konstrukce zařízení z mechanické stránky a programové vybavení mikrokontroléru.

### 3.1 Návrh DPS

Byla zvolena jednodesková konstrukce. DPS byla navržena v programu KiCad. Při návrhu bylo nutné dbát na oddělení jednotlivých částí zařízení, aby došlo k minimalizaci rušení měřicí části. Dále bylo nutné minimalizovat proudové smyčky výkonové části z důvodu omezení rušení. Jako poslední bylo nutné zajistit dostatečnou proudovou zátěžitelnost cest ve výkonové části. 3D vizualizace desky ze strany top a bottom je na obrázcích 3.1 a 3.2.



Obr. 3.1 Pohled na 3D vizualizaci DPS ze strany top se zvýrazněnými částmi obvodu



Obr. 3.2 Pohled na 3D vizualizaci DPS ze strany bottom

Konektory, které jsou při běžném provozu přístupné (USB, napájení) byly umístěny na okraj desky. Ostatní konektory jsou umístěny na zadní straně DPS a nejsou uživateli přístupné. Připojení čidla pro kalibraci bylo zvoleno pomocí zásuvek na banánky umístěných na krabici. Připojení zásuvek je pomocí vodičů, které jsou zapájeny do desky. Velikost většiny pasivních součástek je 0805.

## 3.2 Mechanická konstrukce

Mechanická konstrukce musí být schopna bezpečného provozu v požadovaném tepelném rozsahu a odvedení velkého množství tepla z Peltierova článku. Z toho důvodu byla zvolena konstrukce tvořená vnitřní a vnější krabicí s izolací v prostoru mezi nimi.

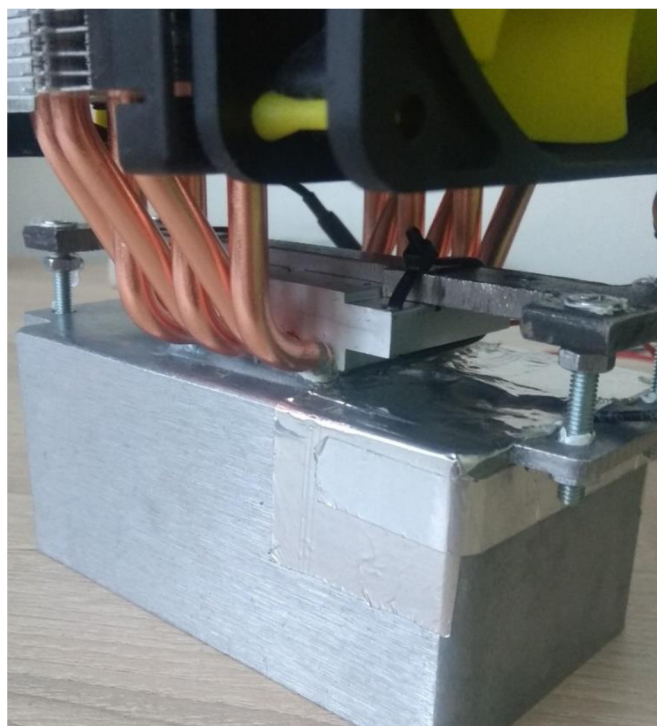
Řídicí část je umístěna v plastové krabici, která byla vyrobena na 3D tiskárně. Krabice je vyrobena z plastu PLA (*Polyactic Acid*) černé barvy. Materiál byl zvolen pro svůj snadný tisk, jelikož se jen minimálně smršťuje, což je vhodné pro vytvoření dlouhých rovných stěn krabice. V krabici jsou po stranách vytvořeny větrací otvory pro chlazení komponent na DPS. Na obrázku 3.3 je detail řídicí části.





Obr. 3.3 Detail řídicí části

Vnitřní krabice tvoří prostor, ve kterém je regulována teplota. Byla zvolena hliníková krabice Gainta BS 15MF z důvodu tlustého dna, úchytů po stranách a cenové dostupnosti. Krabice má dno tlusté 4 mm, které bude mechanicky odolné a nebude hrozit jeho poškození při upnutí Peltierova článku. Úchyty jsou podstatné pro snadnou montáž Peltierova článku a chladiče, které jsou přitlačeny ke krabici pomocí ocelového dílu ve tvaru písmene H. Pro minimalizaci přenosu tepla mezi krabicí a šrouby je na nich namotána teflonová páska, která omezuje jejich dotyk s krabicí. Způsob uchycení je zřejmý z obrázku 3.4.

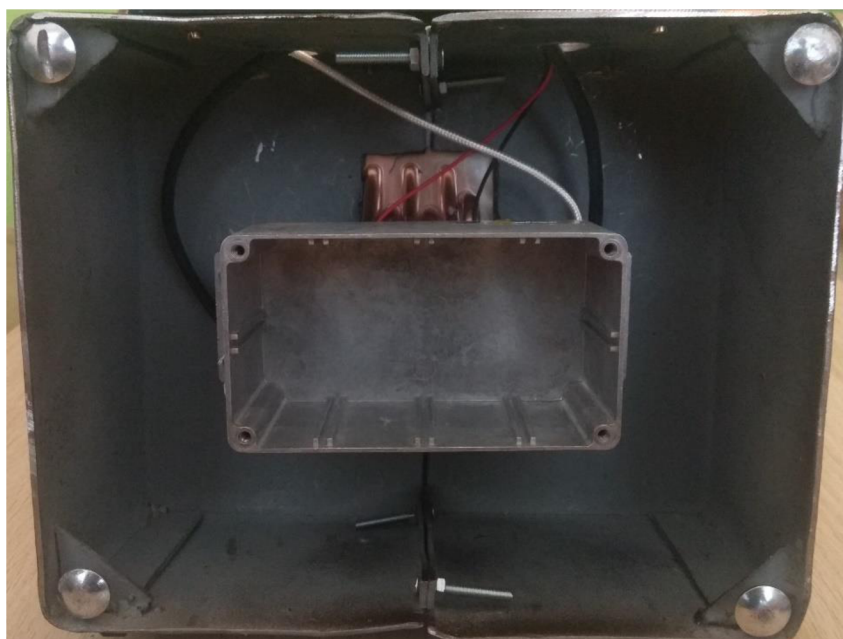


Obr. 3.4 Detail uchycení Peltierova článku, chladiče a referenčního čidla ke krabice

Obrázek 3.4 ukazuje také připevnění referenčního čidla, které je umístěno pod hliníkovou páskou v blízkosti Peltierova článku. Aby bylo zabráněno zkratu čidla s páskou je nejprve čidlo překryto kaptonovou páskou, která byla zvolena pro její tepelnou odolnost. Hliníková páska byla zvolena pro její schopnost dobře lepit při vysoké i nízké teplotě a také odolávat cyklování teploty.

Peltierův článek produkuje při maximálním výkonu přibližně 130 W odpadního tepla, které je nutno odvést a zároveň je požadováno udržet teplotu teplé strany co nejmenší. Nabízí se použití chladiče používaného pro chlazení procesorů v počítači. Většina chladičů nabízených na trhu, ale má malou chlazenou plochu, jelikož procesory mají zdroj tepla soustředěný do středu své plochy a není tedy důležité je chladit rovnoměrně po celé ploše. Toto není případ Peltierova článku, který vytváří teplo po celé ploše. Pokud by jeho kraje nebyly v kontaktu s chladičem došlo by ke snížení účinnosti [11]. Z tohoto důvodů byl zvolen chladič Akasa Venom Voodoo, jehož chlazená plocha pokrývá celý Peltierův článek.

Vnější krabice se skládá ze tří plechových dílů. Dva díly tvoří hlavní část obklopující vnitřní krabici z pěti stran. Obrázek 3.4 ukazuje tyto dva díly a vnitřní krabici.



Obr. 3.5 Dva plechové díly a vnitřní krabice

Všechny kabely nutné pro provoz komory jsou vedeny v prostoru mezi vnitřní krabicí a plechovými díly. Třetí plechový díl je víko, které slouží k přístupu do vnitřní krabice. Víko je ke zbytku komory přichyceno pomocí čtyř magnetů. Detail magnetického spoje je na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Detail magnetického spoje složeného z vratového šroubu (nalevo) a magnetického úchytu s vnějším závitem

Spoje se skládají ze dvou částí. První část je vratový šroub a druhá je magnetický úchyt s vnějším závitem. Obě části spoje jsou zašroubovány do závitu, který byl vyřezán v kusu plechu trojúhelníkového tvaru, který je přivařen k plechovým dílům. Na obrázku 3.7 jsou zobrazeny úchyty umístěné ve víku komory.



Obr. 3.7 Víko komory z vnitřní strany

Na obrázku 3.7 lze vidět izolaci, která je ve víku a také mezi vnitřní a vnější krabicí. Jako izolace byla vybrána minerální vata, pro její malou tepelnou vodivost a dobrou tepelnou odolnost. Tloušťka izolace je přibližně 5 cm v nejširší části a 3 cm v nejtenčí části. Otevřená komora s viditelnou izolací je na obrázku 3.8. Uzavřená komora je na obrázku 3.9.





Obr. 3.8 Otevřená komora s izolací



Obr. 3.9 Uzavřená komora

Pro přístup do vnitřní krabice při zavřené komoře je ve víku vyřezán obdelníkový otvor. Na obrázku 3.9 jej lze vidět na vrchní straně komory uprostřed víka. Prostor, kde je regulována teplota má rozměry 10x5x5,5 cm. Vnější rozměry komory jsou 25x35x27 cm. Díky své malé velikosti zabírá velice málo místa a lze jí snadno přenášet.

### 3.3 Programové vybavení

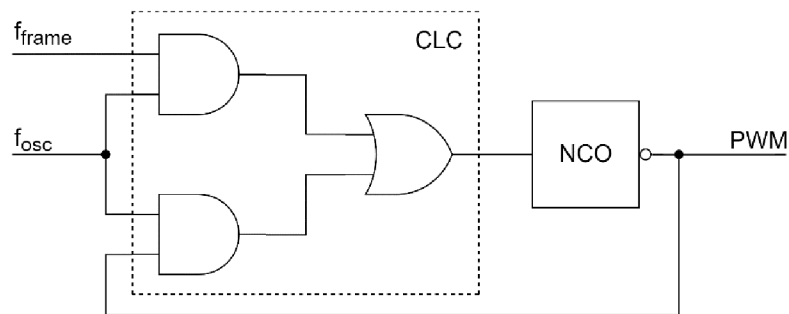
Program pro mikrokontrolér byl psaný v jazyce C v prostředí MPLAB X v5.25. Pro kompilaci byl použit kompilátor XC-8 v2.10. Program je koncipován do tří úrovní. První úroveň slouží k přímému přístupu k hardwaru a obsluhuje jednotlivé periferie. Druhá úroveň poskytuje vyšší úroveň abstrakce a umožňuje jednoduché nastavení primitivních parametrů jako je např. střída PWM. Třetí úroveň slouží pro komunikaci s uživatelem a řízení zařízení. Program byl na mikrokontrolér nahrán pomocí programátoru PICkit 4.

#### 3.3.1 Řízení výkonu Peltierova článku

Výkon Peltierovým článkem je řízen dvěma komplementárními PWM signály IN\_0 a IN\_1. Jelikož jsou signály komplementární je generován jeden signál PWM, který je přiveden na periferii CWG (*Complementary Waveform Generator*), jenž vytvoří žádané komplementární signály.

PWM lze generovat několika způsoby. Mikrokontrolér má integrovanou PWM periferii na čipu, která je schopna vytvářet 10bitový PWM signál s frekvencí 62,5 kHz při hodinovém signálu 64 MHz. Toto řešení se při testování ukázalo jako nevyhovující, jelikož rozlišení PWM nebylo dostatečné a stabilita regulované teploty nevyhovovala požadavkům. Další možností je generovat PWM pomocí časovače, což je výpočetně náročné a nedojde ke zvýšení přesnosti bez použití PWM ditheringu.

Bylo tedy implementováno řešení, které je schopno generovat PWM se střední hodnotou, která má větší rozlišení, než je možné dosáhnout pomocí již zmíněných metod [28]. Značná výhoda je, že toto řešení není výpočetně náročné, jelikož běží na nezávislých periferiích. Nevýhoda spočívá v tom, že metoda používá dithering a rozlišení je tedy zajištěno pouze po vyhlazení filtrem typu dolní propust. Další nevýhodou je vznik subharmonických frekvencí v PWM signálu a jitteru. Metoda spočívá v generaci PWM pomocí periferií NCO (*Numerically Controlled Oscillator*) a CLC (*Configurable Logic Cell*). Ty tvoří klopný obvod, který má přesně definovanou průměrnou šířku pulzu, která je menší než perioda hodinového pulzu [28]. Zapojení generátoru PWM je na obrázku 3.10.



Obr. 3.10 Zapojení generátoru PWM

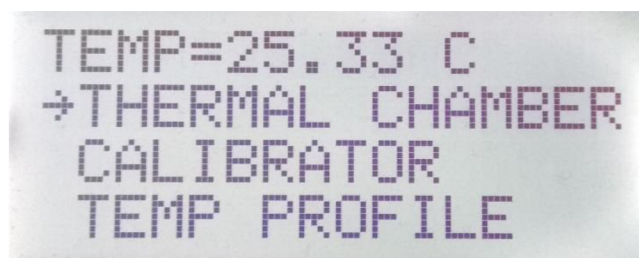
Signál  $f_{osc}$  má vyšší frekvenci a určuje rozlišení PWM. Druhý signál  $f_{frame}$  určuje frekvenci PWM. Podíl těchto dvou signálů určuje z kolika period  $f_{osc}$  se bude vytvářet jedna perioda výsledného PWM s požadovanou průměrnou střídu.

### 3.3.2 Řízení teploty PID regulátorem

Implementovaný PID regulátor udržuje požadovanou teplotu v komoře pomocí změny střídy PWM signálů, které řídí tranzistory H-mostu. Zpětnou vazbu zajišťuje A/D převodník měřící odpor referenčního Pt100 čidla. Regulovaná veličina není teplota, ale odpor. Díky tomu není nutno pokaždé přepočítávat odpor na teplotu, ale pouze jednou při nastavení požadované teploty. Vzorkovací frekvence PID regulátoru je synchronizovaná se vzorkovací frekvencí A/D převodníku, která je nastaveno na 20 Hz.

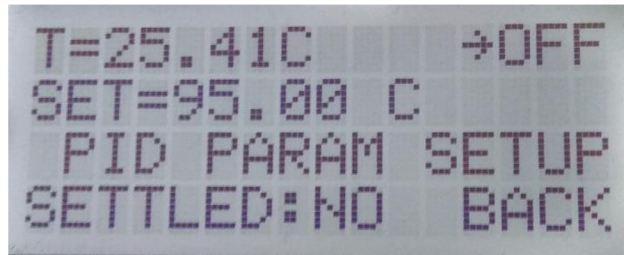
### 3.3.3 Menu

Pro snadnou obsluhu obsahuje zařízení jednoduché menu, ve kterém se uživatel pohybuje pomocí dvou tlačítek. Menu je rozděleno do tří částí, které odpovídají módům, které zařízení nabízí. Hlavní obrazovka menu je na obrázku 3.11.



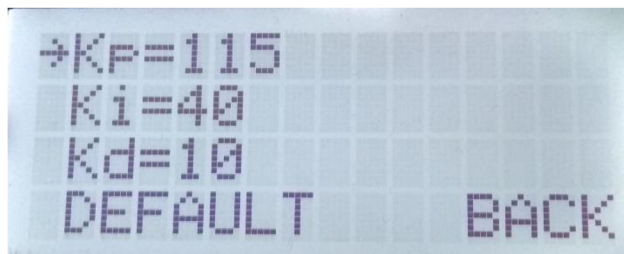
Obr. 3.11 Hlavní obrazovka

V prvním módu se zařízení chová jako obyčejná tepelná komora, kdy si uživatel nastaví požadovanou teplotu a komora se ji pokusí udržet. Na obrázku 3.12 je obrazovka v módu teplotní komora.



Obr. 3.12 Obrazovka v módu teplotní komora

Nastavení teploty se provádí pomocí rotačního enkodéru nebo tlačítek. Dále lze zapnout nebo vypnout regulaci teploty. Na obrazovce se také indikuje zda došlo k ustálení teploty. Pro ustálení je nutné, aby suma odchylek teploty v absolutní hodnotě po dobu tří minut nepřekročil 0,05 °C. Také je umožněno přejít do nabídky nastavení parametrů PID regulátoru, která je na obrázku 3.13.



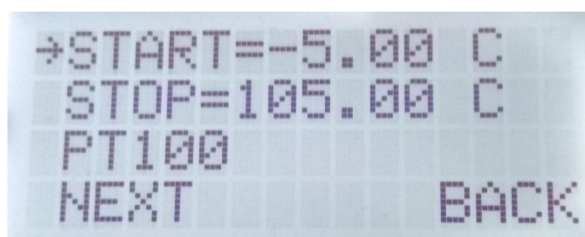
Obr. 3.13 Obrazovka pro nastavení parametrů PID regulátoru

Zde se nastavují parametry  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  PID regulátoru, který řídí teplotní komoru. Je implementována možnost uvést parametry do výchozího stavu tedy  $K_p = 115$ ,  $K_i = 40$  a  $K_d = 10$ .

Ve druhém módu zařízení funguje jako kalibrátor teplotních čidel Pt100 a Pt1000. Celkem se kalibruje při čtyřech teplotách a to

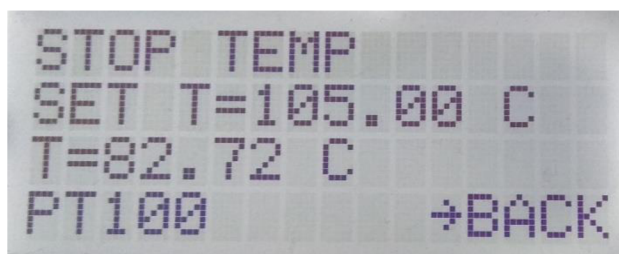
- zvolená počáteční teplota,
- zvolená koncová teplota,
- 0 °C,
- teplota v polovině intervalu mezi počáteční a koncovou.

Při těchto teplotách se změří odpor čidla podstupujícího kalibraci. Uživatel nastaví typ čidla a požadovanou počáteční a koncovou teplotu kalibrace. Obrazovka s touto nabídkou je na obrázku 3.14.



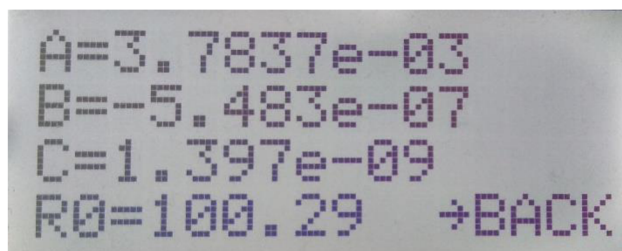
Obr. 3.14 Obrazovka pro nastavení parametrů kalibrace

Po zvolení požadovaných parametrů uživatel spustí kalibraci. Řídící jednotka následně automaticky nastaví teplotu na nejnižší a počká, dokud nedojde k ustálení teploty a změří odpor čidla podstupujícího kalibraci. Poté se tento postup se zopakuje pro zbývající tři teploty. V průběhu kalibrace se na displeji zobrazuje nastavená teplota (zda se jedná o počáteční, koncovou apod.), její hodnota, skutečná teplota a zvolené čidlo viz. obázek 3.15.



Obr. 3.15 Obrazovka v průběhu kalibrace

Po skončení kalibrace se zobrazí obrazovka s vypočtenými konstantami čidla viz. obrázek 3.16.

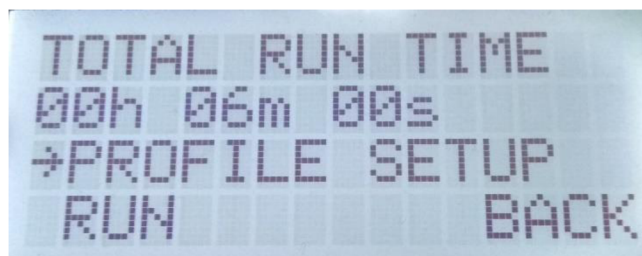


Obr. 3.16 Obrazovka s výsledky kalibrace

Na této obrazovce je vypsán odpor čidla při 0 °C  $R_0$  a vypočtené parametry čidla  $A$ ,  $B$  a  $C$  pro použití v Callendar-van Dusenově aproximaci.

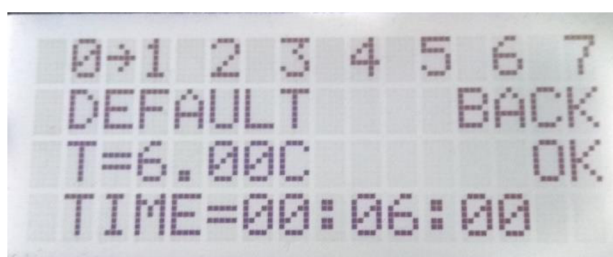
Ve třetím módu zařízení umožňuje nastavení teplotního profilu pomocí až osmi teplot. Doba trvání každé teploty může být v rozmezí 0 sekund až 24 hodin. Pokud je nastaven časový interval příliš krátký nemusí dojít k ustálení teploty. Hlavní obrazovka v módu teplotní profil je na obrázku 3.17.





Obr. 3.17 Obrazovka módu teplotní profil

Na této obrazovce je zobrazena celková doba trvání teplotního profilu. Dále je možnost spustit profil a vstoupit do nabídky nastavení tepotního profilu. Obrazovka pro nastavení profilu je na obrázku 3.18.



Obr. 3.18 Obrazovka pro nastavení teplotního profilu

Uživatel nejprve zvolí, kterou teplotu s indexem 0 až 7 chce měnit. Následně může změnit nastavenou teplotu a dobu jejího trvání. Pro přeskočení teploty se nastaví doba trvání dané teploty na nulu.

### 3.3.4 Komunikace s PC

Komunikace probíhá přes sběrnici USB pomocí řadiče USB/UART. V počítači se komora připojuje přes virtuální sériovou linku (virtuální COM port). Ke komunikaci lze využít libovolný program, který se umí komunikovat po sériové lince např. Hercules nebo Docklight. V programu je pak nutné zadat použité parametry sběrnice UART, které jsou:

- rychlost přenosu 115 200 Baudů,
- sudá parita,
- 8 datových bitů,
- jeden stop bit.

Je použit vlastní komunikační protokol, který slouží pro přenos zprávy z počítače do zařízení a naopak. Formát zprávy je v tabulce 3.1.

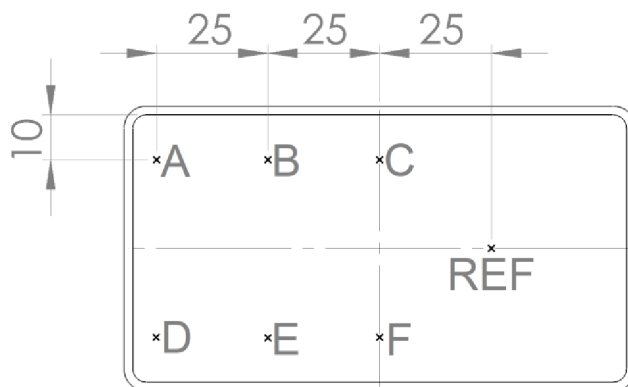
Tab. 3.1 Formát zprávy pro komunikaci s PC

Název části zprávy	Velikost [B]	Význam
START_BYTE	1	Vždy hodnota 0x02
DATA_LENGTH	1	Počet bajtů části DATA
INSTRUCTION	1	Požadovaná instrukce
DATA	0 až 16	Tělo zprávy obsahující samotná data
STOP_BYTE	1	Vždy hodnota 0x03

Například zpráva pro nastavení požadované teploty v módu teplotní komora na hodnotu 84,76 °C je následující [0x02 0x04 0x06 0x42 0xAB 0x85 0x1F 0x03]. První a poslední bajt zprávy jsou START\_BYTE a STOP\_BYTE. Druhý bajt DATA\_LENGTH má hodnotu 0x04 což je délka čísla v datovém typu float. Třetí bajt INSTRUCTION s hodnotu 0x06 určuje instrukci, kterou má komora vykonat. Následující čtyři bajty 0x42 až 0x1F reprezentují číslo 84,76 v datovém typu float.

## 4 Testování a měření

V této kapitole jsou výsledky testování parametrů zařízení. Všechna měření byla prováděna při teplotě okolí 26 °C. Před měřením byla komora zkalibrována referenčním teploměrem TERMIO 1 společnosti Termoprodukt. Sériové číslo použitého teploměru bylo 780320. Kalibrační list použitého teploměru je v příloze C. Čidlo teploměru bylo umístěno na stěnu komory v bodě, kde je z druhé strany referenční čidlo. Na obrázku 4.1 je tento bod označen REF.



Obr. 4.1 Poloha bodů ve kterých byla měřena teplota

V tomto bodě byla změřena skutečná teplota při třech nastavených teplotách 0 °C, 50 °C a 100 °C. Následně byla vytvořena korekční křivka, která byla implementována do zařízení.

### 4.1 Teplotní rozsah

Teplotní rozsah byl zkoušen při zavřené komoře s jedním čidlem podstupující kalibraci. Nejnižší dosažená teplota byla  $-7,5$  °C, což je o 33,5 °C méně než teplota okolí. Nejvyšší dosažená teplota byla 115 °C, což je o 89 °C větší než teplota okolí.

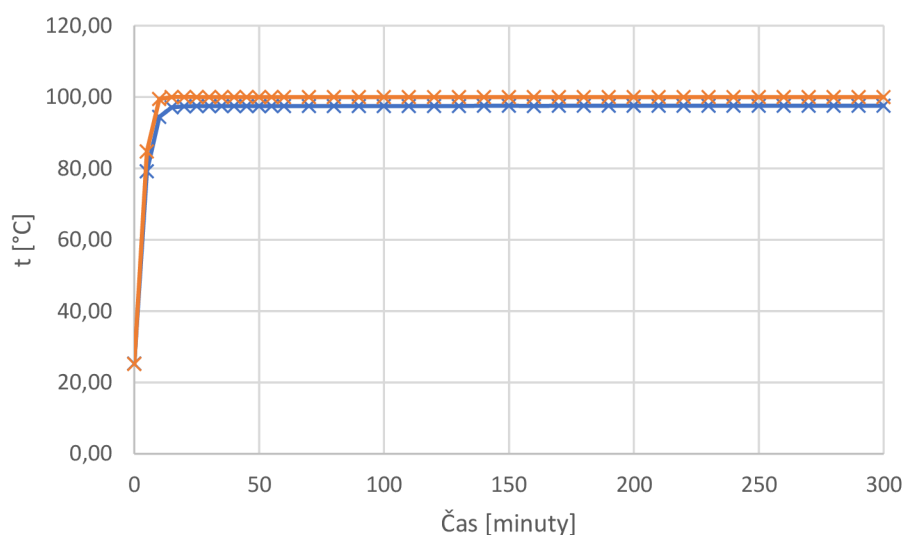
### 4.2 Přesnost a homogenita nastavené teploty

Pro samotné měření přesnosti bylo čidlo teploměru TERMIO 1 umístěno do bodu A v komoře dle obrázku 4.1. V tomto bodě byla měřena teplota pro několik nastavených hodnot teploty a následně se měření opakovalo pro čidlo umístěné v bodech B až F. Teplota byla odečítána poté, co došlo k indikaci ustálení teploty. Doba než došlo k požadovanému ustálení byla přibližně 30 minut. Změřené teploty v jednotlivých bodech jsou v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Teplota v jednotlivých bodech komory dle obrázku 4.1

Nastavená teplota [°C]	Skutečná teplota v bodě [°C]					
	A	B	C	D	E	F
0,00	0,92	0,05	-1,25	0,88	-0,04	-1,18
20,00	20,14	20,09	19,97	20,17	19,95	19,72
40,00	39,56	39,95	40,23	39,46	40,04	40,11
60,00	59,01	59,93	60,58	58,67	60,02	60,63
80,00	78,38	79,94	80,48	77,80	80,10	81,41
100,00	97,17	99,90	100,55	96,93	100,07	101,03

Nejmenší odchylka mezi nastavou a skutečnou teplotou byla v bodech B a E. Maximální odchylka od nastavené teploty v těchto bodech byla  $\pm 0,10$  °C. V ostatních bodech je značná chyba i několik stupňů Celsia. Teplota v komoře tedy není homogení. Pro ověření zda je nehomogenita způsobena nedostatečným ustálením teploty vlivem tepelných kapacit byla měřena teplota v bodě A po dobu tři hodin. Tabulka s výsledky měření je v tabulce v příloze D. Změřená závislost teploty na čase je na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Závislost teploty na čase. Modře je teplota měřená referenčním teploměrem v bodě A dle obrázku 4.1. Oranžově je teplota měřená řídicí jednotkou.

Teplota ani po třech hodinách nedosáhla nastavené hodnoty 100 °C. Po 30 minutách byla 97,44 °C a po třech hodinách vzrostla na 97,53 °C. Z grafu na obrázku 4.2 byla odečtena hodnota časová konstanta komory  $\tau$  přibližně 4 minuty. Teoreticky by teplota po době  $5 \times \tau$  tedy 20 minut měla dosáhnout 99,3 % nastavené hodnoty 100 °C. K tomu nedochází, je zřejmé, že odchylka není způsobena tepelnou kapacitou komory, ale teplo „uniká ven“. Pravděpodobným zdrojem úniku jsou kovové šrouby, které slouží k uchycení Peltierova článku a chladiče viz. obrázek 3.4. Únik tepla je možné potlačit náhradou kovových šroubů za takové, které

jsou vyrobené z materiálu, jenž disponuje malou tepelnou vodivostí je např. PTFE nebo PEEK. Pokud se testované čidlo umístí do prostoru daného instruktáží (bod B, E nebo REF), dosáhne se maximální chyby skutečné teploty od nastavené hodnoty  $\pm 0,10$  °C.

### 4.3 Stabilita nastavené teploty

Stabilita nastavené teploty byla testována v bodě REF viz. obrázek 4.1 při nastavené teplotě 0 °C, 50 °C a 100 °C. Poté co došlo k signalizaci ustálení byla sledována odchylka od ustálené hodnoty po dobu jedné hodiny. Při všech teplotách byla maximální fluktuace teploty  $\pm 0,01$  °C od ustálené hodnoty.

### 4.4 Kalibrace teplotního čidla

Pro otestování funkce bylo zkalibrováno jedno čidlo Pt100 s označením TT4M-PT100B-T125-M5-500 a jedno Pt1000 s označením TT0P-PT1000B-T105-1500. Kalibrace byla provedena v teplotním rozsahu  $-5$  °C až 110 °C. Pro kalibraci se požadované čidlo umístilo do teplotní komory, na pozici referenčního čidla dle obrázku 4.1. Následně se spustil kalibrační program. Doba trvání kalibrace jednoho čidla je přibližně dvě hodiny. Výsledky kalibrace jsou v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Koeficienty dvou zkalibrovaných PRT čidel a ideálního čidla

Parametr čidla	Pt100	Pt1000	Ideální čidlo
$R_0$ [ $\Omega$ ]	100,65	1005,4	100/1000
$A$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$3,9795 \cdot 10^{-3}$	$3,8623 \cdot 10^{-3}$	$3,9083 \cdot 10^{-3}$
$B$ [ $^{\circ}\text{C}^{-2}$ ]	$-5,437 \cdot 10^{-7}$	$-5,923 \cdot 10^{-7}$	$-5,775 \cdot 10^{-7}$
$C$ [ $^{\circ}\text{C}^{-4}$ ]	$-1,60 \cdot 10^{-9}$	$-1,83 \cdot 10^{-9}$	$-4,1883 \cdot 10^{-12}$

Jde vidět, že parametr C, je značně nepřesný. To je způsobeno tím, že koeficient C začíná mít měřitelný vliv přibližně až pod teplotou  $-40$  °C [6].

## 5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat malou teplotní komoru s Peltierovým článkem, která bude schopna automaticky provést kalibraci teplotních snímačů typu Pt100 a Pt1000. Komora má možnost nejen kalibrovat, ale také udržovat jednu nastavenou teplotu nebo sledovat teplotní profil.

Nejprve byla popsána obecná teorie týkající se problematiky snímání teploty, Peltierových článků a regulace teploty. Popsáno bylo několik typů čidel, především pak čidla PRT. Byly diskutovány regulátory On/Off a PID. Následně byl popsán návrh zapojení řídicí jednotky zařízení. Poté byl popsán návrh DPS, mechanické konstrukce a programového vybavení. Poslední kapitola byla věnována popisu kalibrace zařízení a otestování několika jeho parametrů.

Navržené zapojení je rozděleno do čtyř částí. První část je tvořena Peltierovým článkem a obvody, které se starají o regulaci a přepolování jeho napájecího napětí. V této části jsou také přítomny obvody pro měření napájecího napětí a proudu tekoucím článkem. Jmenovitě se jedná o H-most, LC filtr, snímač proudu a napětí. Druhá část zapojení je tvořena měřicím a budícím obvodem čidel, který slouží pro měření teploty dvou čidel pomocí čtyřvodičové poměrové metody. Jedno čidlo je referenční a měří skutečnou teplotu komory. Druhé čidlo je zařízením kalibrováno a uživatel jej volí dle svých potřeb. Třetí část zapojení je digitální řízení, které pomocí mikrokontroléru ovládá ostatní části obvodu dle požadavků uživatele. Za účelem komunikace s uživatelem disponuje zařízení čtyřmi tlačítky, rotačním enkodérem a alfanumerický LCD displejem. Komunikace s počítačem probíhá přes sběrnici USB pomocí dedikovaného převodníku. Poslední část zařízení jsou napájecí zdroje, které vytvářejí potřebná napájecí napětí. Je implementován obvod, který chrání komoru před zkratem, přepětím a přepólováním napájecího napětí.

Zařízení bylo navrženo, realizováno, opatřeno mechanickou konstrukcí a programovým vybavením. Dále byla provedena kalibrace komory referenčním teploměrem TERMIO 1 a následně byly změřeny parametry komory. Všechna měření byla provedena při teplotě okolí 26 °C. Teplotní rozsah komory je -7,5 °C až 115 °C. Stabilita teploty v komoře dosahuje hodnoty  $\pm 0,01$  °C. Přesnost nastavené teploty (za dodržení určitých podmínek) je  $\pm 0,10$  °C v celém teplotním rozsahu.

Všechny zadané cíle byly bezesbýtku splněny a zařízení je plně funkční. Zařízení má širší teplotní rozsah, lepší přesnost a stabilitu nastavené teploty než bylo požadováno. Realizované zařízení značně usnadňuje provádění kalibrace teplotních snímačů. Je vhodným nástrojem pro měření teplotních závislostí parametrů elektronických součástek jako je např. difuzní napětí diody. Při tvorbě zařízení jsem získal poznatky nejen z oblasti návrhu elektroniky, ale také z oblasti metrologie teploty a tepelných soustav.

# Seznam literatury

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [2] KESTER, Walt. *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices, 1999. ISBN 0-916550-20-6.
- [3] *Thermocouple* [online]. Wikipedia [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>
- [4] *NTC Thermistor* [online]. Vsec [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.vsec.top/product/ntc-thermistor/>
- [5] GYORSKI, John. *Designing with RTD Temperature Sensors* [online]. Design World, 15.6.2009 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/designing-with-rtd-temperature-sensors/>
- [6] *Pt100 temperature sensor – useful things to know* [online]. Beamex, 17.4.2018 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/pt100-temperature-sensor>
- [7] *Callendar-Van Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers* [online]. WIKA, 2014 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: [https://de-de.wika.de/upload/DS\\_IN0029\\_en\\_co\\_59667.pdf](https://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf)
- [8] VAN DUSEN, M. S. *Platinum-Resistance Thermometry at Low Temperatures* [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01679a007>
- [9] *RTD Calibration* [online]. Mosaic Industries, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/temperature-measurement/platinum-rtd-sensors/resistance-calibration-table>
- [10] *Thermoelectric Cooling* [online]. Cairo University, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/Text-PDF/Part%20C-17.pdf>
- [11] TOTALA, Nilesh. *Study and Fabrication of Thermoelectric Air Cooling and Heating System* [online]. 2014 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/281446012\\_Study\\_and\\_Fabrication\\_of\\_Thermoelectric\\_Air\\_Cooling\\_and\\_Heating\\_System](https://www.researchgate.net/publication/281446012_Study_and_Fabrication_of_Thermoelectric_Air_Cooling_and_Heating_System)
- [12] *TEG Cascade 800°C Hot Side Thermoelectric Power Modules* [online]. TECTEG, 2019 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://thermoelectric-generator.com/teg-cascade-800c-hot-side-thermoelectric-power-modules/>
- [13] *Základy teorie ON/OFF a PID regulace* [online]. Dixell, 2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>

- [14] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace 1: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní (v. 1.3.8)* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2019 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/rizeniaregulace1/prednasky>
- [15] *Discrete PID Controller on tinyAVR and megaAVR devices* [online]. Atmel, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-2558-Discrete-PID-Controller-on-tinyAVR-and-megaAVR\\_ApplicationNote\\_AVR221.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-2558-Discrete-PID-Controller-on-tinyAVR-and-megaAVR_ApplicationNote_AVR221.pdf)
- [16] *TEC1-12710* [online]. Hebei [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12710.pdf>
- [17] *SiRA18DP: N-Channel 30 V (D-S) MOSFET* [online]. Vishay, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/62574/sira18dp.pdf>
- [18] *ADP3110A* [online]. ON Semiconductor, 2013 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa201/sbaa201.pdf>
- [19] *Calculation of Power Loss (Synchronous)* [online]. ROHM Semiconductor, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: [https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching\\_regulator/power\\_loss\\_appli-e.pdf](https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/power_loss_appli-e.pdf)
- [20] *LC Filter Design* [online]. Texas Instruments, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slaa701a/slaa701a.pdf>
- [21] *MAX4173: Low-Cost, SOT23, Voltage-Output, High-Side Current-Sense Amplifier* [online]. Maxim Integrated, 2013 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4173-MAX4173T.pdf>
- [22] *PTF- FAMILY: Platinum Temperature Sensors* [online]. TE Connectivity, 2017 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FPTF-FAMILY%7FA2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_PTF-FAMILY\\_A2.pdf%7FNB-PTCO-058](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FPTF-FAMILY%7FA2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_PTF-FAMILY_A2.pdf%7FNB-PTCO-058)
- [23] *Thin Film Precision Chip Resistors* [online]. Multicomp PRO, 2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: [http://www.farnell.com/datasheets/2861106.pdf?\\_ga=2.150499952.755670403.1575504078-1857866211.1570628077&\\_gac=1.212143392.1574895627.EAIAIQobChMIxuvtob-L5gIVE6aaCh1JzAhJEAYYASABEgKxtPD\\_BwE](http://www.farnell.com/datasheets/2861106.pdf?_ga=2.150499952.755670403.1575504078-1857866211.1570628077&_gac=1.212143392.1574895627.EAIAIQobChMIxuvtob-L5gIVE6aaCh1JzAhJEAYYASABEgKxtPD_BwE)
- [24] *RTD Ratiometric Measurements and Filtering Using the ADS1148 and ADS1248 Family of Devices* [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa201/sbaa201.pdf>



- [25] *ADS124S0x Low-Power, Low-Noise, Highly Integrated, 6- and 12-Channel, 4-kSPS, 24-Bit, Delta-Sigma ADC with PGA and Voltage Reference* [online]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads124s08.pdf>
- [26] *PIC18(L)F26/27/45/46/47/55/56/57K42: 28/40/44/48-Pin, Low-Power High-Performance Microcontrollers with XLP Technology* [online]. Microchip, 2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC18LF26-27-45-46-47-55-56-57K42-Data-Sheet-40001919E.pdf>
- [27] *MCLR reset circuit for ICSP* [online]. Microchip [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/forums/m692754.aspx>
- [28] *MC41605A6WK-FPTLW-V2* [online]. Midas Displays, 2016 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: [http://www.farnell.com/datasheets/2175726.pdf?\\_ga=2.243716229.147433264.1575061718-1857866211.1570628077&\\_gac=1.141347206.1574895627.EA1aIQobChMIxuvtob-L5gIVE6aaCh1JzAhJEAYYASABEgKxtPD\\_BwE](http://www.farnell.com/datasheets/2175726.pdf?_ga=2.243716229.147433264.1575061718-1857866211.1570628077&_gac=1.141347206.1574895627.EA1aIQobChMIxuvtob-L5gIVE6aaCh1JzAhJEAYYASABEgKxtPD_BwE)
- [29] *FT230X USB To Basic Uart IC* [online]. FTDI, 2016 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT230X.pdf](https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf)
- [30] *DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* [online]. Maxim Integrated, 2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [31] *LD1117A: Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators* [online]. STMicroelectronics [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00002116.pdf>
- [32] COBUS, Van Eeden. *AN1476: Combining the CLC and NCO to Implement a High-Resolution PWM* [online]. Microchip, 2015 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwAppNotes/AppNotes.aspx?appnote=en560120>

# Seznam obrázků

Obr. 1.1 Typický termočlánek (převzato z [2]) .....	3
Obr. 1.2 Konstrukce několika NTC termistorů (převzato z [3]) .....	4
Obr. 1.3 Ukázka vinuté konstrukce (nahore) a tenkovrstvé konstrukce PRT čidla (převzato z [5]).....	5
Obr. 1.4 Konstrukce Peltierova článku (převzato z [11]).....	9
Obr. 1.5 Závislost stavu akčního členu (topení) na regulované veličině (teplota) u On/Off regulace (převzato z [13]) .....	11
Obr. 1.6 Uzavřená regulační smyčka (převzato z [14]).....	11
Obr. 1.7 PID regulátor (převzato z [15]) .....	12
Obr. 1.8 Odezva P regulátoru na jednotkový skok.....	13
Obr. 1.9 Odezva P, I a PI regulátoru na jednotkový skok .....	14
Obr. 1.10 Odezva P a PD regulátoru na jednotkový skok.....	15
Obr. 1.11 Odezva P, PI, PD a PID regulátoru na jednotkový skok.....	16
Obr. 2.1 Blokové schéma řídicí jednotky .....	18
Obr. 2.2 Schéma H-mostu .....	20
Obr. 2.3 Schéma LC filtru pro vyhlazení napětí Peltierova článku.....	21
Obr. 2.4 Schéma děliče napětí pro snímání napětí Peltierova článku .....	22
Obr. 2.5 Schéma obvodu pro měření proudu.....	23
Obr. 2.6 Schéma zapojení chladícího ventilátoru .....	24
Obr. 2.7 Topologie použitých RC filtrů .....	26
Obr. 2.8 Schéma zapojení vstupního obvodu pro měření referenčního čidla.....	27
Obr. 2.9 Schéma zapojení vstupního obvodu pro měření kalibrovaného čidla.....	28
Obr. 2.10 Blokové schéma A/D převodníku ADS124S06 (převzato z [22]) .....	30
Obr. 2.11 Schéma zapojení samotného A/D převodníku (převzato z [22]) .....	30
Obr. 2.12 Schéma zapojení mikrokontroléru.....	34
Obr. 2.13 Schéma zapojení ICSP rozhraní a resetovacího tlačítka .....	34
Obr. 2.14 Schéma zapojení tlačítek .....	35

Obr. 2.15 Schéma zapojení rotačního enkodéru.....	35
Obr. 2.16 Schéma zapojení LCD displeje .....	36
Obr. 2.17 Schéma zapojení převodníku USB/UART (převzato z [29]).....	37
Obr. 2.18 Schéma zapojení čidla okolní teploty.....	37
Obr. 2.19 Schéma zapojení napájecího vstupního obvodu.....	39
Obr. 2.20 Schéma zapojení regulátorů .....	40
Obr. 3.1 Pohled na 3D vizualizaci DPS ze strany top se zvýrazněnými částmi obvodu.....	41
Obr. 3.2 Pohled na 3D vizualizaci DPS ze strany bottom.....	42
Obr. 3.3 Detail řídicí části .....	43
Obr. 3.4 Detail uchycení Peltierova článku, chladiče a referenčního čidla ke krabicice .....	43
Obr. 3.5 Dva plechové díly a vnitřní krabice .....	44
Obr. 3.6 Detail magnetického spoje složeného z vratového šroubu (nalevo) a magnetického úchyty s vnějším závitem.....	45
Obr. 3.7 Víko komory z vnitřní strany .....	45
Obr. 3.8 Otevřená komora s izolací.....	46
Obr. 3.9 Uzavřená komora .....	46
Obr. 3.10 Zapojení generátoru PWM .....	48
Obr. 3.11 Hlavní obrazovka .....	48
Obr. 3.12 Obrazovka v módu teplotní komora.....	49
Obr. 3.13 Obrazovka pro nastavení parametrů PID regulátoru.....	49
Obr. 3.14 Obrazovka pro nastavení parametrů kalibrace .....	50
Obr. 3.15 Obrazovka v průběhu kalibrace.....	50
Obr. 3.16 Obrazovka s výsledky kalibrace.....	50
Obr. 3.17 Obrazovka módu teplotní profil .....	51
Obr. 3.18 Obrazovka pro nastavení teplotního profilu.....	51
Obr. 4.1 Poloha bodů ve kterých byla měřena teplota.....	53
Obr. 4.2 Závislost teploty na čase. Modře je teplota měřená referenčním teploměrem v bodě A dle obrázku 4.1. Oranžově je teplota měřená řídicí jednotkou. ....	54

# Seznam tabulek

Tab. 1.1 Vlastnosti běžně dostupných snímačů teploty.....	2
Tab. 1.2 Třídy PRT čidel dle normy IEC 60751 .....	6
Tab. 1.3 Koeficienty aproximace racionální lomenou funkcí pro PRT čidlo.....	7
Tab. 1.4 Převodní vztahy Ziegler-Nicholsovy metody.....	17
Tab. 2.1 Shrnutí parametrů měřicího obvodu.....	26
Tab. 2.2 Předpokládaná spotřeba zařízení .....	38
Tab. 3.1 Formát zprávy pro komunikaci s PC.....	52
Tab. 4.1 Teplota v jednotlivých bodech komory dle obrázku 4.1 .....	54
Tab. 4.2 Koeficienty dvou zkalibrovaných PRT čidel a ideálního čidla.....	55

# SEZNAM ZKRATEK

A/D	analogově digitální
ADC	převodník analogového signálu na digitální (Analog to Digital Converter)
APR	aproximace
CLC	konfigurovatelná logická buňka (Configurable Logic Cell)
CWG	generátor komplementárního signálu (Complementary Waveform Generator)
DPDT	konfigurace kontaktů relé sestavená ze dvou přepínacích kontaktů (Double Pole Double Throw)
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	typ nevolatilní paměti (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
GE	chyba zesílení A/D převodníku (Gain Error)
GPIO	vstupně výstupní vývod pro obecné použití (General Purpose Input Output)
ICSP	programovací rozhraní (In-Circuit Serial Programming)
INL	chyba nelinearity A/D převodníku (Integral NonLinearity)
IO	vstupně výstupní (Input Output)
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
LED	luminiscenční dioda (Light Emitting Diode)
MO	měřicí obvod
MUX	mulpiexor
NCO	číslicově řízený oscilátor (Numerically Contolled Oscillator)
NTC	záporná závislost odporu na teplotě (Negative Temperature Coeficient)
OD	signál pro vypnutí výstupu (Output Disable)
PEEK	druh plastu (PolyEtherEtherKetone)
PGA	zesilovač s programovatelným zesílení (Programmable Gain Amplifier)
PID	Proporcionálně Integračně Derivační
PLA	druh plastu (PoLyactic Acid)
PRT	platinové teplotní čidlo (Platinum Resistence Thermometer)
PSD	Proporcionálně Sumačně Diferenční
PTFE	druh plastu (PolyTetraFluoroEthylene)
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
REF	referenční

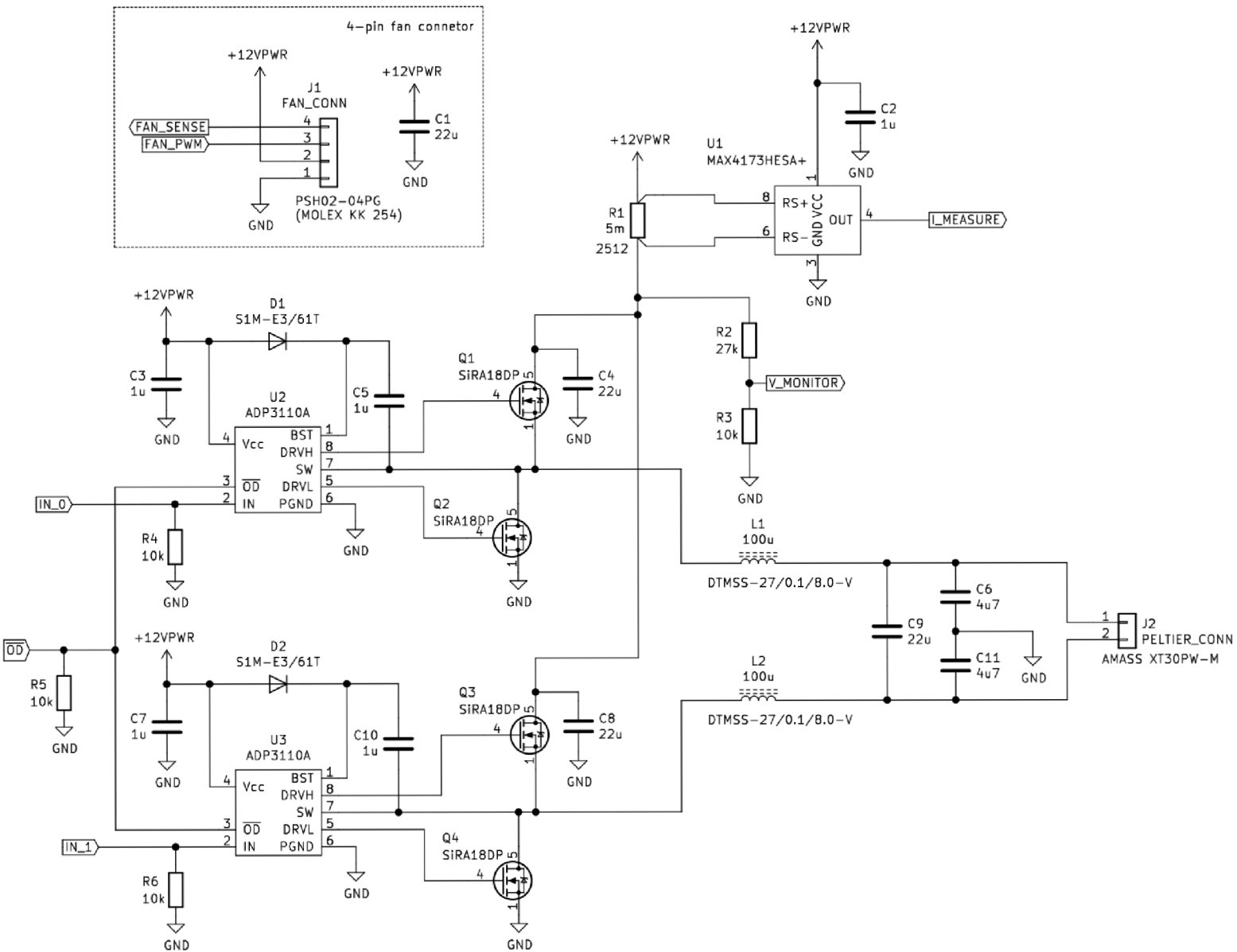
RTD	druh čidla s kovovým snímacím prvkem (Resistance Temperature Detector)
SH	samoohřev (Self-Heating)
SPI	sběrnice (Serial Peripheral Interface)
TUE	celková nekorigovaná chyba A/D převodníku (Total Unadjusted Error)
UART	sběrnice (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
USB	sběrnice (Universal Serial Bus)

# Seznam Příloh

<b>A. SCHÉMA ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>66</b>
A.1 OBVOD PELTIEROVA ČLÁNKU .....	66
A.2 BUDÍCÍ A SNÍMACÍ OBVOD ČIDEL .....	67
A.3 DIGITÁLNÍ ŘÍZENÍ .....	68
A.4 NAPÁJECÍ ZDROJE .....	69
<b>B. NÁVRH DPS .....</b>	<b>70</b>
B.1 VODIVÝ MOTIV ZE STRANY SOUČÁSTEK (FRONT) .....	70
B.2 VODIVÝ MOTIV ZE STRANY SPOJŮ (BOTTOM) .....	71
<b>C. KALIBRAČNÍ LIST TEPLoměRU TERMIO 1 .....</b>	<b>72</b>
<b>D. TABULKA ZÁVISLOSTI TEPLoty NA ČASE .....</b>	<b>73</b>

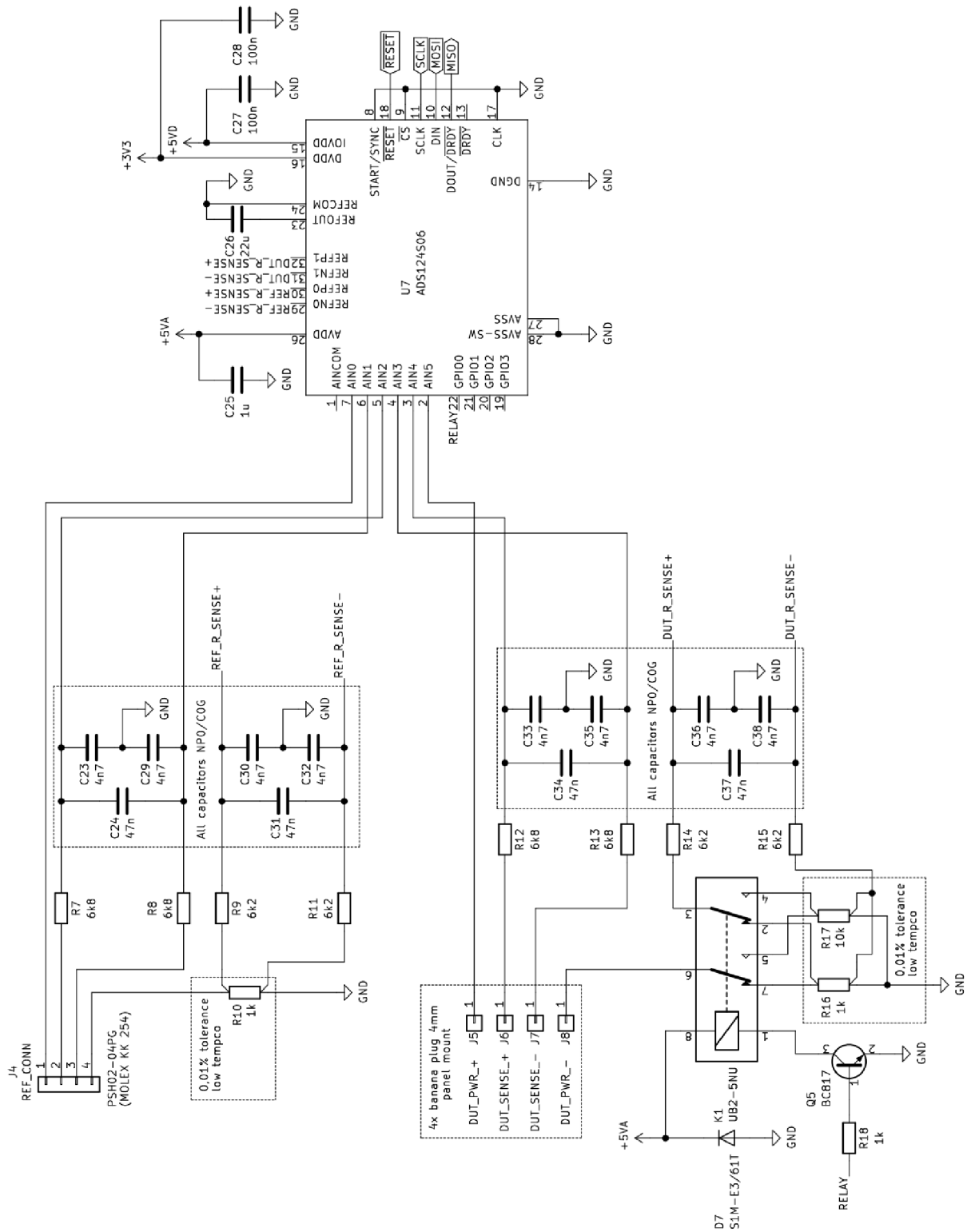
# A. Schéma zařízení

## A.1 Obvod Peltierova článku

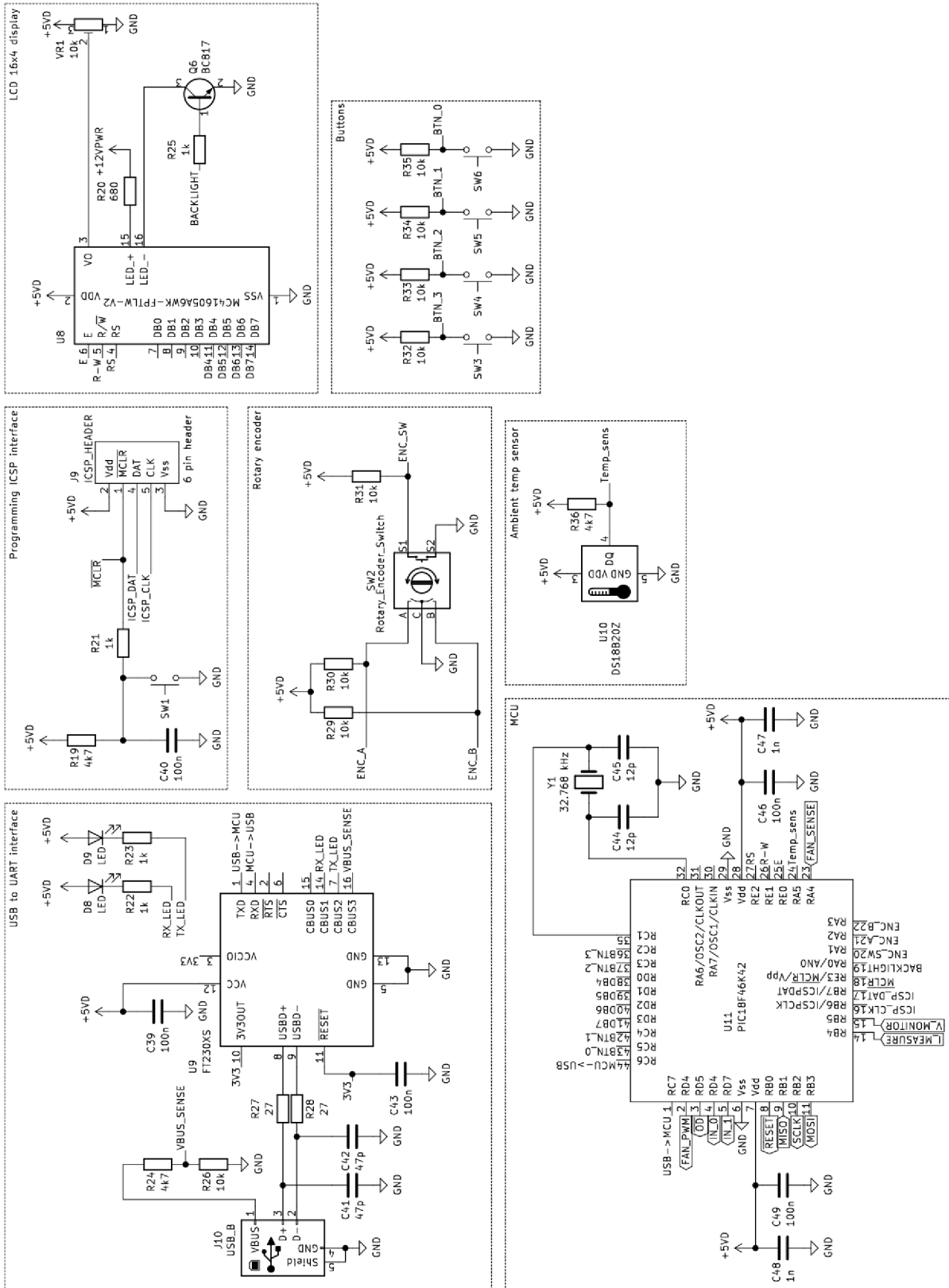




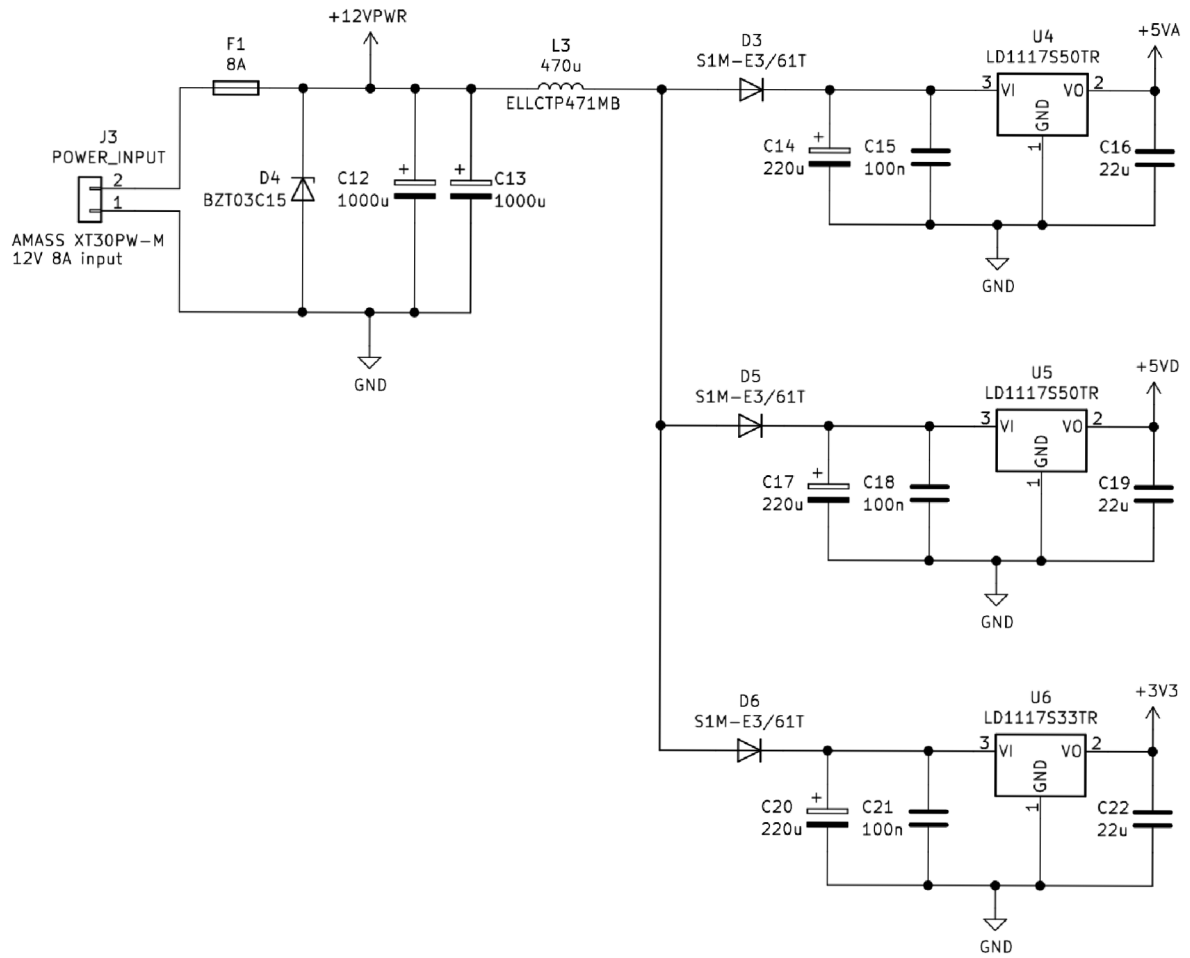
## A.2 Budící a snímací obvod čidel



# A.3 Digitální řízení

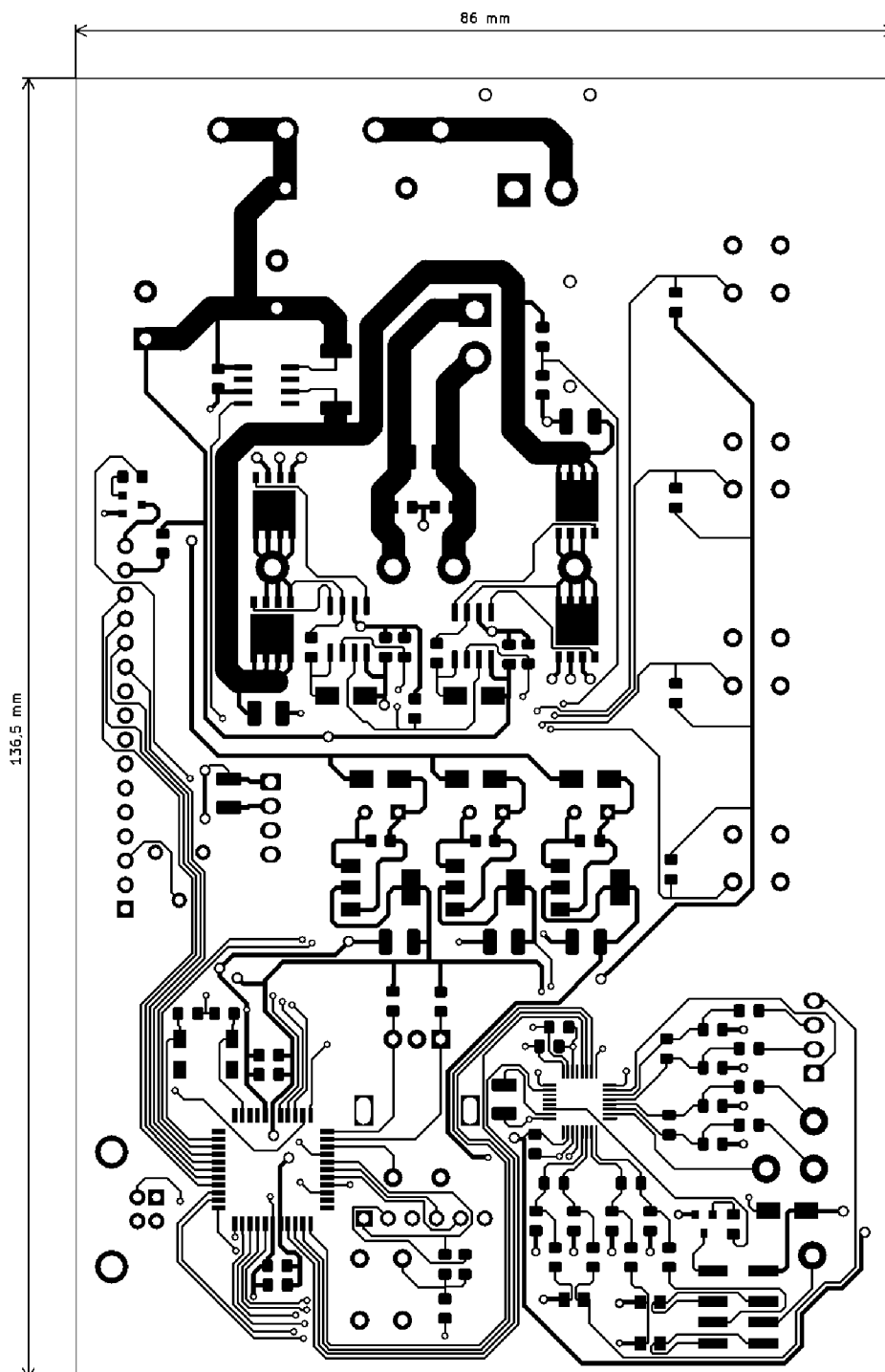


## A.4 Napájecí zdroje

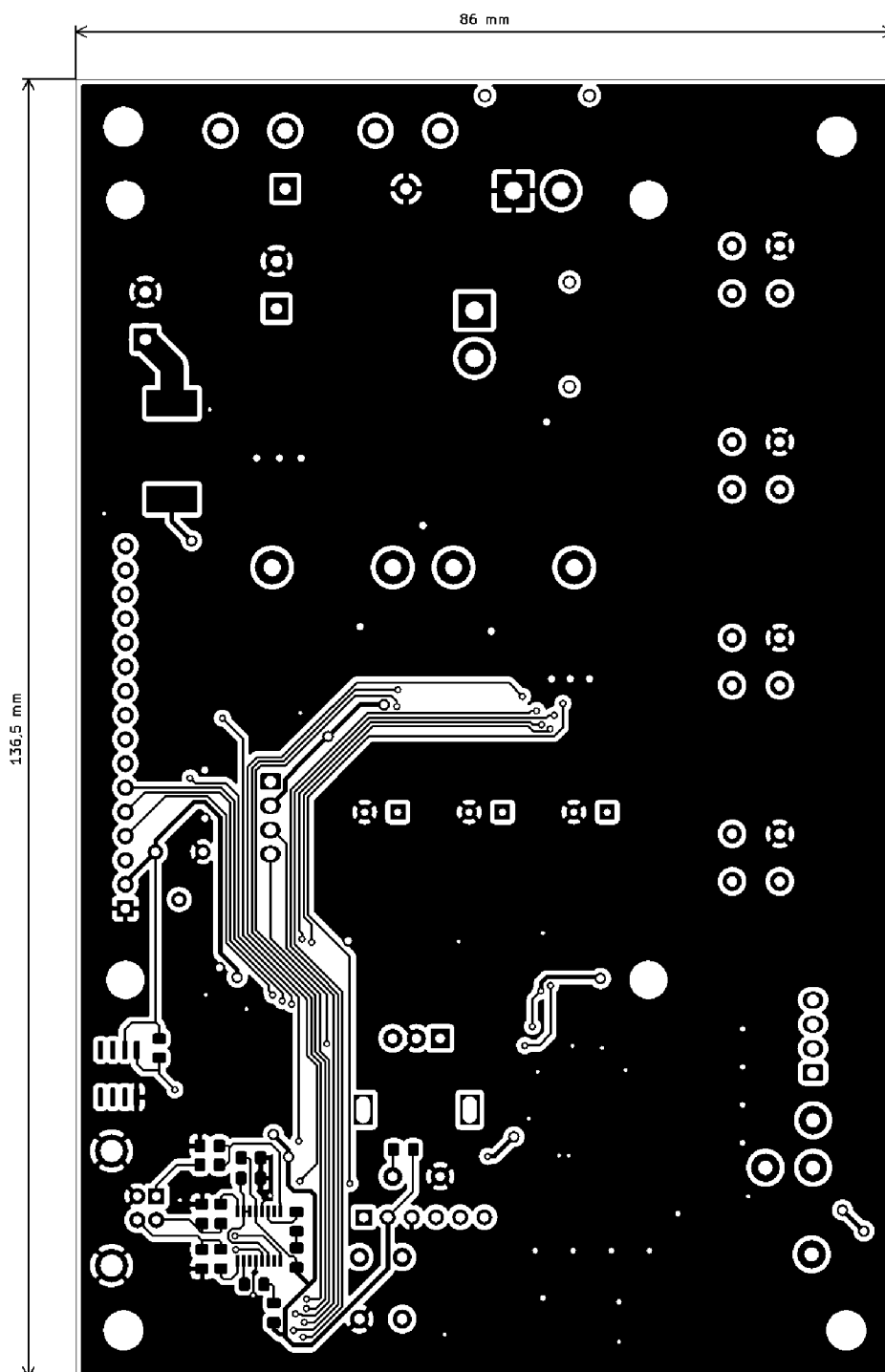


## B. Návrh DPS

### B.1 Vodivý motiv ze strany součástek (front)



## B.2 Vodivý motiv ze strany spojů (bottom)



## C. Kalibrační list teploměru Termio 1

TERMOPRODUKT  
ul. Tkacka 17  
58-260 Bielawa  
tel. +48 (74) 8336 246  
fax +48 (74) 640 11 59  
internet: www.termoprodukt.cz  
e-mail: agata@termoprodukt.com.pl

TERMOPRODUKT

Kalibrační list číslo 1024/20

Datum vystavení: 27.04.2020

Strana 1 (celkem 1)

Předmět : Datalogger , výrobce: Termoprodukt  
Typ : Termio-1, typ sondy: ST 05, identifikační číslo : 780320  
Použitý etalon : Digitální teploměr Ametek DIT 1000 no 00895401159  
Popis kalibrace : Kalibrace byla provedena porovnávací metodou s etalonem podle metodiky 5.4 "Calibration Temperature"  
Kalibrace byla provedena při teplotě okoli 23°C +/- 3 °C a relativní vlhkosti 45% +/- 3 %  
Návaznost : Měření má metrologickou návaznost na etalony GUM Polské metrologického institute  
Neměřené hodnoty :

Etalonová teplota Te °C	Neměřená teplota Tz °C	Rozdíl Tz- Te °C	Nejistota °C
0.00	0.00	0.00	0.1
50.00	50.04	0.04	0.1
100.00	100.01	0.01	0.1
150.00	149.95	-0.05	0.2

Nejistota : Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k = 2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%.  
Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

Datum kalibrace : 27.04.2020

Kalibraci provedl: Piotr Wróblewski

PPHU TERMOPRODUKT  
mgr inż. Piotr Wróblewski  
58-260 Bielawa, ul. Tkacka 17  
NIP 882-145-99-56, Regon 490399085  
tel. 74 633 6246

Tento dokument může být rozšiřován pouze v celkovém počtu stran bezzměn. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze pracovištěm kalibrační laboratoře, které dokument vystavilo.

## D. Tabulka závislosti teploty na čase

Čas [minut]	Teplota změřená teploměrem TERMIO 1 [°C]	Teplota změřená řídicí jednotkou [°C]
0	25,26	25,23
5	79,15	84,74
10	94,42	99,48
15	97,12	99,99
20	97,37	100,02
25	97,43	100,00
30	97,44	100,00
35	97,45	100,01
40	97,47	100,00
45	97,46	100,01
50	97,48	100,00
55	97,49	100,00
60	97,49	99,99
70	97,51	100,00
80	97,51	100,00
90	97,50	100,01
100	97,51	100,00
110	97,50	100,00
120	97,51	100,00
130	97,51	100,01
140	97,52	100,00
150	97,52	99,99
160	97,51	100,00
170	97,52	100,00
180	97,52	100,00
190	97,52	99,99
200	97,52	100,01
210	97,53	100,00
220	97,52	100,00
230	97,52	100,01
240	97,52	100,00
250	97,53	100,00
260	97,53	100,00
270	97,53	100,00
280	97,53	99,99
290	97,52	100,00
300	97,53	100,01