

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MIKROPROCESOREM ŘÍZENÉ MĚŘENÍ A REGULACE TEPLoty

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MICHAL VOŽDA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## MIKROPROCESOREM ŘÍZENÉ MĚŘENÍ A REGULACE TEPLoty

MICROPROCESSOR CONTROLLED MEASUREMENT AND CONTROL TEMPERATURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL VOŽDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SEKORA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Biomedicínské a ekologické inženýrství**

**Student:** Bc. Michal Vožda

**ID:** 72773

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Mikroprocesorem řízené měření a regulace teploty**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte schéma zapojení digitálního teploměru a termostatu sloužícího pro experimentální měření. Diskutujte vhodnost zvoleného snímače pro měření fyziologického roztoku v teplotním rozsahu od 30°C do 45°C s přesností 0,2°C Navrhněte vhodné řešení termostatu tak, aby byl schopen ochlazovat i ohřívat fyziologický roztok.

Práce musí obsahovat blokové schéma a elektrické schéma zapojení, vývojový diagram řídicího programu pro mikrokontrolér a program samotný, rozpisku součástek a výkresy desky plošných spojů pro realizaci přípravku.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Měření teploty - senzory a měřicí obvody. BEN. ISBN 80-7300-145-4.

[2] Temperature Sensors :Thermal Management Products [online].

Dostupné z: <<http://www.microchip.com/>>

**Termín zadání:** 15.10.2010

**Termín odevzdání:** 20.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Sekora

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Tato práce se zabývá návrhem termostatu pro stabilizaci teploty fyziologického roztoku při experimentálním měření na Langendorffově aparátu. Jsou zde popsány základní senzory pro měření teploty a jejich zapojení v obvodu. Termostat umožňuje ohřev i chlazení fyziologického roztoku pomocí Peltierovy termobaterie. V práci je popsáno zapojení a realizace navrhovaného zařízení včetně ověření jeho funkce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Měření teploty, PSD termostat, Langendorffův aparát, H-můstek, Termistor.

## **ABSTRACT**

The aim of the project is a design of the temperature controller based on microprocessor. There are described the most widely used sensors for the temperature measuring and their involvement in the electric circuit. The temperature controller is based on the Peltier's thermoelectric battery. Project describes power control of this thermoelectric battery and also a design of the entire system and a description of the blocks takes a part.

## **KEYWORDS**

Temperature measurement, PSD thermostat, Langendorff's apparatus, H-bridge, Thermistor.

VOŽDA, Michal *Mikroprocesorem řízené měření a regulace teploty*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 65 s. a XV s. příloh. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Sekora

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Mikroprocesorem řízené měření a regulace teploty“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně, dne 20. května 2011

.....  
(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Sekorovi, vedoucímu mé diplomové práce, za trpělivé vedení, zajištění podmínek a prostředků pro praktickou realizaci. Věřím, že díky jeho snaze a podpoře nalezne tato práce uplatnění při experimentálních měřeních na Langendorffově aparátu.

V Brně, dne 20. května 2011

Bc. Michal Vožda

# OBSAH

Úvod	9
<b>1 Senzory teploty</b>	<b>10</b>
1.1 Termoelektrické články	10
1.2 Kovové odporové senzory teploty	11
1.3 Polovodičové senzory teploty	13
1.3.1 Negastor (NTC termistor)	13
1.3.2 Pozistor (PTC termistor)	15
1.3.3 Polovodičové monokrystalické senzory teploty	15
1.4 Monolitické PN senzory teploty	16
1.4.1 LM35	17
1.4.2 SMT160-30	18
1.4.3 TMP275	18
<b>2 Návrh měřící části</b>	<b>20</b>
2.1 Převodník odporu na napětí	20
2.1.1 Dělič napětí	20
2.1.2 Čtyřvodičové zapojení se zdrojem proudu	21
2.1.3 Wheatstoneův můstek	22
2.2 Přizpůsobovací obvod	25
2.3 Požadavky na A/D převodník	27
2.3.1 Výběr mikrokontroléru	28
<b>3 Návrh termostatu</b>	<b>29</b>
3.1 Peltierův článek	29
3.2 Napájení Peltierovy termobaterie	31
3.3 Regulátor teploty	32
3.3.1 Třístavový regulátor	33
3.3.2 Proporcionální regulace	34
3.3.3 PID a PSD regulace	36
3.4 Nastavení regulátoru	38
3.4.1 Metoda přechodové charakteristiky	39
3.4.2 Metoda kritických parametrů	39
3.4.3 Metoda releové zpětné vazby	40
3.4.4 Metoda pokusů a omylů	40

<b>4</b>	<b>Periferie</b>	<b>41</b>
4.1	Rozhraní pro komunikaci s PC . . . . .	41
4.2	Ovládací prvky . . . . .	44
4.3	LCD . . . . .	45
4.4	Teploměr s číslicovým výstupem . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Napájecí obvody</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Realizace zařízení</b>	<b>51</b>
6.1	Provedení vlastního zařízení . . . . .	51
6.2	Provedení senzoru teploty . . . . .	53
6.3	Provedení chladičů Peltierovy termobaterie . . . . .	53
6.4	Programování mikrokontroléru a popis firmware . . . . .	54
6.5	Program pro zobrazení teploty a nastavení termostatu . . . . .	56
6.6	Kalibrace měřící části . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Experimentální ověření</b>	<b>58</b>
7.1	Třístavová regulace . . . . .	58
7.2	PSD regulace . . . . .	59
7.3	Shrnutí . . . . .	60
	<b>Závěr</b>	<b>62</b>
	<b>Literatura</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam veličin a zkratk</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Struktura menu</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Program v LabVIEW</b>	<b>II</b>
<b>C</b>	<b>Řídící část</b>	<b>III</b>
<b>D</b>	<b>Napájecí část</b>	<b>VII</b>
<b>E</b>	<b>Měřící část</b>	<b>X</b>
<b>F</b>	<b>Spínání ventilátorů</b>	<b>XII</b>
<b>G</b>	<b>Vývojové diagramy programu mikrokontroléru</b>	<b>XIV</b>
<b>H</b>	<b>Popis konektorů a ovládacích prvků zařízení</b>	<b>XV</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Blokové uspořádání Langendorffova aparátu . . . . .	9
1.1	Terminologie měřícího řetězce termoelektrického článku . . . . .	11
1.2	Závislost odporu na teplotě platinového a niklového senzoru. . . . .	12
1.3	Závislost odporu termistoru na teplotě . . . . .	14
1.4	Ukázka perličkového termistoru . . . . .	15
1.5	Průběh odporu křemíkového senzoru KTY10-5 v závislosti na teplotě	16
1.6	Vliv teploty na AV charakteristiku PN přechodu $T_1 < T_2$ . . . . .	17
1.7	Zapojení senzoru LM35 . . . . .	18
1.8	Popis vývodů integrovaného teploměru TMP275 . . . . .	19
2.1	Zapojení termistoru v děliči . . . . .	20
2.2	Čtyřvodičové zapojení termistoru . . . . .	21
2.3	Simulace čtyřvodičového zapojení termistoru v programu PSpice . . .	22
2.4	Můstkové zapojení termistoru . . . . .	23
2.5	Vypočtený průběh napětí na můstku s termistorem $R_T(25) = 10\text{ k}\Omega$ .	24
2.6	Návrh zapojení měřící části . . . . .	25
2.7	Simulace měřící části v programu PSpice . . . . .	26
3.1	Základní element Peltierovy termobaterie . . . . .	29
3.2	Ukázka Peltierovy termobaterie . . . . .	30
3.3	Zapojení H-můstku pro spínání Peltierovy termobaterie . . . . .	31
3.4	Simulace H-můstku v programu PSpice . . . . .	33
3.5	Blokové schéma regulačního řetězce . . . . .	33
3.6	Ukázka průběhu dvoustavové regulace na modelu . . . . .	35
3.7	Ukázka průběhu proporcionální regulace na modelu . . . . .	36
3.8	Struktura paralelního PID regulátoru . . . . .	36
3.9	Přechodová charakteristika proporcionální regulace . . . . .	39
4.1	Zapojení obvodu doporučené výrobcem [14] . . . . .	41
4.2	Zapojení tlačítka a rotačního kodéru s potvrzovacím kontaktem . . .	44
4.3	Výstupní průběhy rotačního kodéru . . . . .	45
4.4	Popis zapojení na sběrnici I2C . . . . .	47
4.5	Formát rámce pro komunikaci na sběrnici I2C . . . . .	48
5.1	Blokové schéma napájecího zdroje . . . . .	50
6.1	Blokové schéma navrhovaného zařízení . . . . .	51
6.2	Zadní pohled na zařízení . . . . .	52
6.3	Čelní pohled na zařízení . . . . .	52
6.4	Provedení senzoru a kalibrační koncovky . . . . .	53
6.5	Schématické uspořádání experimentu . . . . .	54
6.6	Způsob připojení ISP programátoru . . . . .	55

7.1	Ohřev vody na teplotu 37 °C třístavovou regulací . . . . .	58
7.2	Reakce třístavového regulátoru na skokové změny teploty . . . . .	59
7.3	Ohřev vody na teplotu 37 °C PSD regulací . . . . .	60
7.4	Reakce PSD regulátoru na skokové změny teploty . . . . .	61
7.5	Ukázka průběhu regulace se správně nastavenými PSD konstantami . . . . .	61
C.1	Schéma zapojení řídicí části . . . . .	III
C.2	Předloha pro výrobu DPS ze strany součástek „top“, měřítko 1:1 . . . . .	IV
C.3	Osazovací plán strany „top“ . . . . .	IV
C.4	Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1 . . . . .	V
C.5	Osazovací plán strany „bottom“ . . . . .	V
D.1	Schéma zapojení napájecí části . . . . .	VII
D.2	Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1 . . . . .	VII
D.3	Osazovací plán strany „bottom“ . . . . .	VIII
D.4	Osazovací plán strany „top“ . . . . .	VIII
E.1	Schéma zapojení měřicí části . . . . .	X
E.2	Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1 . . . . .	X
E.3	Osazovací plán strany „bottom“ . . . . .	XI
E.4	Osazovací plán strany „top“ . . . . .	XI
F.1	Schéma zapojení pro spínání ventilátorů . . . . .	XII
F.2	Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1 . . . . .	XII
F.3	Osazovací plán strany „top“ . . . . .	XII

## SEZNAM TABULEK

3.1	Parametry vybrané Peltierovy termobaterie . . . . .	31
3.2	Účinky zvýšení konstant PSD regulátoru na regulační odezvu . . . . .	40
4.1	Formát rámce pro přenos dat do PC . . . . .	43
4.2	Formát bajtu pro přenos informací o stavu periferií . . . . .	43
4.3	Formát rámce pro přenos dat z PC do MCU . . . . .	43
5.1	Požadavky na napájení navrhovaných obvodů . . . . .	50
C.1	Rozpiska součástek pro řídicí část . . . . .	VI
D.1	Rozpiska součástek pro napájecí část . . . . .	IX
E.1	Rozpiska součástek pro měřicí část . . . . .	XI
F.1	Rozpiska součástek pro spínání ventilátorů . . . . .	XIII

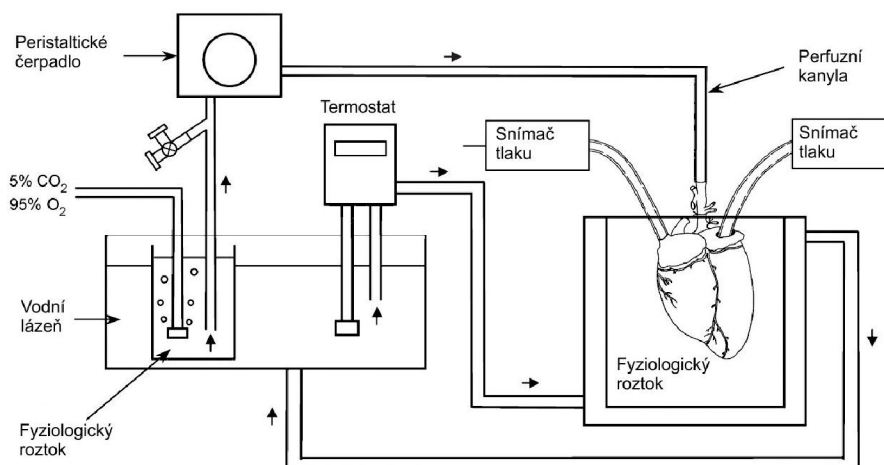
# ÚVOD

Ve farmakologickém a fyziologickém výzkumu se využívá techniky měření na živém zvířecím srdci. Pro takové měření je potřeba srdce umístit do prostředí, kde může pracovat i hodiny po vyjmutí z těla zvířete. To zajišťuje *Langendorffova aparatura*, ve které je srdce zavěšeno za aortu a promýváno fyziologickým roztokem doplněným o živiny. Na takto uchyceném srdci je možno provádět měření a zjišťovat například vliv léků na jeho činnost. Aby srdce mělo vhodné podmínky pro svou činnost, je potřeba mimo jiné udržovat v prostředí konstantní teplotu fyziologického roztoku.

Cílem této práce je navrhnout autonomní systém, který na základě změřené teploty určí velikost akčního zásahu a provede kompenzaci teplotních změn fyziologického roztoku, které nastávají v průběhu experimentu vlivem vnitřních i vnějších faktorů, jako jsou například:

1. počáteční teplota fyziologického roztoku a teplota okolí,
2. ohřívání roztoku vlivem vlastní činnosti srdce.

Při návrhu termostatu je nutno brát v úvahu oba body, proto je potřeba aby regulační systém dokázal roztok v sekundárním okruhu ohřívát, ale také chladit. Dále systém musí pracovat tak, aby neovlivňoval průběh experimentu. Chladicí nebo ohřívací médium musí být odděleno od primárního okruhu s fyziologickým roztokem a k předávání tepla musí docházet pokud možno rovnoměrně a s co nejmenšími překmity hodnoty teploty. To se dá zajistit například spojitou PID (proporcionálně integračně derivační) regulací nebo jeho diskretním ekvivalentem PSD (proporcionálně sumačně diferenčním) číslicově řízeným regulátorem. Uspořádání celé aparatury je naznačeno na obrázku 1.



Obr. 1: Blokové uspořádání Langendorffova aparátu

# 1 SENZORY TEPLOTY

Cílem této práce je vytvořit zařízení vykonávající funkci termostatu, který bude v Langendorffově aparatuře zapojen způsobem uvedeným v obrázku 1. Jelikož se jedná o komplexní zařízení, je nutno zde diskutovat několik dílčích částí odděleně a poté postupovat k jednotnému řešení vhodného pro realizaci celého zařízení.

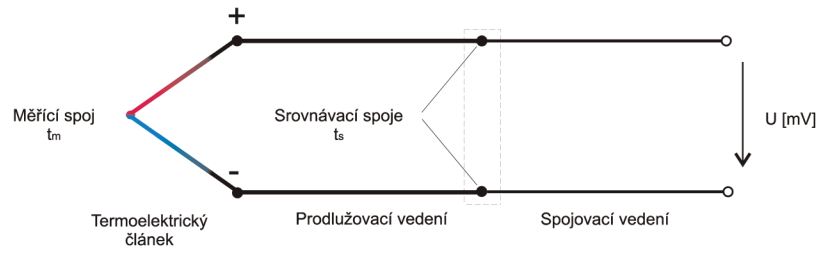
Prvotní informace o aktuální hodnotě regulované veličiny, kterou je v našem případě teplota, vzniká v senzoru. Na senzor jsou kladeny požadavky vycházející z povahy soustavy a také z našeho očekávání přesnosti a rychlosti regulace. Jelikož se jedná o experimenty na biologickém materiálu, který je citlivý na změny teploty, je požadovaná přesnost v řádu desetin stupňů Celsia. Abychom byli schopni takto přesného měření, musíme zvážit vhodnost jednotlivých senzorů.

Senzory teploty mohou pracovat na různých fyzikálních principech a jejich výstupní informace o teplotě může nabývat různých forem. Jedná se však o měření nepřímé, protože měření teploty je transformace teploty na jinou veličinu, kterou jsme schopni vyhodnotit. V této práci jsou zmíněny pouze senzory, jejichž výstupem je informace o teplotě ve formě elektrického signálu. Senzory lze rozdělit podle jejich funkce na aktivní, ty pracují jako zdroj energie (termoelektrické články), a senzory pasivní, kterým je nutné energii k transformaci teploty na jinou veličinu dodávat.

## 1.1 Termoelektrické články

Termoelektrické články neboli *termočlánky* pracují na principu převodu tepelné energie na elektrickou. Využívají Seebeckova jevu, podle něhož vzniká mezi vývody termočlánku, složeného ze dvou různých kovů, termoelektrické napětí úměrné rozdílu teploty v místě styku kovové dvojice a teploty srovnávacího konce. Zajistíme-li konstantní teplotu srovnávacího konce, bude napětí na termočlánku úměrné teplotě měřicího konce. Citlivost termočlánku je v řádu  $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , lze ji však zvýšit sériovým zapojením více článků. Výhodou je velký teplotní rozsah, ve kterém mohou termočlánky pracovat, proto se používají hojně v průmyslových aplikacích k měření vysokých teplot. Přesnost je v porovnání s jinými systémy nižší, přesto může dosahovat pro nejpřesnější termočlánky až  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Termočlánky lze také použít jako zdroje proudu, avšak jejich energetická účinnost a výkon jsou malé. Využívá se inverzního jevu k Seebeckovu, a to jev Peltierův, kdy se průchodem proudu vytváří teplotní rozdíl mezi oběma konci vodičů [1].



Obr. 1.1: Terminologie měřicího řetězce termoelektrického článku

## 1.2 Kovové odporové senzory teploty

Principem těchto senzorů je teplotní závislost měrného odporu kovů. Ta je určena materiálovou konstantou, tzv. teplotním součinitelem odporu  $\alpha$  [ $\text{K}^{-1}$ ]. Pro provozní kovové teploměry v rozsahu teplot  $0^\circ\text{C}$  až  $100^\circ\text{C}$  lze používat s určitou nejistotou následující lineární vztah [2]

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

kde  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu [ $\text{K}^{-1}$ ],  
 $R_0$  odpor při teplotě  $0^\circ\text{C}$  [ $\Omega$ ],  
 $t$  teplota [ $^\circ\text{C}$ ].

Teplotní součinitel odporu se v technické praxi obvykle definuje jako [2]

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (1.2)$$

kde  $R_{100}$  je odpor při teplotě  $100^\circ\text{C}$  [ $\Omega$ ].

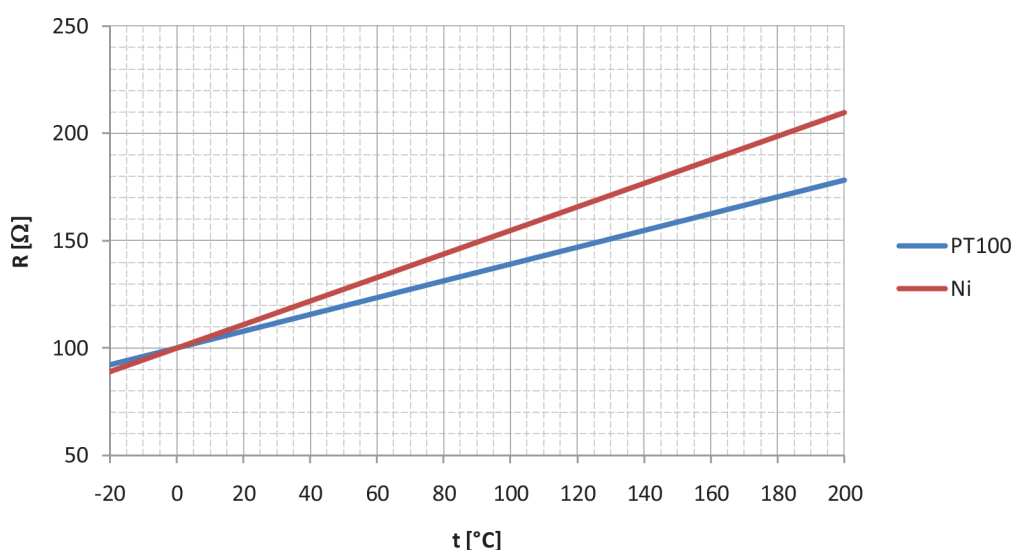
Pro větší rozsahy teploty již platí nelineární rovnice 1.3 v závislosti na použitém kovu. Nejrozšířenějšími materiály pro odporové kovové teploměry jsou platina, nikl, měď, molybden, popřípadě slitiny NiFe a další. Velkou výhodou těchto snímačů je velmi dobrá dlouhodobá stálost parametrů a poměrně široký rozsah pracovních teplot.

Nejvíce používaným materiálem pro výrobu teplotních senzorů je platina. Nejvíce používanější senzory se značí jako *PT100* se jmenovitou hodnotou odporu  $100\ \Omega$  při  $0^\circ\text{C}$ , kromě této hodnoty se vyrábějí Pt senzory  $50$ ,  $200$ ,  $500$ ,  $1000$ ,  $2000\ \Omega$ . Čistá platina je velmi stabilní kov s přesně popsanou závislostí jejího měrného odporu na teplotě. Pro metrologické účely se používá platina s čistotou vyšší než  $99,999\%$  [1]. Určitou nevýhodou těchto snímačů je poměrně malá změna odporu v závislosti na teplotě, která je zobrazena na obrázku 1.2.

$$R(t) = R_0 \left[ 1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100) \right], \quad (1.3)$$

kde  $t$  je teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $R(t)$  odpor při teplotě  $t$  [ $\Omega$ ],  
 $A$  lineární teplotní koeficient odporu [ $\text{K}^{-1}$ ],  
 $B$  kvadratický teplotní koeficient odporu [ $\text{K}^{-2}$ ],  
 $C$  mocninný teplotní koeficient 3. řádu ( $C = 0$  pro  $t > 0^{\circ}\text{C}$ ) [ $\text{K}^{-3}$ ].

Dle mezinárodního doporučení IEC se platinové měřící odpory dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $650^{\circ}\text{C}$  a třída B pro rozsah od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $850^{\circ}\text{C}$ . Chyba při  $0^{\circ}\text{C}$  je ve třídě přesnosti A  $\pm 0,125^{\circ}\text{C}$ , čemuž odpovídá  $\pm 0,06 \Omega$  a  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$  (tj.  $\pm 0,12 \Omega$ ) ve třídě přesnosti B [2].



Obr. 1.2: Závislost odporu na teplotě platinového a niklového senzoru.

Odporové senzory teploty se vyrábějí se dvěma nebo čtyřmi vývody. U dvou-vodičového provedení se při měření odpor vývodů přičítá k odporu vlastního měřícího odporu a způsobuje tím proměnnou chybu. Nejistota údaje způsobená vlivem odporu přívodů se u standardního odporu pohybuje od  $0,1^{\circ}\text{C}$  do  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Pro odporové senzory teploty obecně platí, že průchodem měřícího proudu dochází k jejich ohřívání. Snímač pak indikuje vyšší teplotu, než je skutečná hodnota. Naopak nízká hodnota proudu vyvolá jen malou změnu napětí na odporu, což je nutno kompenzovat větším zesílením, čímž se zesiluje i chyba senzoru. Proto je nutno navrhnout proudové buzení tak, aby se dosáhlo kompromisu s ohledem na oba případy. Výrobci odporových senzorů teploty udávají tzv. zatěžovací konstantu  $D$ , ta odpovídá velikosti výkonu dle vztahu (1.4), která vyvolá změnu teploty čidla o  $1^{\circ}\text{C}$ . K výpočtu velikosti budícího proudu lze využít vztah (1.5) [1].

$$P = R(t)I^2, \quad (1.4)$$

kde  $P$  je ztrátový výkon [W],  
 $I$  velikost budícího proudu [A],  
 $R(t)$  odpor senzoru [ $\Omega$ ].

$$I = \sqrt{\frac{D}{R(t)}}, \quad (1.5)$$

kde  $D$  je zatěžovací konstanta [ $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$ ].

### 1.3 Polovodičové senzory teploty

Využívají, stejně jako kovové odporové snímače, teplotní závislost odporu. U polovodičů je dominantní závislost koncentrace nosičů náboje na teplotě. *Teplotní součinitel odporu* polovodiče je záporný a mnohem větší než u kovů [1]. Mezi nejzákladnější polovodičové senzory patří *termistory*. Ty jsou založeny na teplotní změně odporu polovodičových keramických materiálů. Výhodami těchto čidel jsou velká tepelná změna odporu a malé rozměry, nevýhodami silná nelinearita a horší časová stálost vlastností, která se snižuje umělým stárnutím čidel. Termistory se dle struktury dělí na amorfnní a polykrystalické. V závislosti na materiálu má termistor buď velký záporný teplotní součinitel odporu, tzv. negastor (NTC termistor), nebo velký kladný součinitel odporu, tzv. pozistor (PTC termistor).

#### 1.3.1 Negastor (NTC termistor)

Průběh závislosti odporu na teplotě je popsán u NTC termistorů rovnicí 1.6. Jedná se o polynomickou aproximaci průběhu 3. řádu. Koefficienty udává výrobce pro každý typ termistoru. Pracovní rozsah teplot nabývá hodnot v rozmezí  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  až  $+120\text{ }^\circ\text{C}$ . Nižší pracovní rozsah a mechanická odolnost jsou hlavními nevýhodami těchto senzorů. Pro měření teploty v průmyslu se tedy více využívají technologie zmíněné výše (termočlánky, PT100). Přesnost záleží na typu senzoru, obecně však mohou termistory dosahovat těch největších přesností. Například firma U.S. Sensor dodává termistory s přesností až  $\pm 0,05\text{ }^\circ\text{C}$  [7].

$$T = [A + B \ln(R_T) + C (\ln(R_T))^3]^{-1}, \quad (1.6)$$



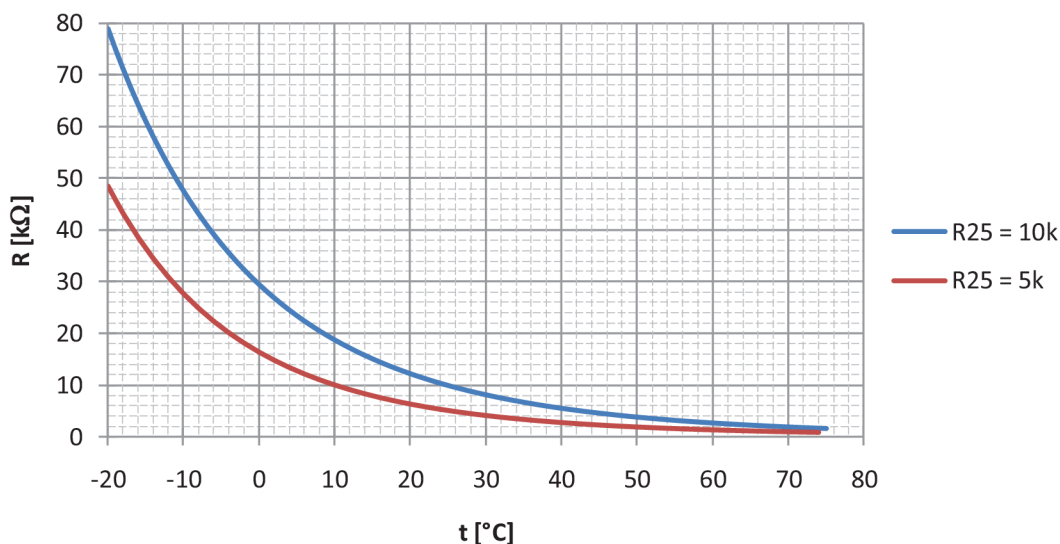
kde  $T$  je termodynamická teplota [K],  
 $R_T$  odpor termistoru [ $\Omega$ ],  
 $A, B, C$  konstanty udávané výrobcem.

Pro přepočítání teploty na hodnotu odporu slouží vztah [1]

$$R_T = e^{\sqrt[3]{\beta - \frac{\alpha}{2}}} - e^{\sqrt[3]{\beta + \frac{\alpha}{2}}}. \quad (1.7)$$

Konstanty  $\alpha$  a  $\beta$  se určí následujícím způsobem

$$\alpha = \frac{A - \frac{1}{T}}{C} \quad ; \quad \beta = \sqrt{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}}.$$



Obr. 1.3: Závislost odporu termistoru na teplotě

Z rovnice (1.7) lze vypočítat průběh tepelné závislosti odporu, ten je zobrazen na obrázku 1.3. Jsou zde pro názornost uvedeny průběhy tepelné závislosti dvou termistorů se jmenovitými hodnotami 10 k $\Omega$  a 5 k $\Omega$  při teplotě 25 °C. Jmenovitá hodnota termistoru se volí podle rozsahu teplot, ve kterém uvažujeme pracovat, a s ohledem na parametry měřicího můstku tak, aby proud tekoucí termistorem vyvolal dostatečně velkou změnu napětí. Proto pro práci ve vyšších teplotách volíme hodnoty termistorů vyšší a pro práci v nízkých teplotách hodnoty nižší. Rozsah vyráběných hodnot odporů je od 100  $\Omega$  do 100 k $\Omega$  [1].

Termistory se používají v různých provedeních, a to v závislosti na typu použití. Běžně jsou k dostání termistory opatřené epoxidovou vrstvou nebo teflonovou trubičkou. Ukázka vzhledu termistoru je na obrázku 1.4.

Pro vyhodnocení změny odporu se využívají, stejně jako pro snímače kovové, měřící můstky nebo čtyřvodičové zapojení se zdrojem proudu. Zde je nutno dbát



Obr. 1.4: Ukázka perličkového termistoru

na nižší proud termistorem, který nabývá hodnot v řádu  $10\ \mu\text{A}$  a je udán výrobcem přímo nebo prostřednictvím zatěžovací konstanty. Výsledný proud poté vypočteme dle vztahu (1.5).

### 1.3.2 Pozistor (PTC termistor)

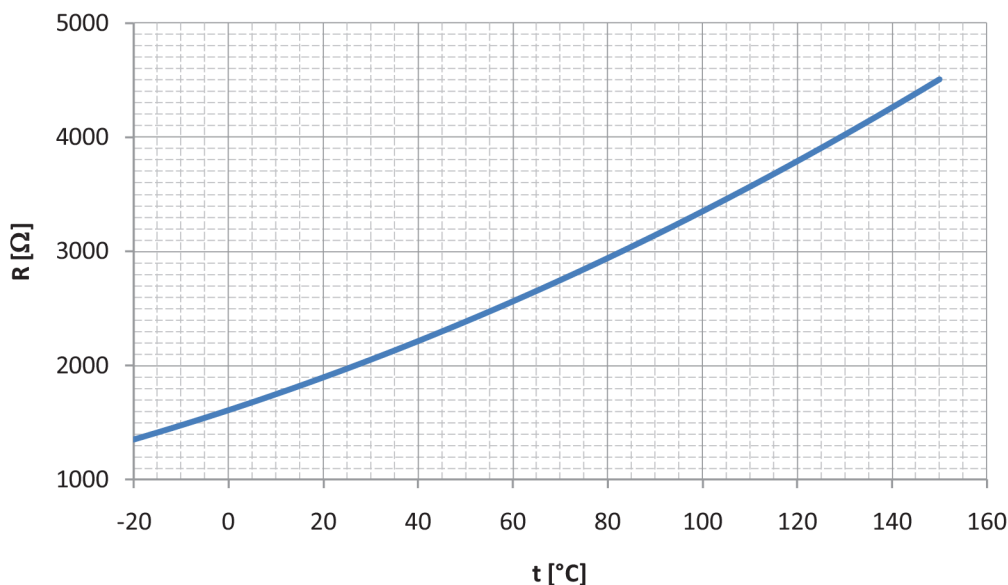
Jedná se o termistory s kladným teplotním součinitelem, vyrobené z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. titaničitanu barnatého ( $\text{BaTiO}_3$ ). Odpor pozistoru při zvyšování teploty mírně klesá, ale po překročení jisté teploty (tzv. Curierovy) strmě vzroste až o několik řádů, pak hodnota odporu opět mírně klesá [2]. Pozistory jsou vhodné pro signalizaci překročení dovolené teploty např. elektromotorů, kde jsou zabudovány přímo do vinutí. PTC termistor lze využít také například k omezení proudu obvodem, kdy průchod většího proudu vyvolá ohřátí součástky, která má díky tomu vyšší odpor [3]. Pro měření teploty je možno použít pozitivní termistory jen v omezeném rozsahu teplot a pro orientační účely, protože průběh závislosti odporu na teplotě není většinou popsán přesně rovnicí, ale je uveden jen graficky a tudíž není možno provést přesný převod odporu na teplotu.

### 1.3.3 Polovodičové monokrystalické senzory teploty

Monokrystalické senzory teploty se vyrábí z křemíku, germania nebo india včetně jejich sloučenin. Umožňují snímání teplot v rozsahu od  $-50\ ^\circ\text{C}$  do  $+150\ ^\circ\text{C}$  (platí pro senzor KTY10). Přesnost těchto senzorů je nižší, jsou však velmi vhodné pro konstrukce nejrůznějších teploměrů, u kterých není kladen důraz na přesnost. Provedení těchto snímačů je v pouzdrech např. TO-92. Jejich teplotní závislost je popsána rovnicí (1.8) a zobrazena na obrázku 1.5.

$$R(t) = R_{25} \left( 1 + \alpha\Delta t + \beta\Delta t^2 \right), \quad (1.8)$$

kde  $\Delta t$  je  $t - 25^\circ\text{C}$ ,  
 $R_{25}$  odpor při teplotě  $25^\circ\text{C}$ ,  
 $\alpha, \beta$  koeficienty polynomu funkce.



Obr. 1.5: Průběh odporu křemíkového senzoru KTY10-5 v závislosti na teplotě

## 1.4 Monolitické PN senzory teploty

Principem polovodičových PN senzorů je teplotní závislost napětí polovodičového přechodu v propustném směru. Mohou být ve formě diody nebo tranzistoru, u kterého se využívá přechodu báze-emitor. Na obrázku 1.6 je znázorněna *AV charakteristika* přechodu pro dvě různé teploty. Při daném proudu pak odpovídá změně teploty určitá změna napětí. Tento jev souvisí s rovnicemi pro PN přechod uvedenými v (1.9) a (1.10) [1]. Takový princip snímání teploty v podstatě využívá parazitních vlastností. Je tak možno konstruovat velmi levné snímače, například pro spínání při dosažení mezní teploty. Tohoto jevu se také využívá v integrovaných senzorech popsaných dále.

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1 \right), \quad (1.9)$$

kde  $U_D$  je napětí PN přechodu v propustném směru,  
 $I_S$  saturační proud PN přechodu v závěrném směru,  
 $I_D$  saturační proud PN přechodu v propustném směru,  
 $m$  rekombinační koeficient polovodiče ( $1 \leq m \leq 2$ ),  
 $U_T$  teplotní napětí [ $J \cdot C^{-1}$ ].

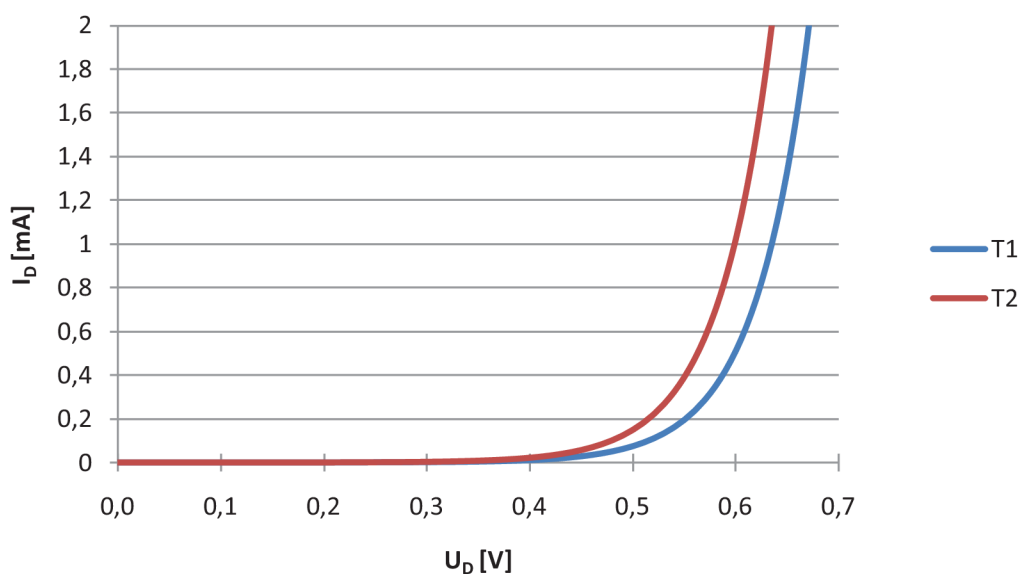
Pro napětí na PN přechodu platí vztah [1]

$$U_D = mU_T \ln \left( \frac{I_D}{I_S} + 1 \right). \quad (1.10)$$

Teplotní napětí je závislé na teplotě podle vztahu

$$U_T = \frac{kT}{e}, \quad (1.11)$$

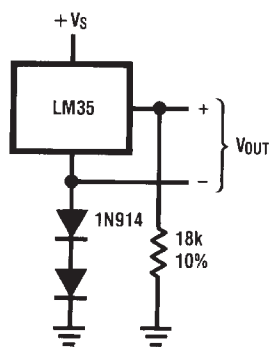
kde  $k$  je Boltzmanova konstanta  $k=1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ,  
 $T$  termodynamická teplota [K],  
 $e$  elementární náboj  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} [C]$ .



Obr. 1.6: Vliv teploty na AV charakteristiku PN přechodu  $T_1 < T_2$

### 1.4.1 LM35

Senzor s analogovým výstupem. Pracuje na principu Zenerova jevu, kdy teplotní dioda pracuje v závěrném směru a stabilizuje napětí na určitou hodnotu, která se mění lineárně s teplotou. Průběh závislosti je popsán strmostí  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Velikost napětí na senzoru odpovídá již z výroby velikosti teploty v Kelvinech podělené 100. Takže pro  $0^\circ\text{C}$  je napětí  $2,73 \text{ V}$ . Základní nepřesnost senzoru je  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  [1].



Obr. 1.7: Zapojení senzoru LM35

### 1.4.2 SMT160-30

Jedná se o integrovaný senzor vyrobený na křemíkovém substrátu s dvoustavovým výstupním signálem ve tvaru pulzní šířkové modulace. Výstupní signál je kompatibilní s tvary vstupních signálů mikrokontrolérů. Ke své činnosti nepotřebuje A/D převodník ani kalibraci. Přesto dosahuje absolutní přesnosti  $\pm 0,7^\circ\text{C}$  v rozsahu  $-30^\circ\text{C}$  až  $+100^\circ\text{C}$ . Pro připojení do obvodu nepotřebuje žádné další součástky a vystačí si s běžnými porty i těch nejlevnějších mikrokontrolérů. Tento obvod je tedy vhodný pro vícekanálová měření. Výstupní signál senzoru má pravoúhlý průběh s přesně definovanou závislostí střídavého impulsního signálu na teplotě. Tato závislost je lineární a je popsána rovnicí (1.12) [4].

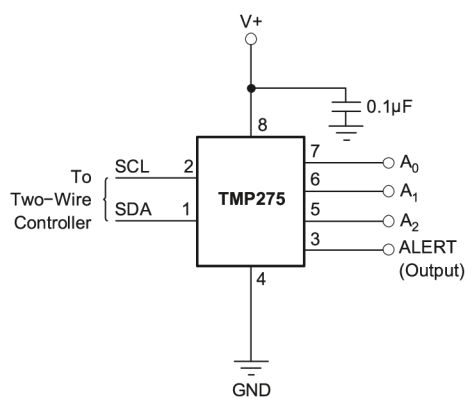
$$D.C. = 0,32 + 0,0047t, \quad (1.12)$$

kde  $D.C.$  je střída impulsního signálu,  
 $t$  teplota [ $^\circ\text{C}$ ].

### 1.4.3 TMP275

Tento senzor firmy Texas Instruments patří do skupiny tzv. *SMART senzorů*. Na čipu senzoru je integrována *programovatelná paměť* a *A/D převodník* s délkou výstupního slova 12 bitů. Ukládáním dat do paměti je možno nastavit požadované rozlišení A/D převodníku v rozsahu 9 až 12 bitů. Při největší délce slova A/D převodníku může senzor dosáhnout rozlišení teploty až  $0,0625^\circ\text{C}$ . Přesnost tohoto senzoru je však  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  v rozsahu  $-20^\circ\text{C}$  až  $+100^\circ\text{C}$ . Tento digitální teploměr využívá pro komunikaci s okolím I2C sběrnici. Každý senzor má 3 adresní vstupy, kterými nastavíme jejich adresu, na jedné I2C sběrnici lze tedy adresovat až 8 těchto senzorů. Další výhodou je režim spánku senzoru, ze kterého se probouzí na požádání řídicího zařízení. Dále obsahuje dva 16b registry pro uložení maximální a minimální

teploty. Na základě jejich hodnot pracuje jako termostat a vybavuje na svém výstupu přerušovací impuls v případě, že tyto hodnoty byly překročeny [16].



Obr. 1.8: Popis vývodů integrovaného teploměru TMP275

## 2 NÁVRH MĚŘÍCÍ ČÁSTI

Po přehledu senzorů následuje popis metod, které umožňují převést signál ze senzoru na napětí. Pro naše měření se budeme pohybovat v rozsahu teplot od 25 °C do 45 °C. Těmto teplotám musíme přizpůsobit rozsah výstupních napětí v měřící části, a to tak, aby po převodu na číslicovou hodnotu bylo rozlišení teploty větší než její požadovaná přesnost. Výsledná přesnost měření by neměla být horší než 0,2 °C.

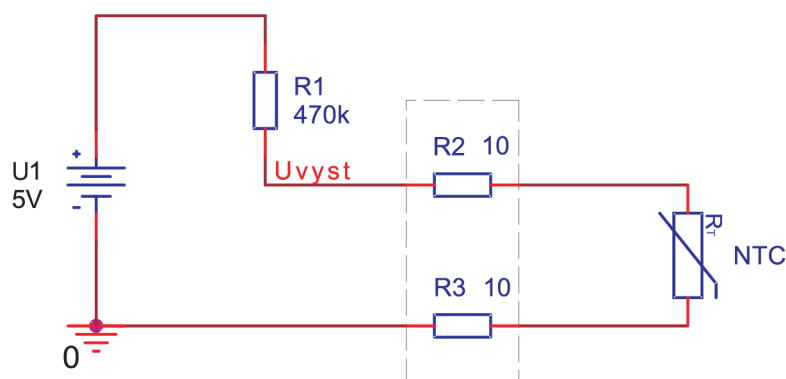
### 2.1 Převodník odporu na napětí

#### 2.1.1 Dělič napětí

Nejjednodušším způsobem, jak převést odpor na napětí, je jeho zapojení v děliči. Změna jednoho z odporů změní dělicí poměr a tím i velikost úbytku napětí na něm. Dělič napětí má nelineární průběh změny napětí při lineární změně odporu. Je tedy nutno provést korekci nebo provozovat zapojení jen v malém rozsahu změn. Pro výpočet napětí platí vztah (2.1). Toto zapojení je citlivé na parazitní jevy, jako jsou termoelektrické napětí na přívodech senzoru nebo vliv odporu vedení a jeho změny. Pro nenáročné aplikace se však jedná o nejjednodušší řešení. Ukázka zapojení je na obrázku 2.1. Schéma je doplněno o rezistory R2 a R3, které představují odpor přívodů k termistoru, jedná se o parazitní jevy a do obvodu se nepřipojují, proto jsou zde i v dalších schématech ohrazeny přerušovanou čarou.

$$U_{vyst} = U \frac{R_T(t)}{R_T(t) + R_1}, \quad (2.1)$$

kde  $U_{vyst}$  je výstupní napětí děliče,  
 $U$  napájecí napětí děliče,  
 $R_T(t)$  odpor termistoru při teplotě  $t$ .

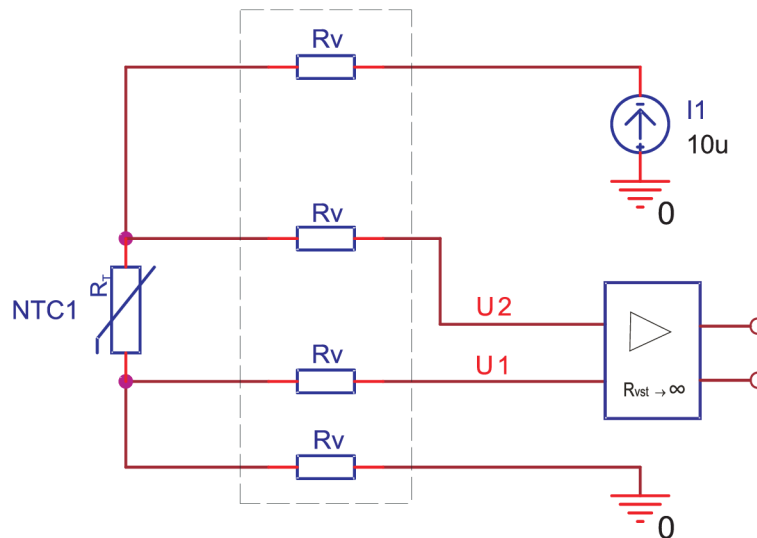


Obr. 2.1: Zapojení termistoru v děliči

## 2.1.2 Čtyřvodičové zapojení se zdrojem proudu

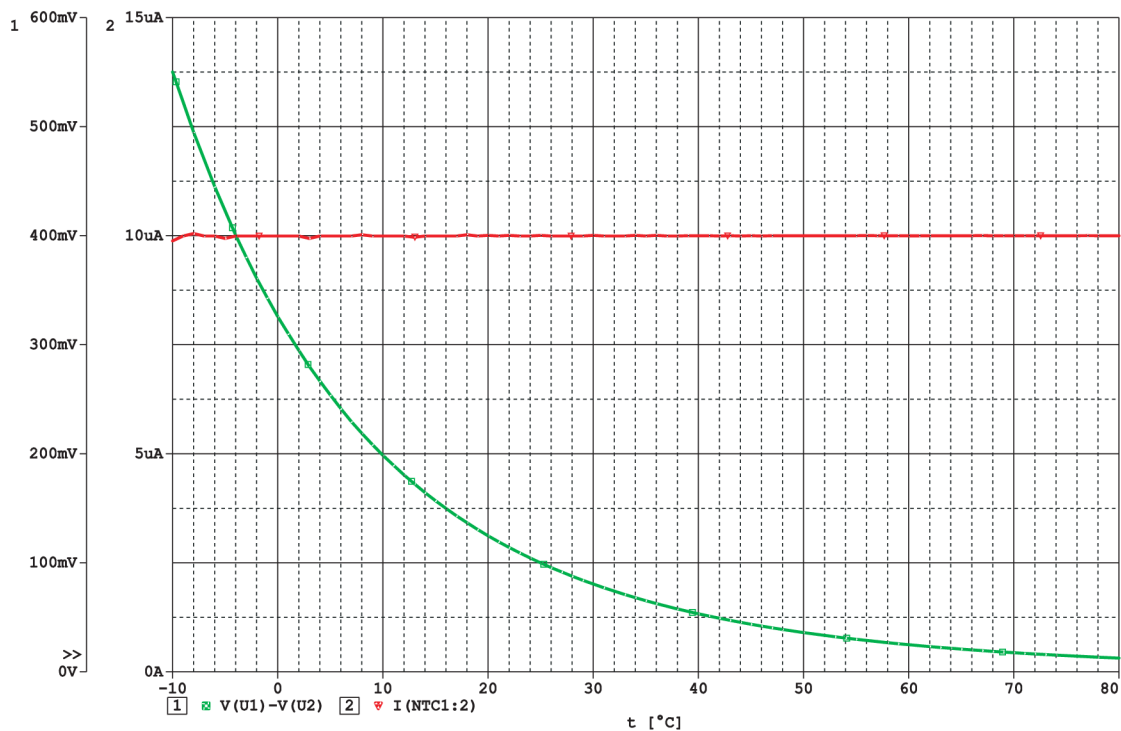
Jedná se o nejpřesnější metodu, která není závislá na hodnotách odporu vedení, a tudíž se na něm neprojeví jeho parazitní vlastnosti. Nevnáší do převodu hodnoty odporu na napětí žádné nelinearity. Pro napětí na výstupu tohoto zapojení platí Ohmův zákon (2.2). Ten však platí pouze za předpokladu nekonečně velkého vstupního odporu snímače napětí nebo zesilovače. Ukázka zapojení čtyřvodičového připojení termistoru je na obrázku 2.2. Je zřejmé, že v tomto zapojení je nutno napájet termistor zdrojem konstantního proudu. Jak je vidět ze simulace na obrázku 2.3, průběh napětí přímo odpovídá průběhu závislosti odporu termistoru na teplotě. Výstup je možno, po zesílení a A/D (analogově/digitálním) převodu, dále zpracovat v mikrokontroléru, kde se provede i linearizace průběhu. Jedná se o jednoduché a velmi funkční řešení. Mezi nevýhody však patří malá možnost manipulace s výstupním napětím. Nelze tedy upravit rozsah výstupních hodnot tak, aby se dostatečně využil rozsah A/D převodníku. Stejně tak nelze korigovat nepřesnost hodnoty odporu termistoru. Určitou metodou jak docílit posunu průběhu je zavést referenční napětí do zesilovače nebo určit pracovní rozsah referencemi v A/D převodníku. Lepší možnost manipulace s průběhem umožňuje dále popsané můstkové zapojení.

$$U = IR_T(t), \quad (2.2)$$



Obr. 2.2: Čtyřvodičové zapojení termistoru





Obr. 2.3: Simulace čtyřvodičového zapojení termistoru v programu PSpice

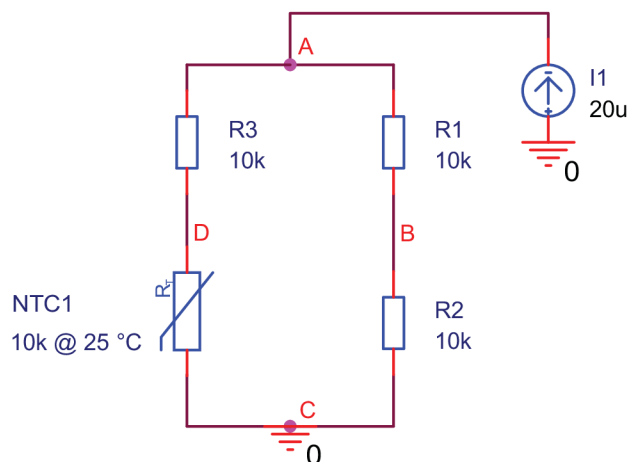
### 2.1.3 Wheatstoneův můstek

Můstkové zapojení je používaná metoda pro převod odporu na napětí. Využívají se hojně při měření neelektrických veličin pomocí odporových snímačů, a to i v případě rozdílových měření. Rozvážení můstku je snadno rozpoznatelné a metoda má dobrou citlivost. Na obrázku 2.4 je zobrazeno základní zapojení můstku s termistorem.

Pro měření lze můstek provozovat ve dvou základních režimech:

- vyvážený můstek – nulová metoda,
- nevyvážený můstek – výchylková metoda.

Vyvážený můstek slouží k přesnému měření odporů, využívá se nulového stavu můstku, kde indikátorem zapojeným mezi diagonály můstku neteče žádný proud (nebo je mezi oběma body nulové napětí). Pro spojitá měření změn odporů se jedná o nepraktickou metodu. Při provozním měření se využívá výchylková metoda měření na nevyváženém můstku. Velikost napětí v diagonále můstku je mírou měřeného odporu. Obecně pro výpočet napětí v diagonále můstku platí vztah (2.3) [6], ze kterého je zřejmé, že převod mezi změnou odporu a napětím je nelineární. Nelinearita se projevuje hlavně pro větší rozsahy změn odporu, je nutno s ní počítat a výslednou hodnotu korigovat. To se dá provést analogově rozšířením zapojení o operační zesilovač nebo programově v mikrokontroléru. Průběh závislosti napětí určíme dosazením hodnot odporů při jednotlivých teplotách do vztahu (2.3). Získáme tak



Obr. 2.4: Můstkové zapojení termistoru

průběh, jehož koeficienty jsme schopni určit a korigovat jej programově stejně jako bychom korigovali nelinearitu samotného termistoru. Ukázka vypočteného průběhu pro konkrétní termistor je na obrázku 2.5. Výhodou můstkových zapojení je možnost nastavení průchodu průběhu nulou, což odpovídá vyváženému můstku. Vyvážení můstku se provádí změnou odporu, který může být tvořen například víceotáčkovým trimrem zapojeným na pozici odporu R1 (na obrázku 2.4). Lze jim také korigovat nepřesnost hodnoty odporu snímače. Další výhodou můstkového zapojení je velká citlivost na změnu odporu. Ta je závislá na velikosti napájecího napětí a je dána poměrem odporů v můstku. Lze odvodit, že můstek má největší citlivost, když jsou všechny hodnoty odporu stejné. Přesnost měření závisí na citlivosti můstku, na přesnosti použitých rezistorů a na stálosti nulové polohy.

$$U_{DB} = U_{AC} \left( \frac{R_T(t)}{R_T(t) + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right), \quad (2.3)$$

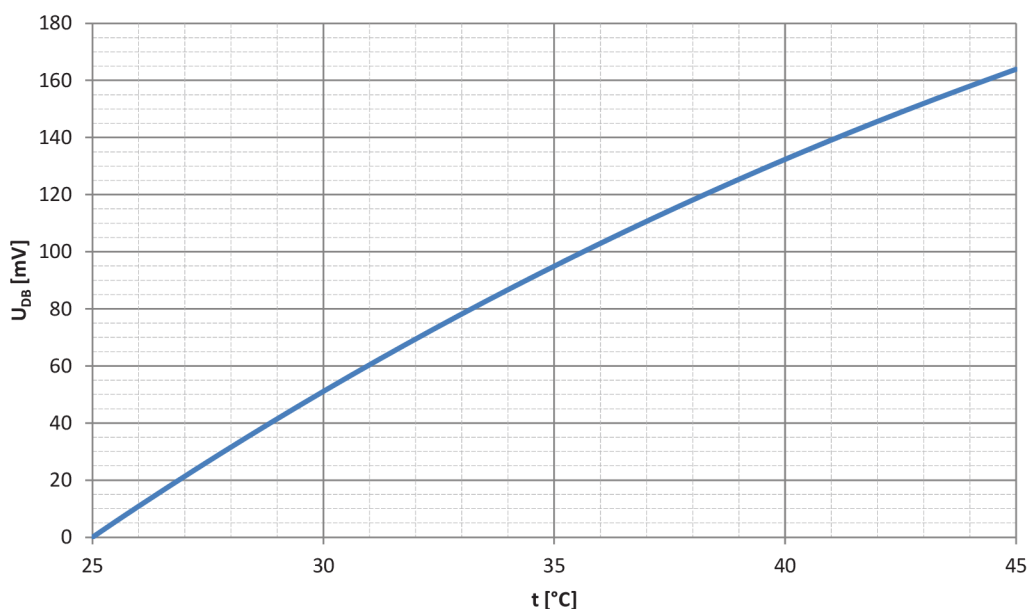
kde  $U_{DB}$  je napětí na můstku,  
 $U_{AC}$  napájecí napětí můstku,  
 $R_T(t)$  odpor termistoru při teplotě  $t$ ,  
 $R_1, R_2, R_3$  odpory můstku.

Můstková zapojení dosahují lepších parametrů, jsou-li napájena zdrojem proudu. Pro tento případ lze odvodit rovnici (2.4), která popisuje průběh napětí na výstupních svorkách můstku při změně odporu termistoru. Vztah je upraven za předpokladu rovnosti všech odporů můstku ve vyváženém stavu. Tak se docílí nejvyšší možné citlivosti. Budící proud musí být navržen s ohledem na požadavek velikosti proudu termistorem.

$$U_{BD} = -I \frac{R(R_T(t) - R)}{R_T(t) + 3R}, \quad (2.4)$$

kde  $I$  je budící proud můstku,  
 $R = R_1 = R_2 = R_3$ .

Ze vztahu (2.4) lze přímo vypočítat závislost změny hodnoty napětí na teplotě termistoru. Vypočtené hodnoty budou využity pro potřeby linearizace. Z průběhu na obrázku 2.5 je zřejmé, že v zadaném rozsahu teplot bude maximální změna napětí přibližně 168 mV. Tato hodnota odpovídá teplotě 45 °C a je důležitá pro nastavení zesílení signálu tak, aby byl maximálně využit dynamický rozsah A/D převodníku.



Obr. 2.5: Vypočtený průběh napětí na můstku s termistorem  $R_T(25) = 10 \text{ k}\Omega$

Vliv na velikost výstupního napětí můstku mají také parazitní vlastnosti vedení, přechodové odpory a termoelektrické napětí, které může vzniknout na přívodech. Proto se konstruují vícevodičové nebo aktivní můstky, které se snaží tyto vlastnosti eliminovat. Podle počtu vodičů spojujících senzor s můstkem se setkáváme se zapojením:

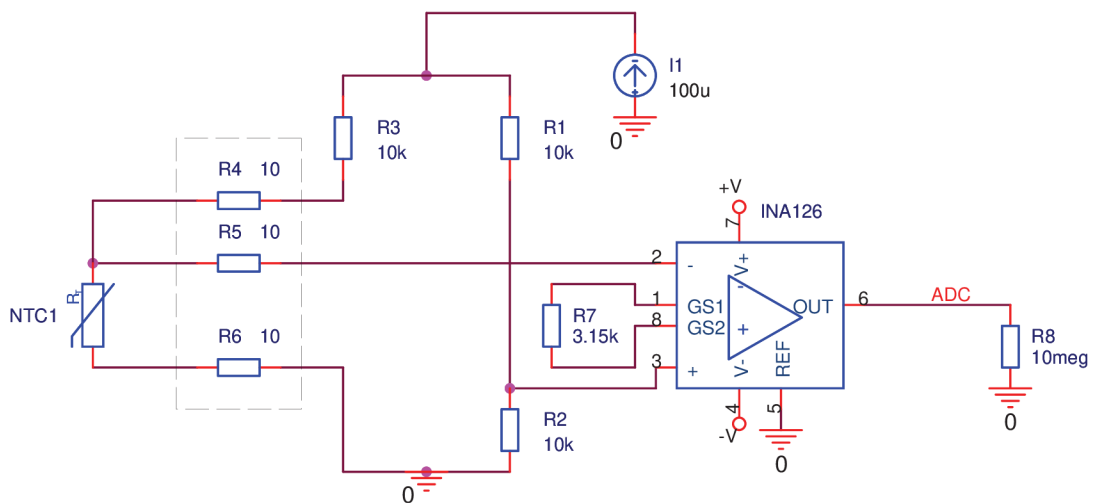
- dvouvodičovým,
- třívodičovým,
- třívodičovým zapojením aktivního můstku,
- zapojením s volnou smyčkou,
- čtyřvodičovým zapojením.

## 2.2 Přizpůsobovací obvod

Po převodu odporu termistoru na hodnotu napětí je potřeba upravit jeho rozsah tak, aby odpovídal požadovanému dynamickému rozsahu A/D převodníku. Z průběhu na obrázku 2.5 je zřejmé, že hodnota napětí se pohybuje v rozmezí 0 mV až 168 mV. Tuto hodnotu je dále potřeba přesně zesílit, a to tak, aby výstupní napětí odpovídalo rozsahu vstupních hodnot A/D převodníku. Typicky je rozsah A/D převodníku 0 V až 5 V. Proto je potřeba zesílit hodnotu 168 mV na 5 V, což odpovídá zesílení

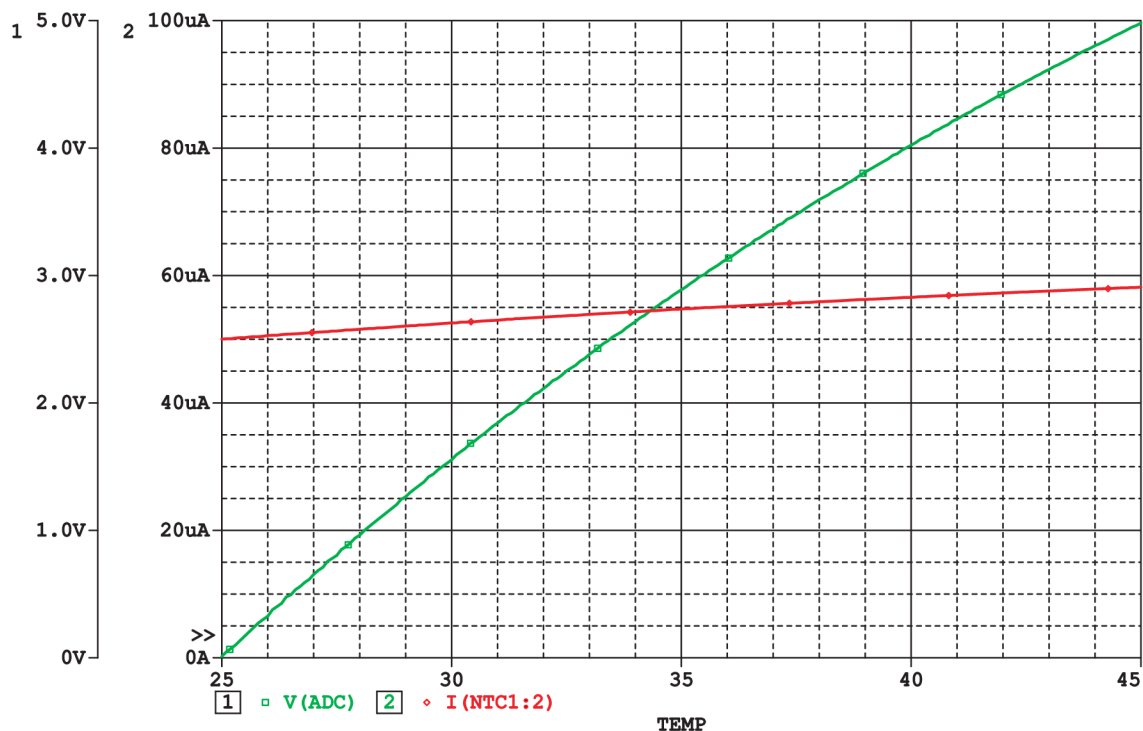
$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{5}{0,168} = 29,76.$$

Pro zesílení napětí můstku se využije nejlépe operační zesilovač zapojený jako rozdílový. Je možno využít běžných operačních zesilovačů nebo přístrojový zesilovač, např. zesilovač firmy Texas Instruments INA126 [10], který umožňuje nastavení zesílení rozdílového signálu jedním připojeným rezistorem. Toto je velmi výhodné a usnadní to budoucí nastavování rozsahu měřícího systému. Návrh zapojení měřící části je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Návrh zapojení měřící části

Měřící část jednoho kanálu je tvořena termistorem připojeným třemi vodiči do měřícího můstku. Výstupní napětí je přivedeno na rozdílové vstupy přístrojového zesilovače a pomocí rezistoru R7 je nastaveno zesílení. Pro potřeby simulace je zvolena hodnota 3,15 k $\Omega$  což odpovídá dle vztahu (2.5) zesílení 30,39. V reálném případě se pak toto zesílení nastaví přesně podle potřeby odporovým trimrem zapojeným do série s rezistorem, tak aby se dosáhlo dostatečně jemného nastavení zesílení. Pro zesílení zesilovače INA126 platí vztah (2.5) udávaný výrobcem [10]. Tento přístrojový zesilovač se vyrábí i v duálním provedení pod označením INA2126, to znamená,



Obr. 2.7: Simulace měřicí části v programu PSpice

že v jednom pouzdře jsou dva zesilovače. To je vhodné pro náš případ, kdy potřebujeme měřit teplotu ve dvou kanálech.

$$A = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_A}. \quad (2.5)$$

Pro výše vypočtené zesílení 29,76 je nutno připojit k zesilovači odpor velikosti

$$R_A = \frac{80000}{A-5} = \frac{80000}{24,76} = 3,2 \text{ k}\Omega.$$

Vhodným řešením pro nastavení zesílení je sériové zapojení rezistoru 2,7 k $\Omega$  a víceotáčkového trimru se jmenovitou hodnotou 1 k $\Omega$ . Tímto spojením dosáhneme mezních hodnot odporů 2,7 k $\Omega$  až 3,7 k $\Omega$ . Tyto hodnoty reprezentují zesílení

$$A_1 = 5 + \frac{80000}{2700} = 34,6,$$

$$A_2 = 5 + \frac{80000}{3700} = 26,62.$$

Tato zesílení dále odpovídají při teplotě 45 °C napětím na výstupu zesilovače

$$U_{ADC1} = 0,168 \cdot 34,6 = 5,81 \text{ V},$$

$$U_{ADC2} = 0,168 \cdot 26,62 = 4,95 \text{ V}.$$

Na obrázku 2.7 je zobrazena simulace měřicí části podle schématu 2.6. Simulace byla provedena pro termistor se jmenovitou hodnotou odporu  $10\text{ k}\Omega$  při  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Z průběhu je zřejmé, že napětí prochází nulou právě při  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , což odpovídá vyváženému stavu můstku. Při zvyšování teploty se snižuje odpor termistoru a tím se můstek rozvažuje. Velikost napětí na jeho diagonále je úměrné změně hodnoty odporu. Pozici bodu vyvážení jsme schopni změnit změnou hodnoty rezistoru  $R_1$ , který bude tvořen, obdobně jako v případě nastavování zesílení, sériovou kombinací víceotáčkového trimru a pevného rezistoru.

## 2.3 Požadavky na A/D převodník

Napětí na vstupu A/D převodníku se mění s teplotou, a to v ideálním případě, v rozsahu  $0\text{ V}$  až  $5\text{ V}$ . Tyto hodnoty napětí odpovídají mezním hodnotám teplot  $45\text{ }^\circ\text{C}$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Pro převod napětí na číslicovou hodnotu, srozumitelnou pro mikrokontrolér, potřebujeme mít dostatečnou rozlišovací schopnost A/D převodníku, která musí být větší, než je požadovaná přesnost měření. Vybraný senzor pro měření teploty má vlastní chybu měření  $0,2\text{ }^\circ\text{C}$  [9], proto požadujeme rozlišení A/D převodníku větší než je tato teplota. Základní vztahy pro výpočet parametrů A/D převodníku jsou

$$N = 2^n - 1, \quad (2.6)$$

kde  $N$  je počet kvantovacích kroků A/D převodníku,  
 $n$  počet bitů datového slova A/D převodníku.

$$q = \frac{F}{N}, \quad (2.7)$$

kde  $q$  je velikost kvantizačního kroku,  
 $F$  napěťový rozsah A/D převodníku.

Výpočet rozlišovací schopnosti 10bitového A/D převodníku dle vztahů (2.6) a (2.7)

$$N = 2^{10} - 1 = 1023,$$

$$q = \frac{5}{1023} = 4,89 \cdot 10^{-3} = 4,89\text{ mV}.$$

A/D převodník je schopen rozeznat změnu napětí na svém vstupu o velikosti  $4,89\text{ mV}$  (pro rozsah  $0\text{ V}$  až  $5\text{ V}$ ).

Při výpočtu rozlišení teploty postup zjednodušíme, když budeme považovat rozsah napětí maximálně využitý a průběh lineární. Rozsah 25 °C až 45 °C bude rozdělen na 1023 hodnot, platí tedy:

$$\Delta t = \frac{20}{1023} = 0,02 \text{ °C.}$$

Rozlišení A/D převodníku je tedy mnohem větší, než je požadovaná přesnost měření. Jedná se však o přibližnou hodnotu, skutečné rozlišení je závislé na strmosti převodní charakteristiky, která se vlivem nelinearity mění. V místě s větší strmostí bude větší rozlišení a naopak. Po A/D převodu získáme hodnotu, která odpovídá napětí na vstupu převodníku, při správném nastavení a kalibraci systému platí pro určení teploty vztahy (1.6) a (1.7) a lze z nich popsat závislost napětí na teplotě obdobně jako na obrázku 2.5.

### 2.3.1 Výběr mikrokontroléru

Mikrokontroléry jsou v dnešní době nepostradatelnou součástí většiny zařízení v mnoha odvětvích elektrotechniky. Díky masivnímu používání a univerzálnosti těchto obvodů se jedná o dnes již velmi levné řešení. Trh s mikrokontroléry nabízí obvody, od velmi jednoduchých až po komplexní součástky se spoustou různých podpůrných periférií, jako jsou radiče, převodníky, programovatelná logická pole a komunikační porty (USB, USART, I2C, . . .). Dále se mikrokontroléry odlišují velikostí datového slova, se kterým pracují. Pro navrhované zařízení postačuje 8bitový obvod. Pro naše navrhované zařízení jsou důležité tyto parametry:

- A/D převodník s délkou slova alespoň 10 bitů,
- dostatečně velká vnitřní paměť programu,
- výstup PWM,
- dostatek vstupně/výstupních portů,
- programovatelnost bez vyjmutí z obvodu (např. SPI).

Mezi nejznámější výrobce mikrokontrolérů patří firmy Motorola, Atmel, Microchip. Na základě praktické zkušenosti s mikrokontroléry firmy Atmel rodiny ATmega, je zvolen obvod ATmega644, který splňuje všechny uvedené požadavky.

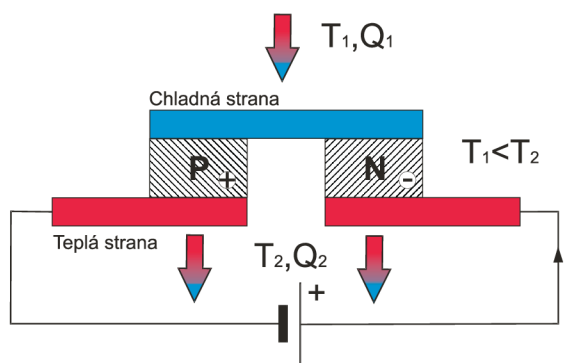
### 3 NÁVRH TERMOSTATU

V experimentu na Langendorffově aparátu je potřeba nejprve temperovat fyziologický roztok na požadovanou teplotu. Činností srdce v Langendorffově aparátu a působením vnějších vlivů může docházet k dalšímu ohřívání, což je však nežádoucí. Proto je nutno provádět chlazení. Z těchto požadavků tedy plyne potřeba termostatu s kompenzací teploty oběma směry, jak ohřívání, tak i chlazení. Nejvhodnějšími způsoby jak odvádět přebytečné teplo jsou:

- dolévání chladnější kapaliny,
- použití kompresorového chladícího systému,
- využití Peltierovy termobaterie, která umožňuje i ohřev.

#### 3.1 Peltierův článek

- Seebeckův efekt – jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu  $T_1$  a  $T_2$ , protéká obvodem elektrický proud.
- Peltierův efekt – protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje Seebeckovým obvodem, pak vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji. Teče-li proud z vnějšího zdroje daným spojem stejným směrem, jaký má proud při ohřátí tohoto spoje v Seebeckově jevu, pak se daný spoj ochlazuje. Prochází-li proud směrem opačným, pak se spoj ohřívá. Peltierův efekt závisí na druhu kovů a na jejich teplotě [11].



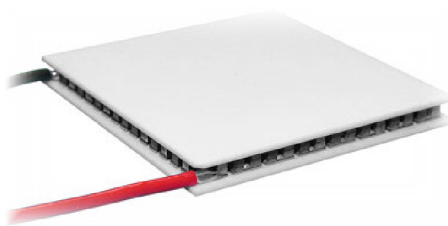
Obr. 3.1: Základní element Peltierovy termobaterie

Peltierův článek je složen ze dvou polovodičových tělísek a spojovacího měděného můstku. Spojovací můstek zprostředkovává přívod elektrické energie nutné k napájení a absorbuje vyzářené teplo [11]. Základní princip je zobrazen na obrázku 3.1, kde  $Q_1$  je teplo absorbované a  $Q_2$  vyzářené. Jednotlivé Peltierovy články se obvykle zapojují do série ve větší celky, tzv. chladící termobaterie a ty lze dále, k dosažení



větších teplotních rozdílů, spojovat do kaskády. Ukázka vzhledu termobaterie je na obrázku 3.2.

Základními polovodičovými materiály pro výrobu Peltierova článku jsou převážně vizmut-teluridy. Bi-Te-Se tvoří polovodič s nevlastní vodivostí typu N a Bi-Sb-Te typu P. Tyto materiály mají výhodné termoelektrické vlastnosti, nízký měrný elektrický odpor a malou tepelnou vodivost. Spojovací můstky jsou zhotoveny většinou z mědi (malý měrný elektrický odpor, možnost pájení) [11]. Kontaktní plochy termobaterie jsou z keramiky, která má dobrou tepelnou vodivost a elektricky izoluje vlastní články.



Obr. 3.2: Ukázka Peltierovy termobaterie

Peltierovy termobaterie lze využít jako:

- Termoelektrické chlazení – jeho předností je soustředění chladicího účinku na velmi malou plochu. Zařízení je spolehlivé a teplota se dá snadno regulovat změnou velikosti napájecího proudu. Nedosahují však takových tepelných parametrů jako kompresorové systémy.
- Termoelektrické topení – výhoda spočívá v tom, že baterie mají plochý tvar, takže ohřev dané plochy je rovnoměrný.
- Výroba elektrického proudu – Peltierův článek pracuje i inverzně, avšak pro výrobu elektrické energie není příliš vhodný.

Na rozdíl od jiných způsobů chlazení, umožňují Peltierovy články velmi přesně regulovat teplotu, ve speciálních případech s přesností  $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$  [12]. Přesná regulace je podmíněna správným návrhem regulátoru a celého termoelektrického systému. Změna směru proudu má za následek přenos tepla opačným směrem. Této skutečnosti lze využít při konstrukci přesných teplotních stabilizátorů pro tepelně citlivá elektronická zařízení, lasery, fotodetektory, krystalové oscilátory atd. [12].

Peltierovy články jsou charakterizovány těmito výkonovými parametry:

- $\Delta T_{\text{max}}$  – maximální rozdíl mezi teplou a studenou stranou,
- $Q_{\text{max}}$  – chladicí výkon při nulovém teplotním rozdílu mezi teplou a studenou stranou,
- $I_{\text{max}}$  – maximální proud při maximálním teplotním rozdílu mezi teplou a studenou stranou,

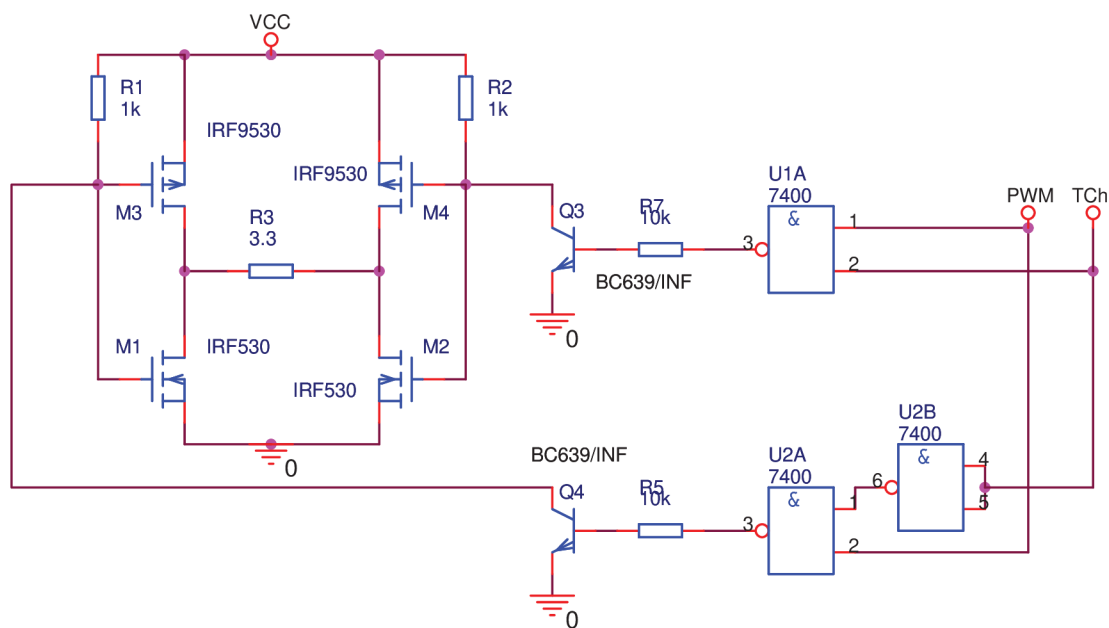
- $U_{\max}$  – maximální napětí při průchodu maximálního proudu a nulovém chladičím výkonu.

Tab. 3.1: Parametry vybrané Peltierovy termobaterie

Typ	$I_{\max}$ [A]	$Q_{\max}$ [W]	$U_{\max}$ [V]	$\Delta T_{\max}$ [°C]	Rozměr A×B×H [mm]
M-TEC1-12705HT	4,6	46,2	15,4	68	40 × 40 × 4

## 3.2 Napájení Peltierovy termobaterie

Peltierovy články lze napájet proudem generovaným pulzně šířkovou modulací. Díky tomu lze regulovat výkon článku. Vlastní regulace výkonu bude obstarána mikrokontrolérem. Ten na svém výstupu určí, zda se má na aktivní straně topit nebo chladit a na druhém výstupu bude vhodnou střídou pulzní šířkové modulace určena střední hodnota proudu, s jakým má termobaterie pracovat. Pro převedení této informace je nutno zapojit na výstup mikrokontroléru obvod, který dokáže spínat dostatečně velké proudy pro buzení Peltierovy termobaterie. To lze provést více způsoby. Nejčastěji se využívá můstkového zapojení, tzv. H-můstek, jehož schéma je uvedeno na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Zapojení H-můstku pro spínání Peltierovy termobaterie

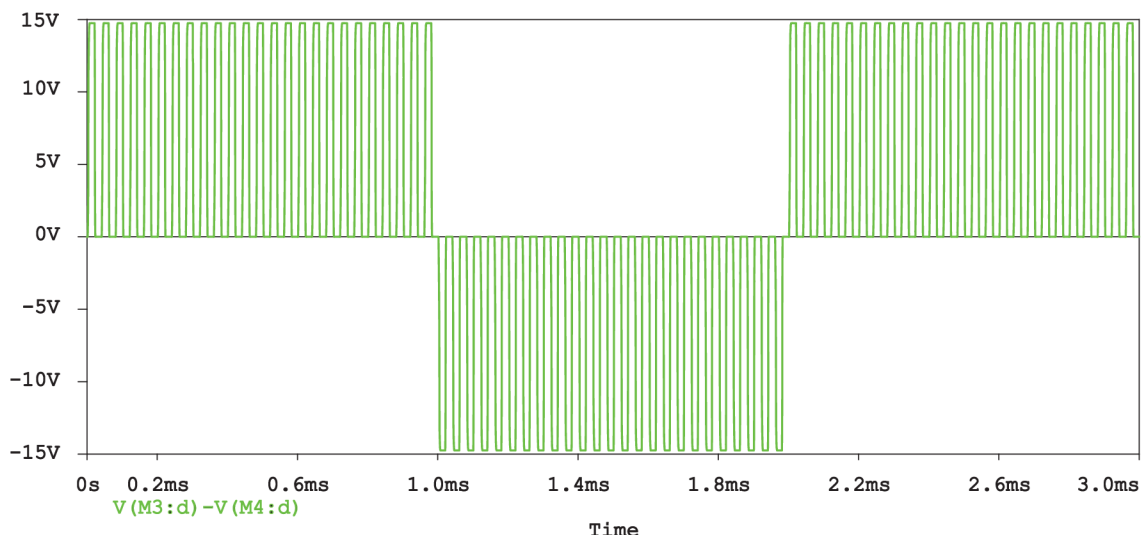
Můstek pro spínání Peltierovy termobaterie je tvořen čtyřmi výkonovými unipolárními tranzistory, které jsou po dvojicích komplementární (dva s kanálem N a dva s kanálem P). Připojením hradel tranzistorů pravé strany k zemi (log. 0) a levé strany k napájení (log. 1) vytvoříme situaci, kdy proud protéká otevřeným tranzistorem M4, dle obrázku 3.3, přes Peltierovu termobaterii na zem tranzistorem M1. Tranzistory M3 a M2 zůstávají zavřeny. Zaměníme-li situaci stran, bude proud protékat tranzistory M3 a M2 a Peltierova termobaterie bude mít teplou a chladnou stranu prohozenou oproti předchozí situaci.

Abychom byli schopni spínat napětí 15 V logikou TTL, jsou zde použity dva bipolární tranzistory. Hradla NAND poté tvoří logickou funkci, kdy úrovní na vstupu T<sub>ch</sub> měníme směr proudu a signálem na vstupu PWM měníme příkon dodávaný termobaterii. Odporů R1 a R2 udávají spolu s kapacitami hradel tranzistorů časovou konstantu, kterou se vybíjí nebo nabíjí kapacita při změně stavu můstku. Toto je velmi důležité, neboť čím delší je časová konstanta, tím déle se mění stav tranzistorů. Tyto přechodové stavy způsobují, že přes tranzistory teče proud na zem a vznikají tak na nich velké ztráty. Okamžik změny stavu tranzistorů musí být tedy co nejkratší, proto volíme odpory menší než je běžné třeba u bipolárních tranzistorů, kde je kapacita přechodu báze-emitor menší v porovnání s unipolární technologií. Další výkonové ztráty vznikají při samotném protékání proudu tranzistorem. Přestože se tranzistor nachází jen ve dvou saturovaných stavech, dochází na přechodu D-S k malému úbytku napětí, který je u unipolární technologie úměrný proudu. Přesto jsou ztráty nižší než u bipolární technologie, proto se pro spínání větších výkonů využívá právě těchto tranzistorů. Ztrátový výkon se mění na teplo, které je nutno odvést do chladiče, ke kterému jsou jednotlivé tranzistory připevněny přes silikonovou podložku.

Jednoduchá simulace funkce obvodu je zobrazena na obrázku 3.4. Při praktické realizaci bude spínací frekvence můstku menší, než je použito v této simulaci. Jde jen o názornou ukázkou funkce zapojení. Z průběhu je zřejmé, že v první třetině dochází k topení popřípadě ochlazování aktivní strany termobaterie příkonem 50 %, což odpovídá střídě 1:1. Ve druhé třetině je situace na aktivní straně opačná než v předchozím případě. Je zde znázorněna regulace výkonu, tak i záměna chladné a teplé strany termobaterie.

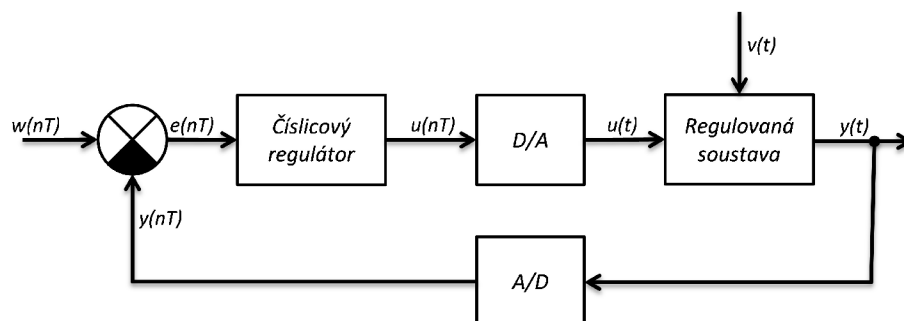
### 3.3 Regulátor teploty

Úkolem regulátoru je reagovat na změny teploty a kompenzovat jejich vliv. Změny mohou mít různý charakter, mohou být náhlé nebo pozvolné, regulátor musí proto jednat přiměřeně na danou změnu regulované veličiny. Nejjednodušším způsobem



Obr. 3.4: Simulace H-můstku v programu PSpice

je manuální režim, kdy si uživatel na základě pozorování nastaví takovou velikost a charakter výkonu akčního členu, že se kompenzují vnější vlivy, například chladnutí vlivem výměny energie s okolním prostředím. Toto lze reálně provádět u soustav s velmi velkou setrvačností. Výhodnější je použít automatický regulátor. Blokové schéma regulačního řetězce s číslicovým regulátorem je na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Blokové schéma regulačního řetězce

### 3.3.1 Třístavový regulátor

Další způsob regulace již automatické, je dvoustavová nebo víceustavová regulace. U dvoustavové regulace akční člen dodává 100 % energie soustavě a v okamžiku, kdy dojde k dosažení požadované hodnoty, se výkon sníží skokem na 0 %. Při poklesu pod požadovanou úroveň se opět sepne a takto neustále osciluje hodnota regulované veličiny kolem požadované hodnoty. Abychom zabránili rychlým oscilacím, je do funkce regulátoru přidáno pásmo necitlivosti neboli hystereze. Její hodnota

vyžaduje, aby teplota překročila nebo poklesla pod požadovanou hodnotu o určité velikosti, než se výstup vypne nebo zapne. Ukázka průběhu dvoustavové regulace je na obrázku 3.6.

V navrhované aplikaci by se spíše než o dvoustavovou regulaci, jednalo o regulaci třístavovou, kdy jeden stav je chlazení, druhý ohřívání a kolem požadované teploty jsou pak vytvořeny tolerance ve kterých se nachází třetí stav vypnuto. Tento způsob regulace je popsán předpisem 3.1. Výhodou třístavové regulace je to, že pro její činnost stačí nastavit požadovanou teplotu a termostat bude pracovat pro danou soustavu, aniž bychom znali její parametry. Hlavní nevýhodou stavových regulátorů jsou jejich skokové změny, oscilace výkonu akční veličiny a také malá přesnost. Hodnota regulované veličiny se bude cyklicky pohybovat kolem své střední hodnoty, kterou jsme nastavili. Logicky nejlepší řešení je tehdy, když termostat automaticky nastaví výkon akčního členu takový, aby kompenzoval vlivy působící na regulovanou veličinu a sledoval zároveň jejich změny a přizpůsoboval by tomu velikost výkonu. Na takovém principu pracují například spojitě PID regulátory nebo jejich diskrétní ekvivalent označovaný jako PSD, popsané dále.

$$u(nT) = \begin{cases} P_{max+} & \text{pro } y(nT) < w(nT) - \delta, \\ 0 & \text{pro } w(nT) + \delta > y(nT) > w(nT) - \delta, \\ P_{max-} & \text{pro } y(nT) > w(nT) + \delta. \end{cases} \quad (3.1)$$

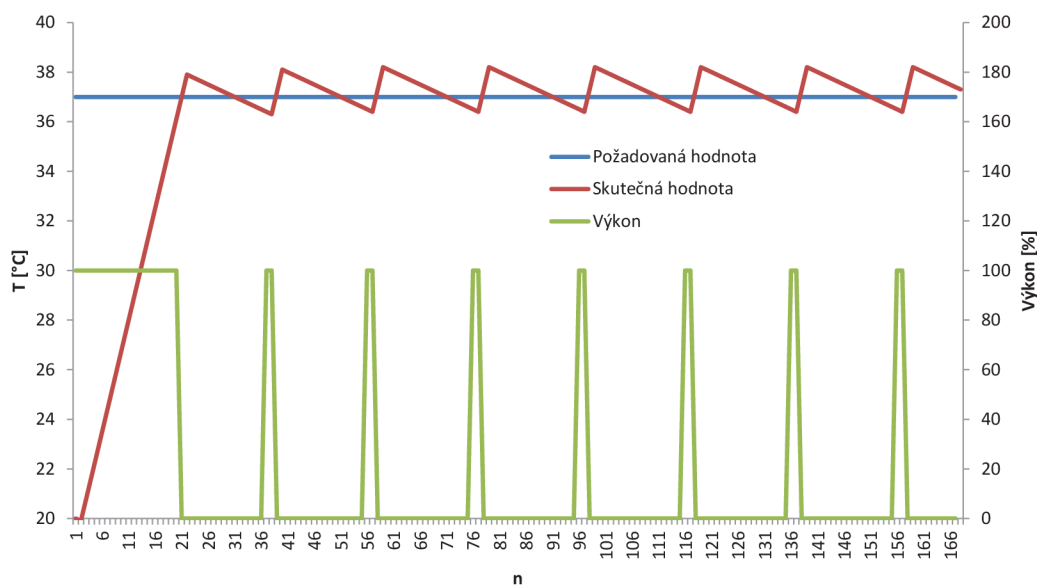
kde  $P_{max+}$  je maximální kladný výkon akčního členu,  
 $P_{max-}$  maximální záporný výkon akčního členu.

### 3.3.2 Proporcionální regulace

Odstraňuje cyklické spínání a rozpínání při třístavové regulaci. Proporcionální regulátor zmenšuje průměrnou napájecí energii do akčního členu podle toho, jak se teplota přibližuje k nastavené žádané hodnotě. Akční zásah regulátoru úměrný regulační odchylce je dán vztahem 3.3. Ve vztazích je uvažována diskrétní realizace regulátoru. To znamená, že vypočtená hodnota regulační odchylky dle vztahu 3.2 je udána pro  $n$ -tý krok v diskrétní soustavě se vzorkovací periodou  $T$ .

$$e(nT) = w(nT) - y(nT), \quad (3.2)$$

kde  $e(nT)$  je regulační odchylka,  
 $w(nT)$  požadovaná hodnota výstupu regulované soustavy,  
 $y(nT)$  skutečná (změřená) hodnota výstupu regulované soustavy.

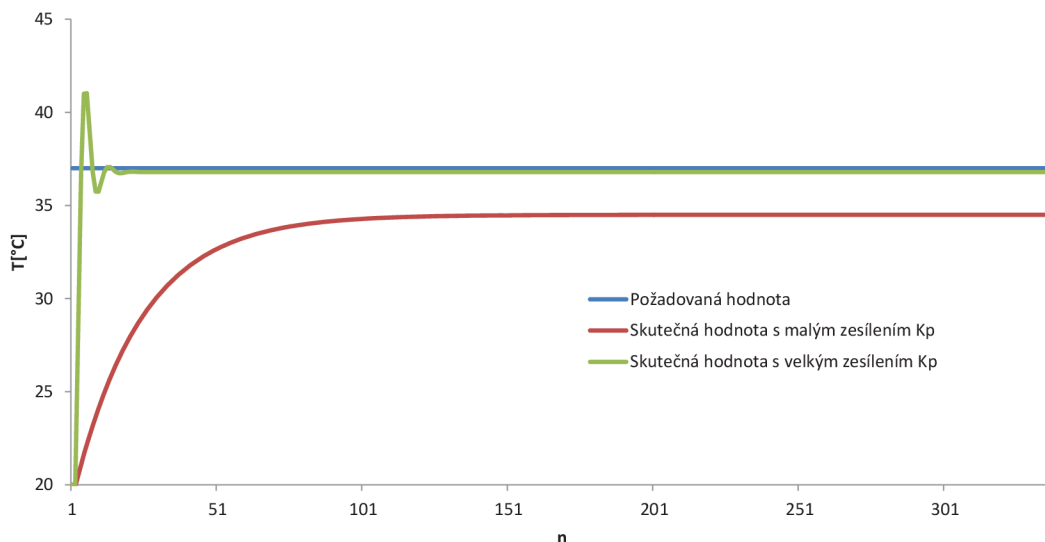


Obr. 3.6: Ukázka průběhu dvoustavové regulace na modelu

$$u(nT) = K_P \cdot e(nT), \quad (3.3)$$

kde  $u(nT)$  je hodnota akční veličiny,  
 $K_P$  zesílení proporcionální složky regulátoru.

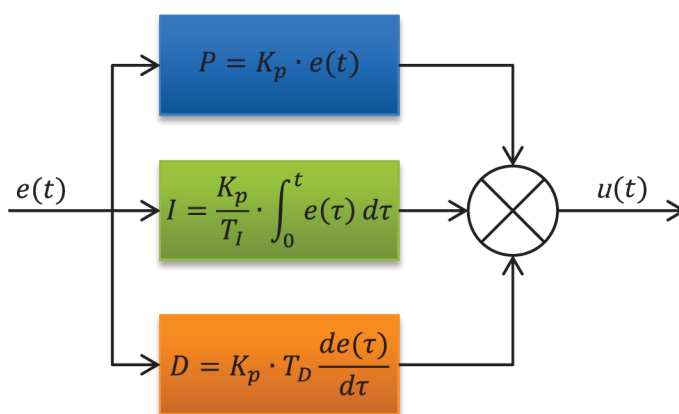
Použití samotného proporcionálního regulátoru se soustavami, u nichž regulovaná veličina reaguje na akční zásah konstantní velikosti ustálením na nové hodnotě, vede ke vzniku trvalé regulační odchylky, která je patrná z obrázku 3.7. Zvětšováním zesílení proporcionální složky  $K_p$ , lze trvalou regulační odchylku zmenšit. Vzniká však nebezpečí, že dojde k nestabilitě regulačního obvodu, důsledkem toho je kmitavý nebo nekmitavý nárůst regulované veličiny až k dorazu nebo poškození zařízení. Pro odstranění regulační odchylky se do činnosti regulátorů obvykle přidává integrační složka.



Obr. 3.7: Ukázka průběhu proporcionální regulace na modelu

### 3.3.3 PID a PSD regulace

Proporcionální regulaci lze použít samostatně, avšak abychom odstranili trvalou regulační odchylku a zlepšili parametry termostatu, využijeme dalších dvou vlastností a to integrační a derivační složky regulátoru. Kombinacemi jednotlivých vlastností můžeme získat regulátory typu PI, PD, PID. Na obrázku 3.8 je zobrazena struktura paralelního PID regulátoru [19].



Obr. 3.8: Struktura paralelního PID regulátoru

- Proporcionální složka P je základem proporcionálního regulátoru, který je popsán výše. Je dána zesílením  $K_P$  a regulační odchylkou.

- Integrační složka I reaguje na pomalé změny a odstraňuje trvalou regulační odchylku. Je úměrná časovému integrálu regulační odchylky. Jejím parametrem je integrační konstanta  $T_I$ .
- Derivační složka D reaguje na rychlé změny regulační odchylky, využívá se k tlumení zákmitů a potlačení rychlých změn. Parametrem derivační složky je derivační konstanta  $T_D$  [19].

Akční veličina spojitého PID regulátoru je dána vztahem vyplývajícím z obrázku 3.8. Pro snadnější odvození diskrétního ekvivalentu zavedeme konstanty  $K_I$  a  $K_D$ , jedná se o zesílení integrační a derivační složky a jsou dány vztahy 3.4

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} \quad ; \quad K_D = K_P \cdot T_D. \quad (3.4)$$

Výsledný vztah pro PID regulátor bude mít tvar

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.5)$$

Diskretizací vztahu provedeme aproximaci integrálu sumací pomocí obdélníkové metody 3.6. Derivaci aproximujeme zpětnou diferencí 3.7 [17]

$$\int_0^t e(t) dt \rightarrow T \sum_{i=0}^n e(iT), \quad (3.6)$$

kde  $T$  vzorkovací perioda

$$\frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{e(nT) - e[(n-1)T]}{T}. \quad (3.7)$$

Provedenou diskretizací získáme polohový algoritmus číslicového regulátoru. Jelikož je integrál nahrazen sumací a derivace diferencí, nazýváme tyto regulátory proporcionálně sumačně diferenční (PSD). Polohový algoritmus 3.8 se kvůli sumaci příliš často nepoužívá. Častěji proto využíváme tzv. přírůstkový tvar algoritmu PSD regulátoru. Zde se neurčuje hodnota akční veličiny  $u(nT)$  v daném okamžiku, ale pouze její změna, čili přírůstek oproti hodnotě  $u[(n-1)T]$  akční veličiny v předcházejícím kroku [17].

$$u(nT) = K_P \cdot e(nT) + K_S \cdot T \sum_{i=0}^n e(iT) + \frac{K_D}{T} [e(nT) - e[(n-1)T]]. \quad (3.8)$$

Přírůstkový tvar získáme odečtením akčního zásahu v předchozím kroku 3.9 od velikosti akčního zásahu v současném kroku 3.8 [17]

$$u[(n-1)T] = K_P \cdot e[(n-1)T] + K_S \cdot T \sum_{i=0}^{n-1} e(iT) + \frac{K_D}{T} [e[(n-1)T] - e[(n-2)T]]. \quad (3.9)$$



Přírůstek  $\nabla u(nT)$  vypočítáme pomocí následujícího vztahu

$$\begin{aligned} \nabla u(nT) = & K_P \cdot [e(nT) - e[(n-1)T]] + K_S \cdot T \cdot e(nT) + \\ & + \frac{K_D}{T} \cdot [e(nT) - 2e[(n-1)T] + e[(n-2)T]]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Ve vztahu 3.10 se již nevyskytuje sumace při které bylo nutno si pamatovat všechny předchozí hodnoty regulační odchylky. Pro získání výsledného algoritmu nyní přičteme vztah 3.10 k předchozí hodnotě akčního zásahu a tím získáme velikost současného akčního zásahu. Dále nahradíme regulační odchylky vztahem 3.2 a upravíme.

$$\begin{aligned} u(nT) = & u[(n-1)T] - K_P \cdot [y(nT) - y[(n-1)T]] + K_S \cdot T \cdot e(nT) - \\ & - \frac{K_D}{T} \cdot [y(nT) - 2y[(n-1)T] + y[(n-2)T]]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Vztah 3.11 představuje výsledný algoritmus navrhovaného PSD regulátoru a je implementován do programu mikrokontroléru. Vhodným nastavením konstant  $K_P$ ,  $K_S$  a  $K_D$  ladíme funkci termostatu pro danou aplikaci. Jelikož je velikost akčního zásahu omezena maximálním a minimálním výkonem dodávaným do Peltierovy termobaterie, je nutno ještě omezit hodnoty  $u(nT)$  limitací hodnot akčního zásahu.

$$u(nT) = \begin{cases} P_{max} & \text{pro } u(nT) > P_{max}, \\ u(nT) & \text{pro } P_{min} < u(nT) < P_{max}, \\ P_{min} & \text{pro } u(nT) < P_{min}. \end{cases} \quad (3.12)$$

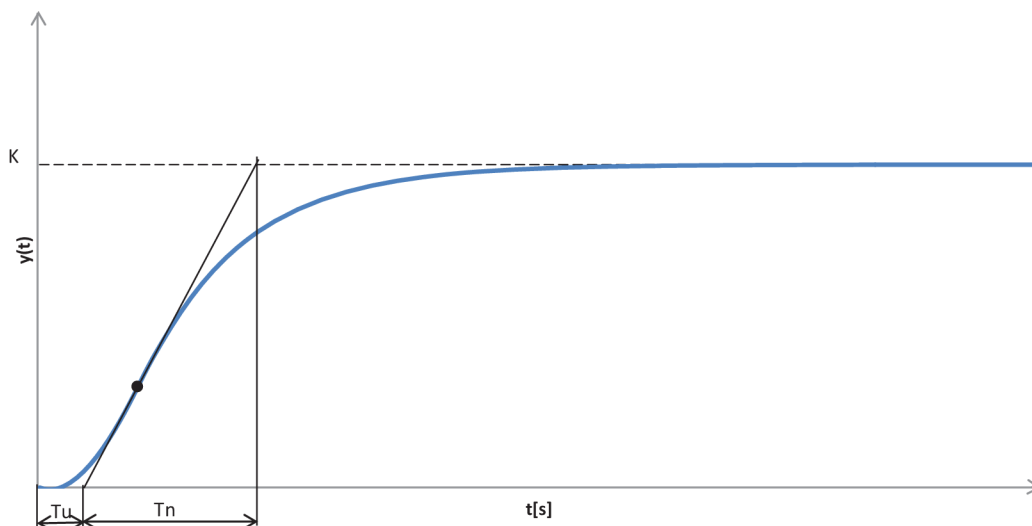
### 3.4 Nastavení regulátoru

V mikrokontroléru jsou implementovány algoritmy pro třístavovou a PSD regulaci. Třístavová regulace potřebuje ke své činnosti pouze požadovanou teplotu a její funkce nezávisí na parametrech soustavy, výsledky této regulace však na parametrech soustavy závisí. Pro zvětšení přesnosti využijeme PSD regulátoru. Chceme-li využít jen proporcionální složku nebo popřípadě regulátor PI, vyřadíme ostatní složky nastavením hodnoty příslušné konstanty na nulu. Jelikož naším cílem bude regulovat soustavu s neznámými parametry, bude nastavování konstant popsáno pro experimentální metody, kdy určitým postupem provedeme měření, na jehož základu dopočítáme potřebné konstanty. K nastavení regulátoru, lze využít optimalizačních metod mezi které patří tyto nejpoužívanější:

- Zieglerova-Nicholsonova metoda přechodové charakteristiky,
- Zieglerova-Nicholsonova metoda kritických parametrů,
- metoda inverzní dynamiky,
- metodou pokusů a omylů.

### 3.4.1 Metoda přechodové charakteristiky

Tato metoda spočívá ve znalosti průběhu přechodové charakteristiky proporcionální regulované soustavy. Její použití je možné, má-li charakteristika průběh ve tvaru písmene S a nemá kmitavý průběh. U této metody určujeme parametry regulátoru z hodnot časových konstant doby průtahu  $T_u$  a doby náběhu  $T_n$  [19].



Obr. 3.9: Přechodová charakteristika proporcionální regulace

Výpočet konstant je následující

$$K_P = 1,2 \frac{T_n}{T_u \cdot K} \quad ; \quad K_S = 0,6 \frac{T_n}{T_u^2 \cdot K} \quad ; \quad K_D = 0,6 \frac{T_n}{K}. \quad (3.13)$$

### 3.4.2 Metoda kritických parametrů

Základní myšlenkou metody je přivést regulační obvod to kritického stavu, tj. na mez stability, přičemž regulátor pracuje pouze s proporcionální složkou. Hodnota zesílení  $K_P$ , při které je obvod na hranici stability, se nazývá kritické zesílení a označujeme jej  $K_{P0}$ . Dalším důležitým parametrem je perioda kmitů, neboť obvod na hranici stability má netlumené kmity o konstantní amplitudě. Tento parametr se nazývá kritická perioda a označujeme ji  $T_K$ . Algoritmus seřizování diskrétního regulátoru metodou kritických parametrů je následující [18]:

1. zvolíme vhodnou vzorkovací periodu  $T$ ,
2. vyřadíme sumační a diferenční složku regulátoru,
3. zvyšováním proporcionálního zesílení přivedeme soustavu na mez stability a z rozkmitaného regulačního obvodu zjistíme kritické zesílení  $K_{P0}$  a z periodického průběhu kritickou periodu  $T_K$ ,

4. Z naměřených hodnot pak podle vztahů 3.14 určíme optimální parametry  $K_P$ ,  $K_S$  a  $K_D$ .

$$K_P = 0,6 \cdot K_{P0} \quad ; \quad K_S = 1,2 \frac{K_{P0}}{T_K} \quad ; \quad K_D = 0,075 \cdot K_{P0} \cdot T_K. \quad (3.14)$$

### 3.4.3 Metoda releové zpětné vazby

Může nastat situace, kdy se nám nepodaří soustavu rozkmitat. V těchto případech je vhodné použít metodu releové zpětné vazby. Je založena na umělém vyvolání kmitů v soustavě pomocí dvoustavové regulace. Při určování parametrů se výstup regulátoru přepíná mezi dvěma polohami v závislosti na polaritě regulační odchylky. Tímto způsobem se na výstupu soustavy vytvoří netlumené kmity, jejichž perioda představuje kritickou periodu  $T_K$  [20]. Hodnotu kritického zesílení je možné vypočítat podle vztahu 3.15.

$$K_{P0} = \frac{4h}{\pi a}, \quad (3.15)$$

kde  $K_{P0}$  je kritické zesílení,  
 $h$  amplituda výstupu relé,  
 $a$  amplituda kmitů.

V našem případě je pro tuto metodu použita třístavová regulace, kdy je zavedena mezi dva stavy oblast necitlivosti (hystereze), která tlumí účinek případného šumu měření regulované veličiny a prodlužuje periodu oscilace.

### 3.4.4 Metoda pokusů a omylů

Zmíněné metody pro nastavení konstant PSD regulátoru nemusejí určovat konstanty odpovídající očekávanému průběhu regulace. Je možné a někdy i nutné získané konstanty doladit metodou pokusů a omylů. Pro posouzení vlivu jednotlivých změn konstant je uvedena následující tabulka 3.2, která je převzata z [19]. Na základě našich požadavků poté upravujeme jednotlivé konstanty.

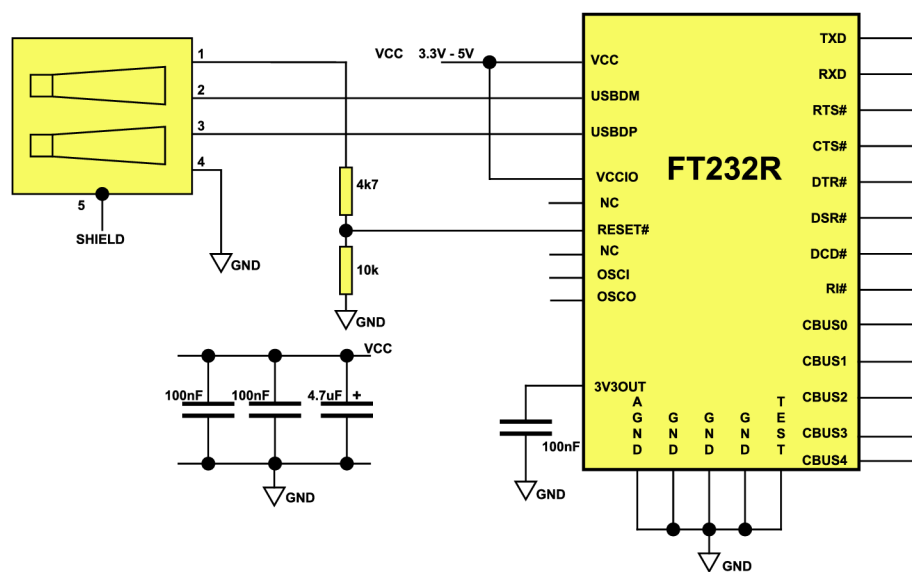
Tab. 3.2: Účinky zvýšení konstant PSD regulátoru na regulační odezvu

Odezva	Doba náběhu	Přeregulování	Doba ustálení	Ust. reg. odchylka
$K_P$	zmenšuje	zvětšuje	malá změna	zmenšuje
$K_S$	zmenšuje	zvětšuje	zvětšuje	odstraňuje
$K_D$	malá změna	zmenšuje	zmenšuje	malá změna

## 4 PERIFERIE

### 4.1 Rozhraní pro komunikaci s PC

Mikrokontrolér ATmega644 obsahuje komunikační rozhraní USART (*Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter*). Jedná se o obvod schopný obousměrné komunikace, a to jak synchronní, tak asynchronní, s vysokou přenosovou rychlostí podporující 5 až 9 datových bitů, 1 až 2 stopbity, výběr mezi paritami s jejich hardwarovou kontrolou. Rozhraní USART lze využít k multiprocessorové komunikaci a nebo k propojení s počítačem. Je zde nutno vzít v úvahu rozhraní počítače které budeme ke komunikaci využívat. Možnosti jsou dvě, sběrnice RS232 nebo USB. První možnost má specifické požadavky na úroveň napětí na sběrnici. Logická nula je charakterizována kladným napětím, které může u vysílače dosahovat až 15 V. Logická jednička je na sběrnici reprezentována napětím  $-15$  V. Toto jsou napětí, která by logiku TTL v mikrokontroléru poškodila. Proto je nutno využít převodník úrovní. Mezi nejběžnější obvody pro převod úrovní RS232 na TTL patří MAX232 (nebo např. ST232). Tento obvod je napájen 5 V a využívá nábojové pumpy k vytvoření výstupního napětí. Další možností je převodník USART/USB. Tento převod lze vytvořit programově pomocí mikrokontroléru, ale mnohem lepším řešením je využít integrovaný obvod, který je pro tuto funkci určen a je plně podporován operačními systémy počítače. Nejpoužívanějšími obvody v této oblasti jsou převodníky FT232 firmy FTDI. Převodník je napáován v ovladačích operačního systému jako virtuální sériový port (COMx). Komunikace mezi počítačem a cílovou



Obr. 4.1: Zapojení obvodu doporučené výrobcem [14]

aplikací pak probíhá pomocí terminálu nebo například pomocí aplikace vytvořené v LabVIEW. USB rozhraní obsahuje dva napájecí vodiče a dva vodiče pro přenos dat. Napájecí vodiče pak umožňují napájet cílovou aplikaci přímo přes USB, což je možné v aplikacích s odběrem menším než je povolený proud USB, ten se pohybuje běžně do 500 mA. V našem případě je zbytečné a i nemožné systém napájet z tohoto rozhraní, proto je obvod FT232L zapojen dle doporučení výrobce tak, že je napájení z USB odděleno. Zapojení obvodu na obrázku 4.1 je převzato z katalogového listu výrobce.

Z povahy navrhované aplikace je potřeba zajistit obousměrnou komunikaci mikrokontroléru a počítače. Proto je nutno definovat formáty přenášeného rámce pro přijímaná i odesílaná data. Pro zobrazení stavu aplikace nás budou zajímat především informace o teplotě ze dvou měřících kanálů, velikosti výkonu, který je dodáván do Peltierovy termobaterie a informace o stavu periférií. Při komunikaci počítače s mikrokontrolérem naopak požadujeme možnost nastavit velikost teploty pro regulaci, konstanty PSD regulátoru a nastavení periférií. Přenášená data jsou v našem případě 8bitová, proto je nutno normalizovat přenášené hodnoty tak, aby se vešly do rozsahu 8 bitů nebo přenos rozdělit do dvou či více bajtů. V případě teploty, která se pohybuje v rozsahu od 25 °C do 45 °C, je převedení do formátu vyjádřitelného osmi bity následující.

$$(\text{Teplota} \cdot 10) - 250.$$

Získáme tak hodnoty teploty vyjádřené na jedno desetinné místo v rozsahu hodnot 0 až 200. Tento rozsah odpovídá teplotám 25.0 °C až 45.0 °C. Maximální hodnota, kterou jsme schopni vyjádřit osmi bity je  $2^8 - 1$  což se rovná 255. Nyní máme k dispozici zbývajících 55 hodnot pro přenos doplňujících informací, u kterých je zřejmé, že nebudou představovat teplotu a můžeme tak v aplikaci na počítači rozlišit informace o přenosu od dat, čímž zlepšíme synchronizaci přenosu. V tabulce 4.1 vidíme rámce pro přenos jednotlivých informací. První se odešle bajt obsahující informaci o obsahu následujícího bajtu. Například odesílají-li se data o teplotě v kanálu 1, mikrokontrolér vyšle nejprve hodnotu (v dekadickém zápisu) 254 a poté pošle hodnotu teploty v normalizovaném tvaru. Pro přenos informace o velikosti výkonu se normalizuje jeho hodnota následujícím způsobem.

$$\text{Výkon} + 100.$$

Výsledkem je pak rozmezí hodnot 0 až 200, což odpovídá rozsahu výkonů od -100 % do +100 %. Pro odesílání informací o stavu periférií zařízení jsou definovány jednotlivé bity podle tabulky 4.2

Pro přenos dat z počítače do mikrokontroléru postupujeme podobným způsobem jako v předchozím případě. S každým přijatým bajtem je v programu mikrokontroléru vyvoláno přerušení, v jehož obsluze se načte hodnota přijímacího registru.

Tab. 4.1: Formát rámce pro přenos dat do PC

1. bajt	2. bajt
251	Výkon+100
252	Periferie
254	$(T_{\text{NTC1}} \cdot 10) - 250$
255	$(T_{\text{NTC2}} \cdot 10) - 250$

Tab. 4.2: Formát bajtu pro přenos informací o stavu periferií

	7	6	5	4	3	2	1	0
<b>Periferie</b>	Vent.2 <sup>1</sup>	Manual	3stav	PSD	Vyp.term.	Čerp.	Vent.1 <sup>2</sup>	LCD

Poznámky: <sup>1</sup>Ventilátor na chladiči H-můstku, automaticky se spíná při teplotě chladiče větší než 30 °C; <sup>2</sup>Ventilátor umístěný na chladiči Peltierovy termobaterie.

Načtená hodnota řídí stavový automat, jehož stavy nám udávají následující operace. Například pošleme-li jako první bajt číslo 3, tak se v mikrokontroléru připraví obslužný podprogram pro přerušení k příjmu následujících tří bajtů, které reprezentují konstanty  $K_p$ ,  $K_s$ ,  $K_d$ . Jednotlivé rámce jsou zobrazeny v tabulce 4.3 a vývojový diagram stavového automatu pro příjem dat na rozhraní USART je na obrázku v příloze G

Tab. 4.3: Formát rámce pro přenos dat z PC do MCU

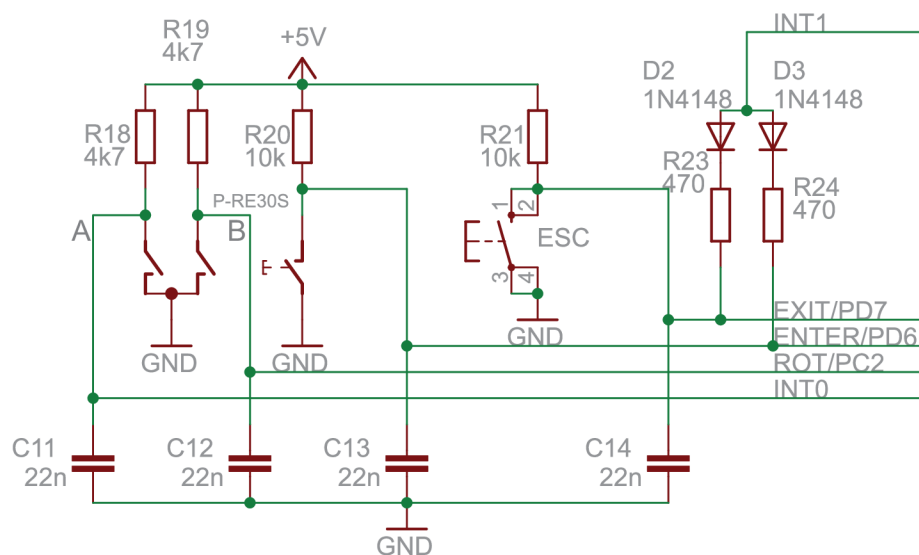
1. bajt	2. bajt	3. bajt	4. bajt
1	$(\text{Teplota} \cdot 10) - 250$	-	-
2	Periferie	-	-
3	$K_p$	$K_s$	$K_d$

Veškerá komunikace počítače s mikrokontrolérem je omezena na uvedené případy. Informace o stavu zařízení (teploty, výkon a stav periferií) se vysílají nepřetržitě v pevných časových intervalech. Požadované změny konstant PSD regulátoru teploty nebo třeba výběr termostatu provádíme dle potřeby. Změněné hodnoty termostatu (teplota a PSD konstanty) se ukládají do vnitřní paměti EEPROM mikrokontroléru a při novém spuštění systému jsou automaticky načteny. Navrhovaný systém tak umožňuje autonomní práci bez nutnosti připojení k PC a pouze chceme-li zobrazovat měřené teploty nebo chceme-li změnit nastavení systému, využijeme tohoto připojení k počítači.

## 4.2 Ovládací prvky

Pro zadávání jednotlivých příkazů zařízení je možno rozšířit stavový automat a vyhodnocovat jednotlivé povely z počítače, avšak požadavek na zařízení je takový, aby bylo schopno pracovat autonomně, tj. i bez připojeného počítače. Proto je nutné mít přístup k jednotlivým funkcím a k základnímu nastavení zařízení. Pro práci se zařízením je vytvořeno jednoduché menu, ve kterém se pohybujeme pomocí ovládacích prvků směry nahoru, dolů a potvrzujeme vstup do následujícího submenu, nebo se vracíme do nadřazené úrovně. Potřebujeme tak mít k dispozici minimálně 4 ovládací prvky, kterými mohou být buď tlačítka, nebo lze využít například rotačního kodéru.

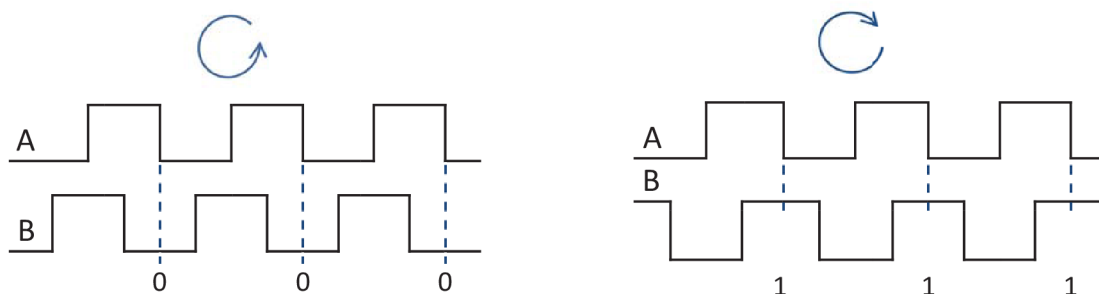
Rotační kodér, označovaný někdy také jako inkrementální snímač polohy, je zařízení udávající informaci o změně polohy (otočení) hřídele, a je schopen rozlišit směr této změny. Výhody rotačního kodéru jsou v jednoduchosti při ovládní zařízení. Funkce těchto prvků může být založena na mechanickém nebo optickém principu. Optické snímače polohy mají výhodu ve velké citlivosti a využívalo se jich například v kuličkových počítačových myších, kde otočení hřídele odpovídalo změně polohy myši. Pro účely ovládní jednoduchých zařízení je vhodný mechanický rotační kodér, který má podle typu citlivost 20 až 30 impulsů na otáčku. Může také obsahovat potvrzovací tlačítko, čímž získáme v jedné periférii hned 3 ovládací prvky najednou. Doplněním o tlačítko zpět jsme pak schopni zvládnout jednoduché ovládní celého zařízení. Zapojení ovládacích prvků je uvedeno na obrázku 4.2



Obr. 4.2: Zapojení tlačítka a rotačního kodéru s potvrzovacím kontaktem

Princip kodéru spočívá v tom, že generuje dva obdélníkové průběhy, fázově posunuté přibližně o  $90^\circ$  jako na obrázku 4.3. Při aktivní hraně jednoho průběhu čteme stav druhého signálu a podle toho, zda je v log.1 nebo log.0 přičítáme

nebo odečítáme hodnotu pozice. Jak můžeme vidět na obrázku 4.2, jeden výstup rotačního kodéru připojen na vstup vnějšího přerušení mikrokontroléru a druhý výstup je připojen na obecný vstupně/výstupní pin. Potvrzovací tlačítko a tlačítko zpět jsou připojeny přes diody na druhý vstup vnějšího přerušení a zároveň na dva obecné piny. Při obsluze tohoto přerušení testujeme, který z pinů je aktivní a tím poznáme, které tlačítko bylo zmáčknuto. Výsledkem takového zapojení je obsluha podprogramu pro pohyb v menu, jen když je vykonána nějaká akce.



Obr. 4.3: Výstupní průběhy rotačního kodéru

Průběhy na obrázku 4.3 jsou idealizované. Reálně se jednak mění vzájemný fázový posuv obou průběhů, ale také jsou mechanické kontakty uvnitř kodéru zdrojem velkého množství zákmitů. Doplněním výstupů o kondenzátory potlačíme zákmity, avšak je nutno provést ošetření tohoto jevu také programově, protože prakticky by se pak při ovládání zařízení vyhodnotila spousta falešných impulsů. Ošetření spočívá ve dvojitém testování stavu na pinech. Jednak se dvakrát testuje druhý výstup kodéru, abychom zjistili směr pohybu, ale také je potřeba ověřit i stav na přerušovacím pinu. Vhodně zvoleným kondenzátorem a časem mezi jednotlivými testy výstupů získáme ideální reakci pohybu v menu při otáčení snímačem. Nevýhodou je však vliv rychlosti otáčení. Rychlé pokusy o změnu polohy, třeba prudkým otočením o několik pozic, se nemusí vyhodnotit.

## 4.3 LCD

Podle složitosti zařízení volíme způsob indikace stavů. V jednoduchých zařízeních stačí signalizace stavu vypnuto/zapnuto, jinde je nutno zobrazovat hodnoty proměnných nebo krátký text. Podle potřeby volíme zobrazovací prvky a to buď znakové nebo grafické. V navrhovaném zařízení je potřeba zobrazovat hodnoty teplot a výkonu a zároveň mít vytvořeno uživatelské rozhraní pro nastavování a výběr mezi stavy zařízení. Povaha informací je pouze číselná nebo textová malého rozsahu.



Pro data většího rozsahu bude využita komunikace s počítačem a grafické prostředí vytvořené aplikace v programu LabVIEW. Pro daný účel budeme uvažovat použití displeje s technologií LCD. Podle způsobu zobrazení lze rozdělit LCD na:

- znakové displeje (nejčastěji s velikostí matice  $5 \times 8$  pro jeden znak),
- grafické displeje.

Pro navrhovaný systém vystačíme se znakovým displejem. Většina prodávaných běžně dostupných znakových displejů obsahuje řídicí obvod HD44780 firmy Hitachi (nebo obvody odvozené). Jejich výhodou je, že se ovládají stejným způsobem, i když jsou od různých výrobců. Pro komunikaci s řadičem LCD můžeme využít 8bitovou nebo 4bitovou komunikaci pro data a 3 piny pro řízení. Osmibitová komunikace je rychlejší, avšak zabere až 11 pinů mikrokontroléru, naproti tomu 4bitová komunikace dělí datové slovo do dvou niblů a posílá je v časovém multiplexu. Zobrazování je pomalejší, ale za cenu snížení počtu vodičů. Přenos dat mezi mikrokontrolérem a řadičem displeje je řízen třemi signály:

- $RS = 0$  přenáší se instrukce ( $RS = 1$  přenáší se data),
- $RW = 0$  zápis dat/instrukcí do LCD ( $RW = 1$  čtení dat/instrukcí z LCD),
- E kladný impuls spouští komunikaci.

Displej obsahuje dále napájecí vstupy pro obvody displeje, napájení podsvícení a jeden vstup pro nastavení kontrastu. Rozšířeným zapojením lze měnit jas podsvícení displeje a kontrast, dále je vhodné mít možnost vypínat a zapínat podsvícení LCD řízené mikrokontrolérem.

Pro přehlednou realizaci menu přístroje je zvolen displej se čtyřmi řádky a dvaceti znaky na řádek s typovým označením BC2004A. Je připojen do aplikace pomocí čtyř datových a dvou řídicích vodičů RS a E. Jelikož se bude na displej pouze zapisovat, je vstup R/W připojen natrvalo k zemi a není nutno jej vyvádět k mikrokontroléru. Nastavení kontrastu a jasu se provádí pomocí trimrů a je zde vyveden jeden vodič pro spínání a vypínání podsvícení. Zapojení vývodů LCD v obvodu je uvedeno v příloze C.

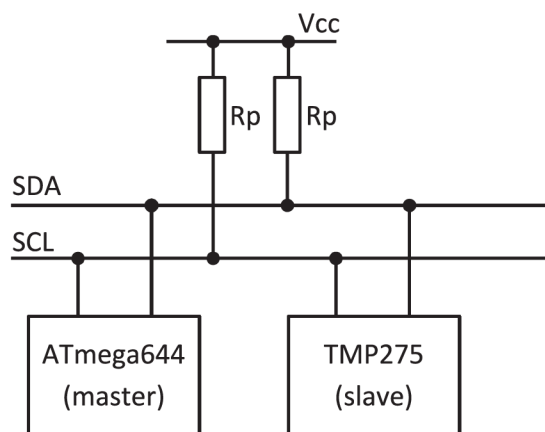
Vlastní menu je vytvořeno jako stavový automat. Je možno se v něm pohybovat nahoru a dolů s vyznačením aktivního řádku, potvrzením se lze vnořovat do hlubších struktur menu. Struktura menu je uvedena v příloze A. Pro základní signalizaci stavu je zařízení doplněno dvoubarevnou LED, která při aktivním termostatu svítí červeně ve stavu topit a zeleně ve stavu chladit.

## 4.4 Teploměr s číslicovým výstupem

Konstrukčně je H-můstek tvořen čtyřmi výkonovými tranzistory, které jsou přes silikonovou podložku připevněny k chladiči. Dále je zde připevněn i stabilizátor pro

napájecí větev 5 V. Vlastní konstrukce je popsána níže, avšak důležité je věnovat pozornost chladiči H-můstku. Vlivem velkých proudů, které protékají tranzistory, a především jejich skokových změn, dochází k ohřívání chladiče. Při dlouhodobé činnosti zařízení by mohla teplota chladiče vzrůst natolik, že by se poškodila konstrukce krabičky. Vyšší teplota také mění parametry integrovaných obvodů. Je nutno tedy chladič aktivně ochlazovat ventilátorem. Je zbytečné, aby ventilátor byl sepnut neustále, proto je ke chladiči připevněn senzor teploty s číslicovým výstupem. Měříme jeho teplotu, kterou jednak zobrazujeme, abychom byli schopni popsat vliv ventilátoru a posoudit účinnost chlazení výkonových prvků, a jednak hodnotu teploty používáme pro řízení spínání ventilátoru. Přesáhne-li teplota chladiče 30 °C, sepne se ventilátor a k jeho vypnutí dojde při poklesu teploty pod 29 °C.

Zvoleným senzorem teploty je obvod *TMP275* popsáný v kapitole 1.4.3 na straně 18. Zapojení obvodu ke sběrnici je na obrázku 4.4



Obr. 4.4: Popis zapojení na sběrnici I2C

Sběrnice I2C umožňuje propojení až 128 různých zařízení pomocí pouze dvou vodičů. Jeden přenáší hodinový signál SCL (Synchronous Clock) generovaný řídicím obvodem (master) a druhý datový kanál SDA (Synchronous Data). Každý vodič musí být připojen jedním pull-up rezistorem ke kladnému napětí, což zajistí vysokou úroveň v klidovém stavu. Při probíhající přenosu jsou na SDA vysílány jednotlivé datové bity přičemž platí pravidlo, že logická úroveň na SDA se smí měnit pouze je-li SCL v logické úrovni 0. Toto pravidlo je porušeno ve dvou speciálních případech. Jedná se o vysílání podmínek START a STOP, které se používají k zahájení komunikace a k ukončení přenosu [15].

Na obrázku 4.5 je naznačen způsob komunikace mikrokontroléru s obvodem TMP275 po sběrnici. Každému přenosu předchází vyslání podmínky START. Poté je vysílána 7 bitová adresa příjemce a jeden bit R/W, který indikuje požadovanou



Obr. 4.5: Formát rámce pro komunikaci na sběrnici I2C

operaci (čtení/zápis). Další bit ACK je vysílán s úrovní H a je určen k potvrzení přijímací stanice o připravenosti přijímat. Dále jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý bajt je následován jedním bitem ACK. Po ukončení přenosu je vysílána podmínka STOP. Podrobněji je popsán způsob komunikace s čidlem TMP275 v katalogovém listu výrobce [16].

## 5 NAPÁJECÍ OBVODY

Napájení celého zařízení je potřeba navrhnout tak, aby bylo schopno dodávat energii do všech částí obvodu, a to jednak s konkrétními hodnotami napětí, které jednotlivé obvody vyžadují, tak i s dostatečným výkonem. *Integrované obvody* jako mikrokontrolér nebo *logika* displeje se obvykle napájí 5 V.

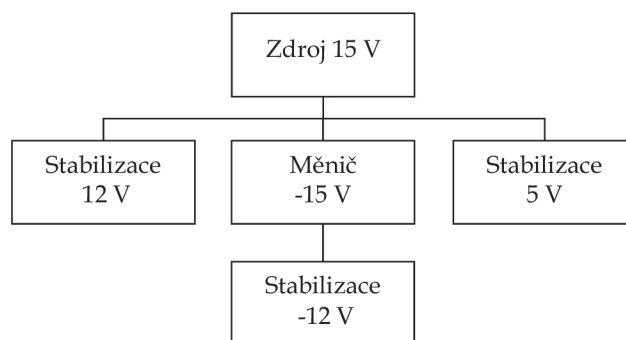
Dalším prvkem obvodu jsou *operační zesilovače*. Jestliže budeme pracovat se zesilovaným signálem v rozmezí 0 V až 5 V, postačovalo by nesymetrické napájení, avšak uvažovaný přístrojový zesilovač pracuje výhradně se symetrickým napájením, takže musíme zajistit obě polarity napětí. Jmenovitá hodnota napájecího napětí zesilovače musí být větší, než je zesilované napětí, aby nedocházelo k nelineárnímu zkreslení. Použita hodnota pro napájení operačních zesilovačů je 12 V.

Dalším prvkem obvodu je *Peltierova termobaterie*. Zde je nutno uvažovat především příkon termobaterie. Pro její maximální napětí je výrobcem udán proud, který musíme být schopni dodat, chceme-li využít maximální výkon. Prakticky mívají termobaterie maximální napětí článku v řádu jednotek až desítek Voltů, přičemž proud článkem se dle výkonu pohybuje řádově opět v jednotkách až desítkách Ampérů, podle výkonu termobaterie. Při realizaci je použita Peltierova termobaterie M-TEC1-12705HT s maximálním napájecím napětím 15,4 V a proudem 4,6 A.

Pro návrh zdroje s požadovaným výkonem je nejlepší využít *spínané zdroje*, které se vyrábí a dodávají jako moduly. Výhodou oproti klasickému zdroji je velká účinnost a malé rozměry. Příkladem zdroje dodávaného firmou GME je spínaný síťový zdroj pod označením PS-100-15. Jelikož nejvyšší napětí v obvodu je napětí Peltierovy termobaterie 15,4 V, je zvolen zdroj s výstupním napětím 15 V a maximálním výstupním proudem 6,7 A.

Posledním významným spotřebičem v obvodu budou dva *ventilátory*, jeden k ochlazení chladiče H-můstku a druhý na chladiči Peltierovy termobaterie, oba ventilátory jsou napájeny 12 V a mají oddělené napájení od ostatních částí. Proud oběma ventilátory by neměl přesáhnout 1,5 A. Návrh napájecích obvodů musí být proveden s ohledem na požadavky napájených obvodů, ty jsou uvedeny v tabulce 5.1

Hlavním napájecím napětím zařízení je 15 V, ostatní napětí jsou z něj odvozena způsobem uvedeným na obrázku 5.1. Napájecí větev 5 V je vytvořena stabilizátorem 7805 s maximálním proudovým zatížením 1 A. Větev s napětím 12 V pro měřicí část je vytvořena stabilizátorem 78L12 s maximálním proudem 100 mA. Avšak toto napětí je určeno i pro napájení ventilátorů, zde aby nedocházelo k rušení měřicí části, je napájení ventilátorů odděleno a je pro něj vytvořena samostatná napájecí větev 12 V stabilizátorem 7812 s proudovým zatížením maximálně 1,5 A. Záporné napětí -12 V je získáno tak, že se měničem ICL7660 vytvoří záporné napětí z 15 V a z něj se pomocí stabilizátoru 79L12 vytvoří výsledné napětí. Nábojová pumpa obvodu



Obr. 5.1: Blokové schéma napájecího zdroje

ICL7660 však nesmí být zatížena proudem větším než 10 mA. Tato podmínka je pro naši aplikaci splněna, v opačném případě by docházelo k poklesu účinnosti a na výstupním napětí by se superponovalo rušení ve formě obdélníku s frekvencí cca 4 kHz. Proudů uvedené v tabulce 5.1, jsou převzaty z katalogových listů jednotlivých výrobců a jedná se jen o přibližnou hodnotu, protože proudy jednotlivými obvody jsou dány i jejich zatížením popřípadě aktivitou (například v případě podsvícení LCD atp.).

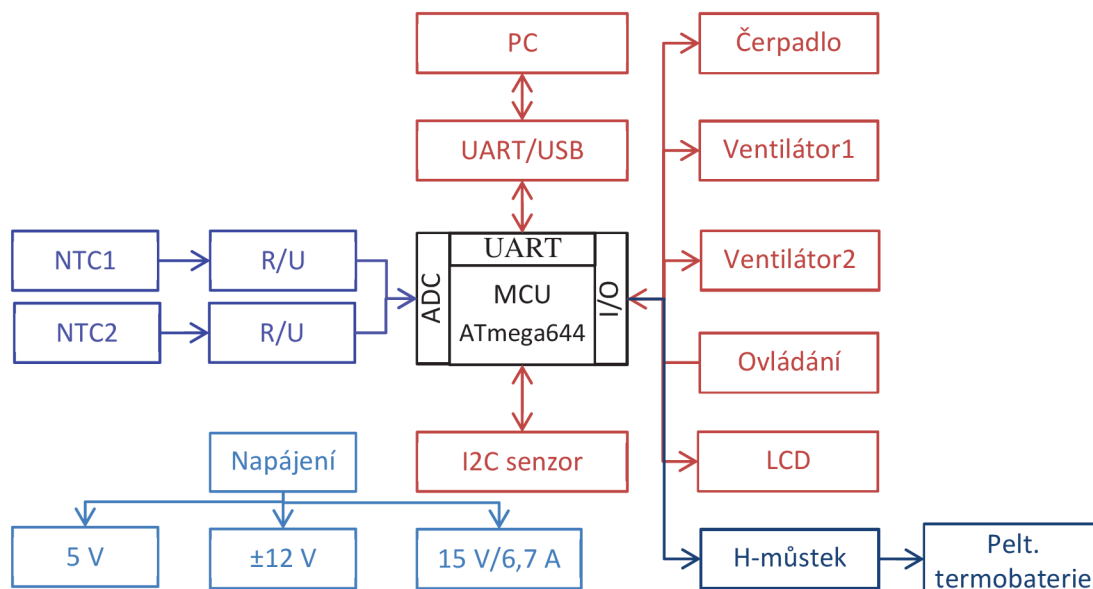
Tab. 5.1: Požadavky na napájení navrhovaných obvodů

Obvod	Označení	Napájecí napětí	Napájecí proud
Přístrojový zesilovač	INA2126	$\pm 1,35$ do $\pm 18$ V	$\pm 400 \mu\text{A}^1$
Mikrokontrolér	ATmega644	2,7 do 5,5 V	200 mA
Hradlo NAND	74HCT00	4,5 do 5,5 V	50 mA
2x proudový zdroj	REF200	1 do 40 V <sup>2</sup>	$200 \mu\text{A}^3$
LCD	BC2004A	2,7 do 5,5 V	$1,6 \text{ mA}$ ( $280 \text{ mA}$ ) <sup>4</sup>
Převodník USB	FT232RL	3,3 do 5,25 V	15 mA
Peltierův článek	M-TEC1-12705	15,4 V	4,6 A

Poznámky: <sup>1</sup>klidový proud pro oba kanály; <sup>2</sup>napětí úměrné proudu (pro zátěž 10 k $\Omega$  a proud 20  $\mu\text{A}$  je napětí 200 mV); <sup>3</sup>závisí na proudu dodávaném obvodem (v našem případě 2x 100  $\mu\text{A}$ ); <sup>4</sup>280 mA podsvícení displeje.

## 6 REALIZACE ZAŘÍZENÍ

Při realizaci zařízení je nutno uvažovat jednotlivé zmíněné části jako celek. Vzájemné vazby mezi částmi jsou znázorněny v blokovém schématu na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Blokové schéma navrhovaného zařízení

### 6.1 Provedení vlastního zařízení

Realizace celého zařízení je provedena na čtyřech deskách plošného spoje (DPS). Je to z důvodu postupného vývoje zařízení. Jelikož se jedná pouze o *prototyp*, zařízení obsahuje i prvky, které v průběhu programování a oživování nebyly využity. Jedná se především o externí paměť EEPROM komunikující s mikrokontrolérem přes rozhraní I2C a optorelé, jehož úkolem bylo spínat čerpadlo napájené síťovým napětím. Oba obvody jsou na DPS realizovány a je ověřena jejich funkce. Avšak výsledné řešení jich nevyužívá.

Schéma zapojení a podklady pro výrobu DPS jsou uvedeny v přílohách C, D, E, F. Předlohy pro výrobu DPS jsou vytvořeny pro technologii s negativním fotozisttem tzn. neosvětlené části se odleptají. Předlohy jsou zrcadleny pro tisk na pauzovací papír nebo fólii a při osvitě se přikládá tištěnou plochou k desce. Jsou zde také uvedeny osazovací plány s rozmístěním jednotlivých součástek.

Osazené DPS jsou pospojovány a připevněny v krabici označované dle katalogu firmy GME jako U-KP10. Jedná se o čtyřdílnou konstrukci z polystyrénu s větracími otvory. Na zadní straně je provedena úprava a přes průchodky je k ní připojen chladič

H-můstku s ventilátorem. Konstrukce je zobrazena na obrázku 6.2. Jsou zde banánky pro připojení napájení a vypínač. Ventilátor se spíná automaticky v závislosti na teplotě chladiče. Na čelní straně, zobrazené na obrázku 6.3, se nachází LCD a dvě signalizační LED, rotační kodér pro pohyb v menu a tlačítko zpět. Dále je na předním panelu vyveden konektor USB a dva kanály pro připojení termistoru. Svorčky jsou barevně odlišeny a vždy se k nim připojují konektory stejné barvy, tím předejdeme jejich špatnému zapojení. Červený a modrý konektor slouží pro připojení Peltierovy termobaterie. Žlutá s černou slouží pro napájení čerpadla a zelená s černou pro napájení ventilátoru na chladiči termobaterie.



Obr. 6.2: Zadní pohled na zařízení



Obr. 6.3: Čelní pohled na zařízení

## 6.2 Provedení senzoru teploty

Senzor teploty je tvořen vlastním čidlem, které je připevněno k jednomu metru stíněného mikrofonního kabelu. Kabel je zakončen konektorem DIN 3. Je vytvořena i kalibrační koncovka s hodnotou odporu odpovídající 34 °C [9]. Zařízení je kalibrováno pouze pro tento senzor. Při změně typu termistoru je nutno ve firmwaru zařízení změnit konstanty termistoru. Ukázka provedení kalibrační koncovky i senzoru teploty je na obrázku 6.4.

Zvolený termistor nese označení 10K3MBD1 a je distribuován firmou Telemeter Electronic [9]. Parametry zvoleného senzoru jsou

- časová odezva v kapalinách 400 ms,
- zatěžovací konstanta v klidném vzduchu  $D = 0,5 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- jmenovitá hodnota odporu  $10 \text{ k}\Omega$  při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- tolerance  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  v rozsahu  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- $A = 1,129964793 \cdot 10^{-3}$ ;  $B = 2,339864295 \cdot 10^{-4}$ ;  $C = 0,8825741750 \cdot 10^{-7}$ .

Pro určení maximální velikosti proudu senzorem použijeme vztah 1.5 na straně 13.

$$I = \sqrt{\frac{D}{R(25)}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3}} = 223,6 \mu\text{A}$$

Proud senzorem je dán proudovou referencí REF200, která je použita v měřicí části k napájení můstku. Její jmenovitá hodnota proudu je  $100 \mu\text{A}$ . Výsledný proud termistorem je ve vyváženém můstku roven polovině napájecího proudu.



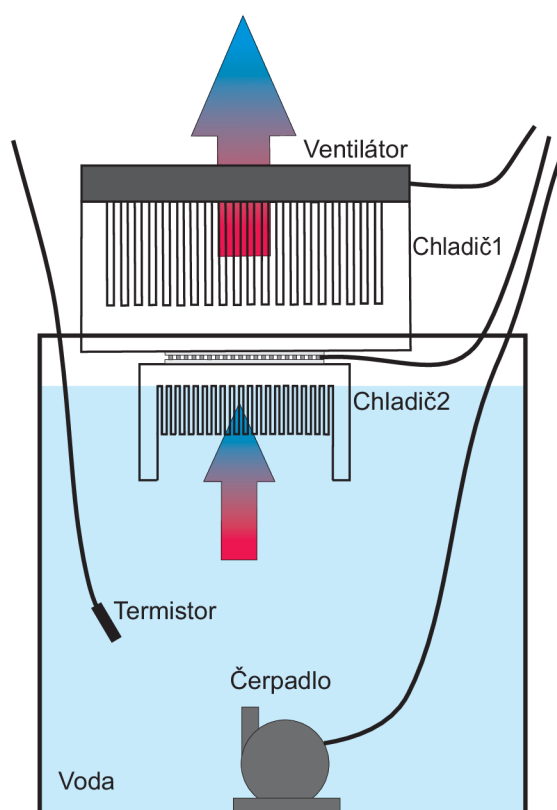
Obr. 6.4: Provedení senzoru a kalibrační koncovky

## 6.3 Provedení chladičů Peltierovy termobaterie

Pro vlastní akční zásah je nutno mít aktivní stranu Peltierovy termobaterie tepleně spojenou s chlazenou kapalinou. Nejlepším řešením by byl výměník používaný



například k vodnímu chlazení procesorů. V našem případě jsme pro experimentální účely připevnili k aktivní straně termobaterie měděný chladič a ten je dále ponořen do vody. Uvnitř nádoby je ponorné mikročerpadlo napájené 5 V, které míchá vodu uvnitř experimentální nádoby. Druhá strana termobaterie je opatřena větším pasivním chladičem, ke kterému je připevněn ventilátor. Při chlazení na aktivní straně musíme zajistit odvod tepla, tvořícího se na druhé straně termobaterie. Nebudeme-li dostatečně teplo odvádět, poklesne účinnost termobaterie a tím i celého chlazení. Provedení chladičů je naznačeno schématicky na obrázku 6.5.



Obr. 6.5: Schématické uspořádání experimentu

## 6.4 Programování mikrokontroléru a popis firmware

Celé zařízení je autonomní a je řízeno mikrokontrolérem ATmega644. Jeho firmware je napsán v jazyce C v prostředí AVR Studio 4. Firmware zařízení má velikost přibližně 18 kB a využívá výpočtů s plovoucí řádovou čárkou. Pro tyto výpočty není mikrokontrolér přímo určen, avšak jeho výkon je dostačující a lze tyto výpočty zajistit programově. Díky tomu lze relativně snadno přepočítat hodnotu odporu termistoru na teplotu. Další možností by bylo uložit převodní tabulku napětí/teplota do externí paměti EEPROM, tato možnost nebyla implementována.

Vlastní program se skládá z několika hlavičkových souborů

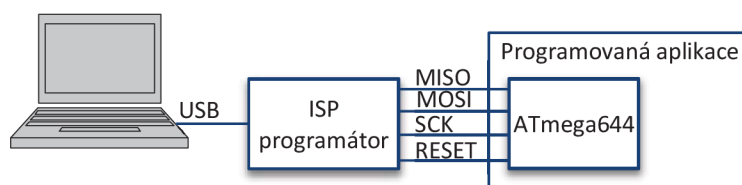
- main.h – seznam vytvořených funkcí,
- lcd\_h.h – hlavičkový soubor knihovny pro ovládání LCD,
- twi\_lib.h – hlavičkový soubor knihovny pro komunikaci na sběrnici I2C.

Dále obsahuje zdrojové soubory

- main.c – hlavní zdrojový soubor,
- lcd\_h.c – knihovna pro ovládání LCD,
- twi\_lib.c – knihovna pro komunikaci na sběrnici I2C,
- periferie.c – funkce pro komunikaci s periferiemi.

Knihovny pro ovládání LCD a I2C sběrnice jsou převzaty a jejich autorem je Peter Fleury. Více informací o knihovnách lze nalézt na internetových stránkách autora [22], kde jsou zveřejněny a popsány. Hlavní zdrojový soubor main.c řídí všechny funkce zařízení a využívá vytvořených nebo implementovaných funkcí a knihoven.

K programování mikrokontroléru je využit ISP programátor BiProg vytvořený podle návodu [21]. Výhodou ISP programátoru je, že programovaný mikrokontrolér je připojen v obvodu a k programování dochází jen pomocí tří vstupně/výstupních pinů MISO, MOSI a SCK. Tyto piny lze při běhu programu využívat jako běžné vstupně/výstupní piny. Konektor pro připojení programátoru je přístupný na DPS, avšak při změně firmwaru je nutno odmontovat horní kryt zařízení.



Obr. 6.6: Způsob připojení ISP programátoru

V programu jsou ošetřeny všechny nalezené spojitosti mezi jednotlivými stavy při jeho běhu. Například, když se zapne termostat, automaticky se spustí ventilátor i čerpadlo. Tento stav lze libovolně měnit v nastavení. Při spuštění jiného typu termostatu se původní termostat ukončí. Vše je zobrazováno na displeji a vidíme, který termostat je sepnut. Jednotlivé režimy lze volně měnit z PC i nastavením pomocí rotačního kodéru. Signalizační LED stavu zobrazuje stav topení červenou barvou a chlazení zelenou. V termostatu lze nastavit podle kterého kanálu termostat řídíme. Je možno v menu zobrazit konstanty PSD regulátoru a přes rozhraní USB je měnit.

Ovládací menu je intuitivní a hodnoty uložené v mikrokontroléru jsou v jednotlivých obrazovkách aktualizovány podle stavu. Aktualizují se pouze hodnoty,

text zůstává stejný, takže se na LCD neprojevuje blikání při obnovování. Program automaticky vysílá informace na rozhraní USART.

Menu pro kalibraci je vytvořeno, avšak k samostatné kalibraci nedochází a je nutno ji provést změnou odporu trimrů. Lze ji však použít pro informativní zjištění odchylek kalibrace. K tomuto se využívá kalibračních koncovek. Snadnou změnou programu lze uložit zjištěné kalibrační konstanty do programu, avšak stabilita nastavení se po dobu experimentů neměnila. Programová kalibrace by mohla při špatné manipulaci spíše rozkalibrovat přesné nastavení.

## 6.5 Program pro zobrazení teploty a nastavení termostatu

Bylo by obtížné nastavovat konstanty PSD ručně jen pomocí tlačítek a rotačního kodéru. Pro nastavování termostatu a zobrazování teplot z obou kanálů a velikosti aktuálního výkonu je vytvořen program v LabVIEW. Na obrázku v příloze B lze vidět celé uživatelské rozhraní aplikace. Je rozděleno v podstatě na dvě části. Měřicí část zobrazuje vývoj teplot a výkonu v čase a druhá část slouží k nastavování popřípadě zobrazování stavu zařízení.

Nejprve je nutno nastavit port ke kterému je zařízení připojeno, před samotným spuštěním programu se zvolí možnost *Refresh* a poté správný port s označením *COMx* kde *x* je číslo portu. Dále je potřeba nastavit cestu a název souboru do kterého se budou ukládat měřená data. V obou případech není nutno mít zapnutý přepínače. Po spuštění programu povolujeme komunikaci se zařízením po sběrnici USB, sepnutím přepínače v bloku *USB*, v grafech uvidíme vývoj teplot a výkonu. Potvrzením přepínače v bloku *Uložit do souboru*, začneme měřená data ukládat. Během měření je možno kdykoli přerušit a pokračovat v ukládání. Data v souboru jsou doplněna o hodnotu systémového času, takže rozeznáme jednotlivá přerušení.

Další blok je *Nastavení periferií*. Zde vidíme podle aktivních diod, která periferie je v provozu. Potvrzením nebo zrušením *checkboxu* je možno tento stav změnit. Výjimkou je *Termostat*, zde máme dvě menu, jedno zobrazuje aktuální nastavený režim a v druhém můžeme zvolit režim jiný nebo termostat vypnout. Tato možnost existuje i při změně ručně na zařízení. V takovém případě se změní stav softwarových LED nebo položka ve výběru termostatu.

V bloku *Konstanty PSD* měníme nastavení konstant termostatu. Hodnoty v jednotlivých kolonkách nastavíme současně a to v rozsahu 0 až 255 a poté tlačítkem *Nastav* uložíme do paměti EEPROM v mikrokontroléru a zároveň i začne tyto konstanty využívat regulátor při výpočtech akčního zásahu.

Při nastavování *Teploty* postupujeme obdobně. Povolený rozsah teplot je od 25,0 °C do 45,0 °C. S rozlišením na jednu desetinu stupně. Potvrzením tlačítkem *Nastav* se teplota uloží do paměti EEPROM a zároveň s ní začne termostat počítat jako s požadovanou.

## 6.6 Kalibrace měřící části

V příloze E je uvedeno schéma měřící části a osazovací plán. Tyto dva obrázky jsou podstatné pro zorientování se během kalibrace. Máme-li přístup k DPS provádíme kalibraci následovně.

1. na výstup z měřící části připojíme voltmetr nebo osciloskop,
2. na kalibrovaný vstupní kanál připojíme kalibrační koncovku pro 25 °C nebo termistor ponoříme do lázně s touto teplotou,
3. přepneme voltmetr na nejmenší rozsah,
4. pro nastavení rovnovážné polohy můstku měníme odpor trimrů R8 pro kanál 1 nebo R12 pro kanál 2. Nastavíme takovou hodnotu odporu, při níž bude napětí nulové, v případě nemáme-li k dispozici voltmetr nastavujeme vyvážení můstku tak, aby měřená teplota odpovídala 25,0 °C<sup>1</sup>.

Tímto postupem jsme vyvážili měřící můstek. Stejný postup zopakujeme pro druhý měřící kanál.

Nyní je potřeba doladit zesílení přístrojového zesilovače aby odpovídalo nastavenému zesílení v programu mikrokontroléru.

1. měřící a řídicí část jsou spojeny,
2. připojíme kalibrační koncovku 34 °C nebo ponoříme termistor do lázně s touto teplotou (ověřujeme vždy přesnějším teploměrem),
3. měníme odpor trimrů R6 (kanál 1) nebo R7 (kanál 2) tak, aby zobrazovaná teplota odpovídala požadované,
4. připojíme kalibrační koncovku s jinou hodnotou odporu a ověříme zda teplota odpovídá této hodnotě<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Musíme brát ohled na to, že nižší teplota než 25 °C se nezobrazuje.

<sup>2</sup>Hodnoty odporů při jednotlivých teplotách jsou uvedeny v katalogu výrobce [9].

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

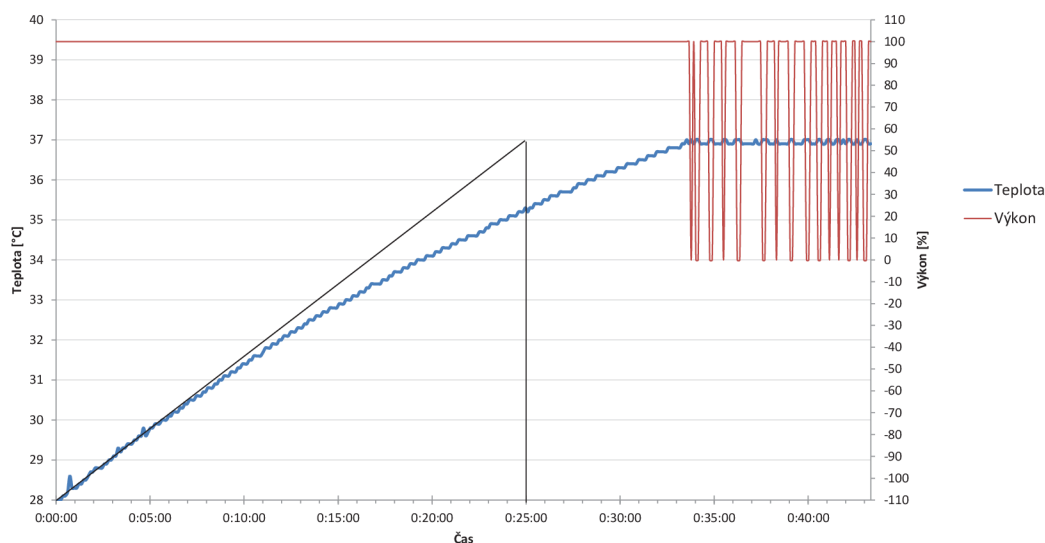
Funkce realizovaného zařízení byla ověřována experimentálně na soustavě uspořádané podle obrázku 6.5 na straně 54. Pro měření byly použity přístroje:

- YSI 4600 Precision Thermometer – přesnost se senzorem YSI 400  $\pm 0,115$  °C v rozsahu 0 °C až 50 °C,
- BK Precision 9110 – spínaný laboratorní zdroj.

Při měření byla teplota kontrolována přesnějším laboratorním teploměrem a na základě měření byla zjištěna odchylka hodnot měřeného a kalibračního přístroje menší než 0,1 °C v rozsahu 25 °C až 45 °C.

### 7.1 Třístavová regulace

V prvním experimentu jsme ověřovali funkci třístavové regulace. Pro měření byla použita skleněná nádoba, ve které byly 2l vody o počáteční teplotě 28 °C.



Obr. 7.1: Ohřev vody na teplotu 37 °C třístavovou regulací

Jelikož je voda neustále míchána čerpadlem a teplotní senzor se nachází přímo v dané kapalině, neprojeví se zde dopravní zpoždění, z čehož plyne, že nárůst teploty nastává okamžitě bez průtahu. Dobu průtahu určíme pro výpočty rovnu  $T_u = 1$ . Jelikož je nastavena relativně malá hystereze, a to  $\pm 0,1$  °C, není zde výrazné zvlnění. Hystereze lze nastavit větší a to v menu pro manuální termostat v rozmezí hodnot  $\pm 0,1$  °C až  $\pm 10$  °C. Tato hodnota se neukládá do paměti EEPROM, výchozí hodnota je vždy  $\pm 0,3$  °C. Střední hodnota teploty se pohybuje v rozmezí 36,9 °C až

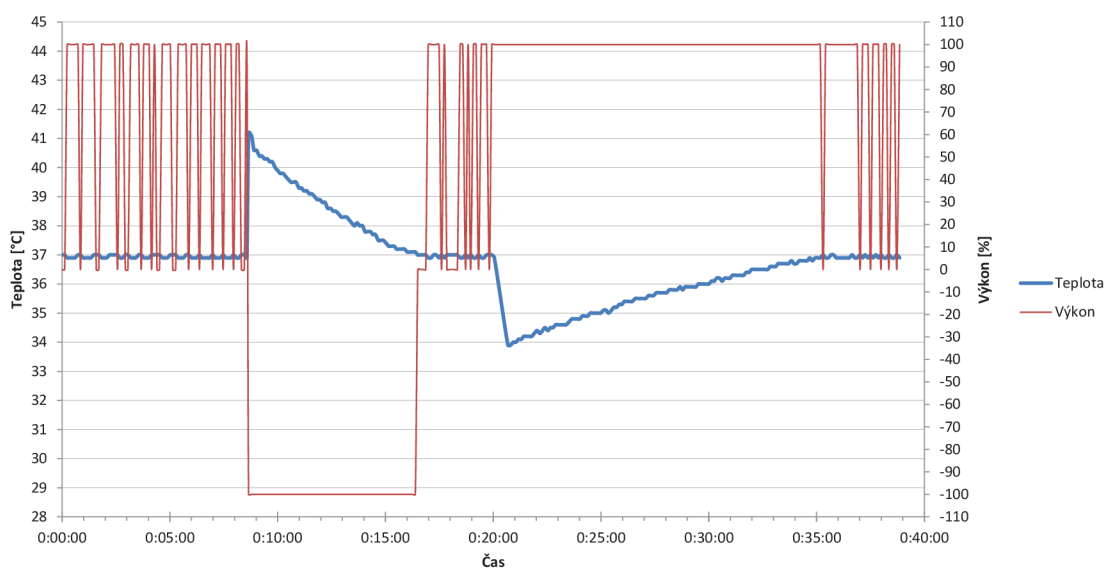
37°C. Na obrázku 7.1 je naznačena strmost přechodové charakteristiky, z níž určíme konstanty PSD postupem uvedeným v kapitole 3.4.1 na straně 39. Doba náběhu je  $T_n \approx 25 \text{ min} = 1500 \text{ s}$ .

$$K_P = 1,2 \frac{T_n}{T_u \cdot K} = 1,2 \frac{1500}{1,37} \approx 49,$$

$$K_S = 0,6 \frac{T_n}{T_u^2 \cdot K} = 0,6 \frac{1500}{1,37} \approx 24,$$

$$K_D = 0,6 \frac{T_n}{K} = 0,6 \frac{1500}{37} \approx 24.$$

Další experiment na soustavě regulované třístavovým termostatem byl proveden v ustáleném stavu, kdy do regulované kapaliny byla přilita teplá nebo studená voda. Měření i regulace byly v tento okamžik pozastaveny a voda promíchána. Průběh tohoto experimentu je na obrázku 7.2. Je zřejmé, že rychlost ochlazování je větší než rychlost ohřevu, to je spojeno s přirozeným ochlazováním nádoby vlivem nižší teploty okolí.

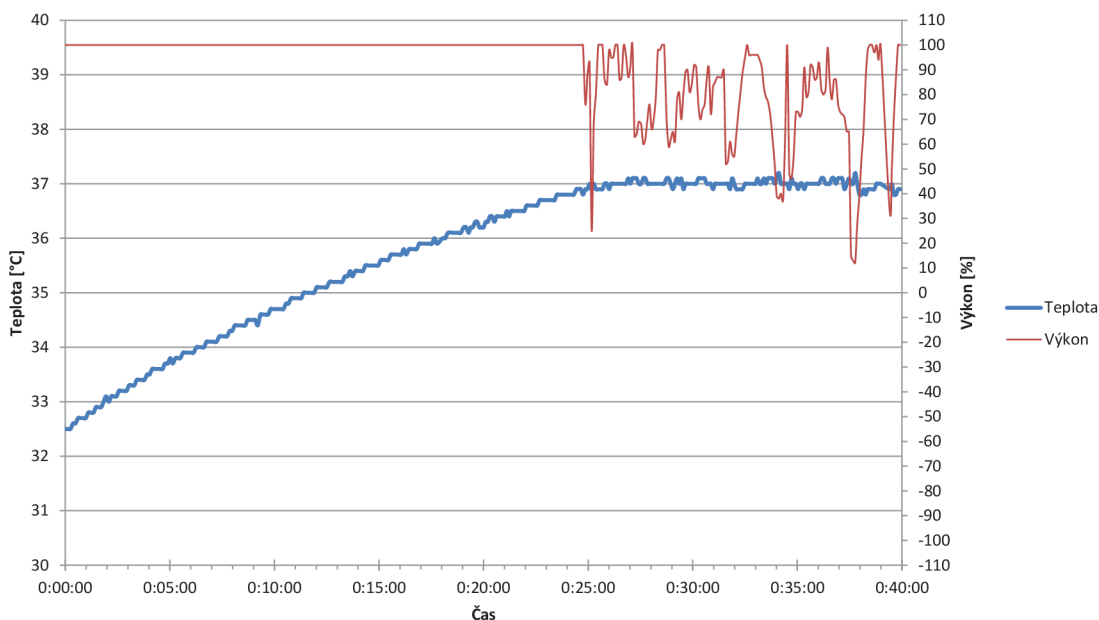


Obr. 7.2: Reakce třístavového regulátoru na skokové změny teploty

## 7.2 PSD regulace

Během experimentu s třístavovou regulací jsme změřili přechodovou charakteristiku soustavy a určili jsme z ní konstanty PSD. Na obrázku 7.3 je zobrazen průběh ohřevu vody řízený PSD regulátorem. Je zde vidět, že střední hodnota teploty vody

je 37°C. Z průběhu výkonu je zřejmé, že regulátor reaguje prudce na malé změny teploty, vhodným nastavením PSD konstant lze docílit, že změna výkonu bude pomalejší. Pro tento typ regulace by bylo vhodnější i využít delší vzorkovací periodu. Současná hodnota je nastavena na 0,7 s. Průběh regulace pro jinou soustavu, s přesněji nastavenými konstantami PSD, lze vidět na obrázku 7.5.



Obr. 7.3: Ohřev vody na teplotu 37°C PSD regulací

Dále jsme provedli měření reakce termostatu na skokové změny teploty. Průběh reakce termostatu je vidět na obrázku 7.4. V této části experimentu byla snížena teplota pro regulaci na 36,5°C při zachování regulačních konstant. Je zřejmé, že i pro tuto teplotu termostat reguluje a reaguje na změny teploty. Rušení zjevné v průběhu se vyskytlo v této části měření a je připisováno špatné izolaci spoje senzoru a kabelu. Pro další používání je nutno spoje ošetřit tak, aby ponoření do kapaliny neovlivňovalo měření. V druhé polovině průběhu byl senzor povytažen a rušení se snížilo. Na skutečnou hodnotu teploty vody však toto rušení nemělo vliv.

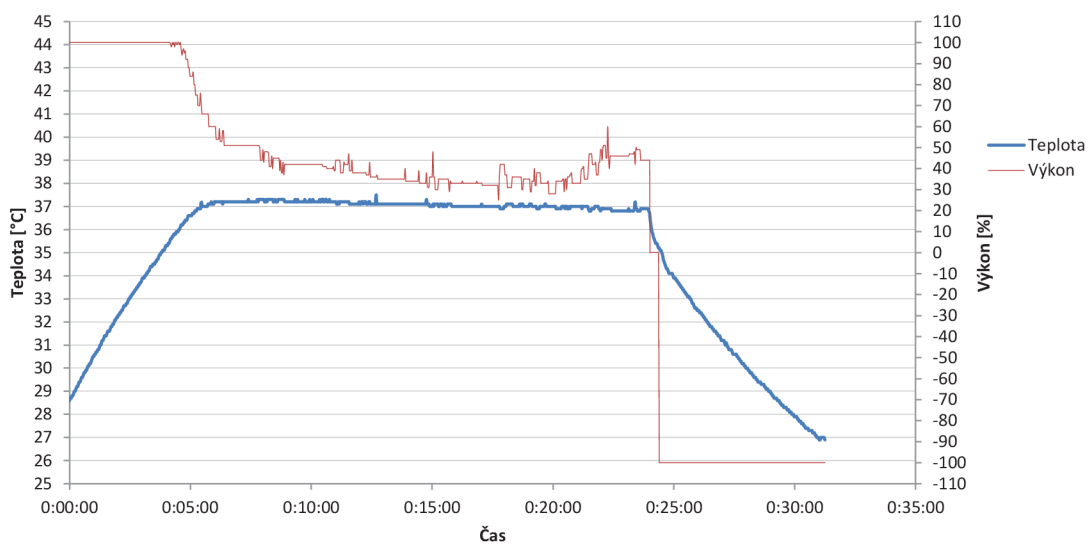
### 7.3 Shrnutí

Z popsaných i dalších provedených experimentů vyplývá, že požadovaná přesnost měření teploty je splněna. Třístavová regulace se zde jeví jako velice vhodná, avšak pro složitější soustavu by se mohly projevit její nevýhody. PSD regulace reaguje na změny teploty a temperuje fyziologický roztok k požadované hodnotě i při méně přesně nastavených konstantách regulátoru. Z průběhů je dále zřejmé, že vytvořené

zařízení není příliš vhodné pro temperování roztoku z nízkých teplot. Je to dáno malým výkonem Peltierovy termobaterie. Je vhodnější roztok přehřát jiným způsobem a Peltierovu termobaterii využívat jen ke kompenzaci vnějších vlivů, které by měnily teplotu fyziologického roztoku v Langendorffově aparátu.



Obr. 7.4: Reakce PSD regulátoru na skokové změny teploty



Obr. 7.5: Ukázka průběhu regulace se správně nastavenými PSD konstantami



## ZÁVĚR

Téma této diplomové práce vzniklo jako důsledek problému při experimentech na Langendorffově aparátu, kdy docházelo působením vnějších vlivů k ohřevu fyziologického roztoku a tím k nárůstu teploty v prostředí, ve kterém se vyskytuje zvířecí srdce. Úkolem této práce bylo navrhnout autonomní systém pro regulaci teploty umožňující ohřev i ochlazování. Termostat musí měřit teplotu s přesností  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  v rozsahu teplot  $25^\circ\text{C}$  až  $45^\circ\text{C}$ .

V úvodu práce jsou popsána základní obvodová řešení týkající se dané problematiky. Je bráno v potaz vždy více možností jak daný problém vyřešit a je zvolen ten nejvíce vhodný pro náš případ. Jednotlivé dílčí obvody byly ověřeny simulací v programu PSpice v10.3. Při realizaci bylo postupně ověřováno a vyvíjeno výsledné zapojení tak, aby byly eliminovány možné další problémy. Výsledná realizace se tedy skládá ze čtyřech desek plošného spoje, které ve výsledku tvoří jeden funkční celek.

Další část práce je programové řešení problematiky měření a řízení teploty. Řídicím prvkem celého zařízení je mikrokontrolér, jehož program vykonává všechny potřebné funkce. Je zajištěno rozhraní pro nastavování potřebných parametrů i pro zobrazení stavu regulace, popřípadě aktuální hodnoty teplot. Nad rámec zadání bylo vytvořeno rozhraní pro komunikaci s počítačem, které umožňuje sledovat vývoj teplot v čase s možností ukládání hodnot přes uživatelské prostředí vytvořené v programu LabVIEW.

Vytvořené zařízení je prototyp a obsahuje i nadbytečné prvky, stejně tak nebylo možno během vývoje změnit některé parametry pro dosažení lepších výsledků. Při návrhu finálního výrobku vycházejícího z prototypu by bylo dobré zvětšit rozsah pro měření teplot a to především využitím A/D převodníku s větším počtem bitů. Jednotlivé části vytvořené na čtyřech deskách plošného spoje, seskupit do jedné desky a implementovat modul spínaného zdroje přímo do zařízení.

Hlavním přínosem této práce je vytvořený produkt, který je upraven pro použití v laboratoři, jednotlivé části jsou umístěny v krabičce a vnitřní části nejsou přístupné. Veškerá komunikace se provádí přes uvedená rozhraní a další části se připojují přes konektory, které jsou barevně odlišeny, aby nedošlo k záměně. Realizované zařízení bylo odzkoušeno v podmínkách simulujících regulovanou část v Langendorffově aparátu. Zjištěná přesnost regulace závisí na typu regulované soustavy, pro systém obsahující dva litry vody bez dopravního zpoždění se přesnost udržované teploty pohybovala v řádu desetin stupňů Celsia a dobou potřebnou pro ustálení ze skokové změny teploty v řádu jednotek minut. Na základě provedených měření se domnívám, že jednotlivé body zadání jsou splněny a zařízení je možno použít v reálném experimentu.

## LITERATURA

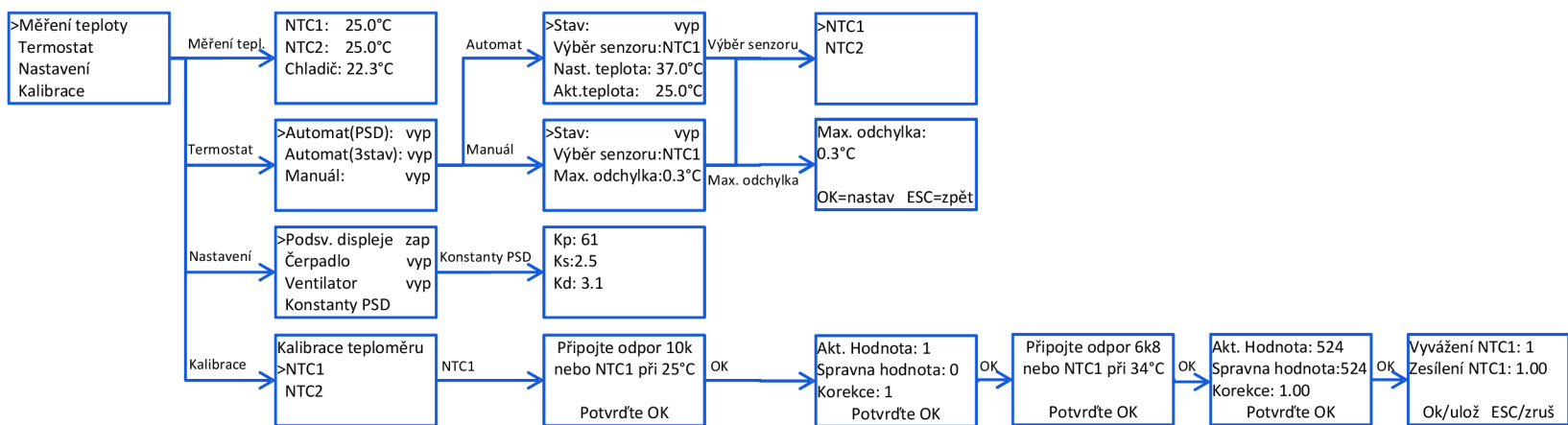
- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: Senzory a měřící obvody*. Praha: Ben, 2005. 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] RIPKA, Pavel, et al. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT v Praze, 2005. 135 s. ISBN 80-01-03123-3.
- [3] HW.cz [online]. 19. Srpen 2004 [cit. 2010-04-24]. *Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty*. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [4] HW.cz [online]. Prosinec 2001 [cit. 2010-04-24]. *Jak na převodník SMT160-30-92*. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Programovani/ART387-Jak-na-prevodnik-SMT160-30-92.html>>.
- [5] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR: ATmega16*. Praha: BEN, 2006. 319 s. ISBN 80-7300-178-8.
- [6] GESHEIDTOVÁ, E.; REZ, J.; STEINBAUER, M. *Měření v elektrotechnice*. Brno : VUTIUM, 2002. 241 s.
- [7] U.S. Sensor [online]. C2010 [cit. 2010-04-24]. *NTC Thermistor*. Dostupné z WWW: <[http://www.ussensor.com/prod\\_Probes\\_NTC.html](http://www.ussensor.com/prod_Probes_NTC.html)>.
- [8] Omega Engineering [online]. 2010 [cit. 2010-04-24]. *Precizní termistorová čidla*. Dostupné z WWW: <[http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=44000\\_THERMIS\\_ELEMENTS&Nav=temd01](http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=44000_THERMIS_ELEMENTS&Nav=temd01)>.
- [9] Telemeter Electronic s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2011-04-26]. *Katalogový list termistorových senzorů*. Dostupné z WWW: <[http://www.telemeter.info/documents/ntc\\_termistory.pdf](http://www.telemeter.info/documents/ntc_termistory.pdf)>.
- [10] TI.com [online] Srpen 2005 [cit. 2011-04-26]. *INA2126 Micropower Instrumentation Amplifier Single and Dual Versions*. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ina2126.html>>.
- [11] HW.cz [online]. Prosinec 1999 [cit. 2010-04-24]. *Peltierovy termobaterie*. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART652-Peltierovy-termobaterie.html>>.

- [12] KUBINA, Pavel. *Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů*. Automa [online]. 24. 5. 2005, č.11, [cit. 2010-04-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=30765](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765)>.
- [13] Automa [online]. 2003, č. 3, [cit. 2010-04-25]. *Co znamená PID*. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=28768](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28768)>.
- [14] Future Technology Devices International Ltd. [online]. 2011 [cit. 2011-05-02]. *FT232R USB UART IC* Dostupný z WWW: <[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)>.
- [15] HW.cz [online]. Květen 2000 [cit. 2010-05-04]. *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití* Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/teorie-praxe/navrhy-vyvojare/art1922-strucny-popis-sbornice-i2c-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-e>>.
- [16] Texas Instruments [online]. Srpen 2007 [cit. 2011-05-04]. *TMP275, 0.5C Digital Out Temperature Sensor*. Dostupný z WWW: <<http://www.ti.com/lit/gpn/tmp275>>.
- [17] BESTune. *Three Types of PID Equations* Srpen 2002 [online]. [cit. 2011-05-13] Dostupný z WWW: <<http://bestune.50megs.com/typeABC.htm>>.
- [18] BLAHA, Petr, VAVŘÍN, Petr. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů*. Vysoké učení technické v Brně. 215 s.
- [19] KLÁN, P.: *Zieglerovo-Nicholsovo nastavení PID regulátoru retrospektiva*. Automa, 2000, č. 1, s. 54.
- [20] YU, Cheng-Ching. *Autotuning of PID controllers: A relay feedback approach*. 2nd edition. Germany: Birkäuser, 2006. 261 s. ISBN 1846280362.
- [21] BiProg ISP programátor Červenec 2008 [online]. [cit. 2011-05-13]. *Biprog - another AVR programmer*. Dostupný z WWW: <<http://web.quick.cz/ruckl/biprog/biprog.html>>.
- [22] Peter Fleury's Home Page [online]. [cit. 2011-05-13]. *Microcontroller I2C LCD UART library*. Dostupný z WWW: <<http://jump.to/fleury>>.

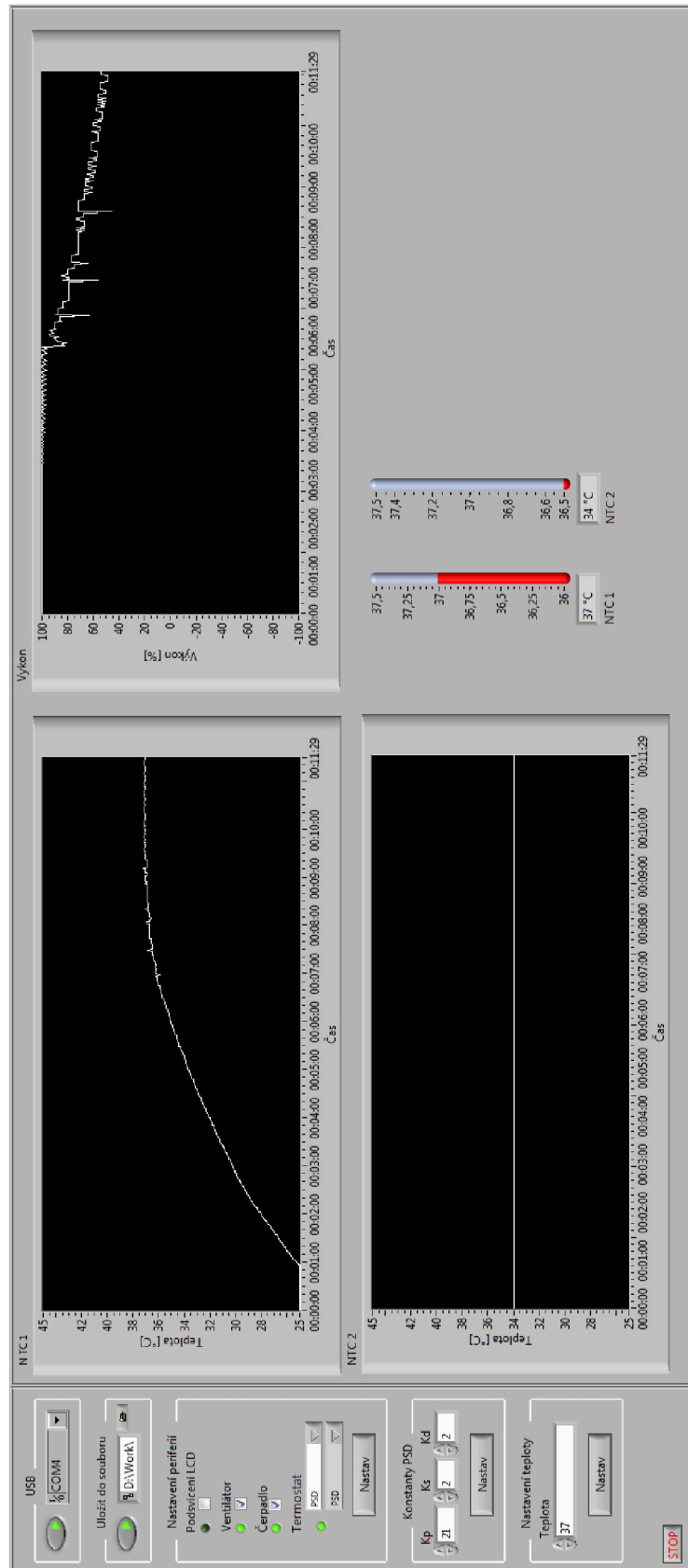
## SEZNAM VELIČIN A ZKRATEK

A/D	Analogově/Digitální převodník
AV char.	Ampér-Voltova charakteristika
BOTTOM	Vrstva DPS ze strany spojů
DPS	Deska Plošného Spoje
I2C	Inter-Integrated Circuit
MCU	Mikrokontrolér – MicroController Unit
MISO	Master In, Slave Out
MOSI	Master Out, Slave In
NTC	Termistor se záporným teplotním koeficientem – Negative Temperature Coefficient
PID	Proporcionálně Integračně Derivační
PN	Přechod vzniklý z polovodiče s děrovou vodivostí P a z polovodiče s elektronovou vodivostí N
PSD	Proporcionálně Sumačně Diferenční
PTC	Termistor s kladným teplotním koeficientem – Positive Temperature Coefficient
PWM	Pulse Width Modulation – Pulsně šířková modulace
$R_T(t)$	Odpor termistoru při teplotě $t$
SDA	Synchronous Data
SCL	Synchronous Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
$t$	Celsiova teplota
$T$	Termodynamická teplota
TOP	Vrstva DPS ze strany součástek
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter

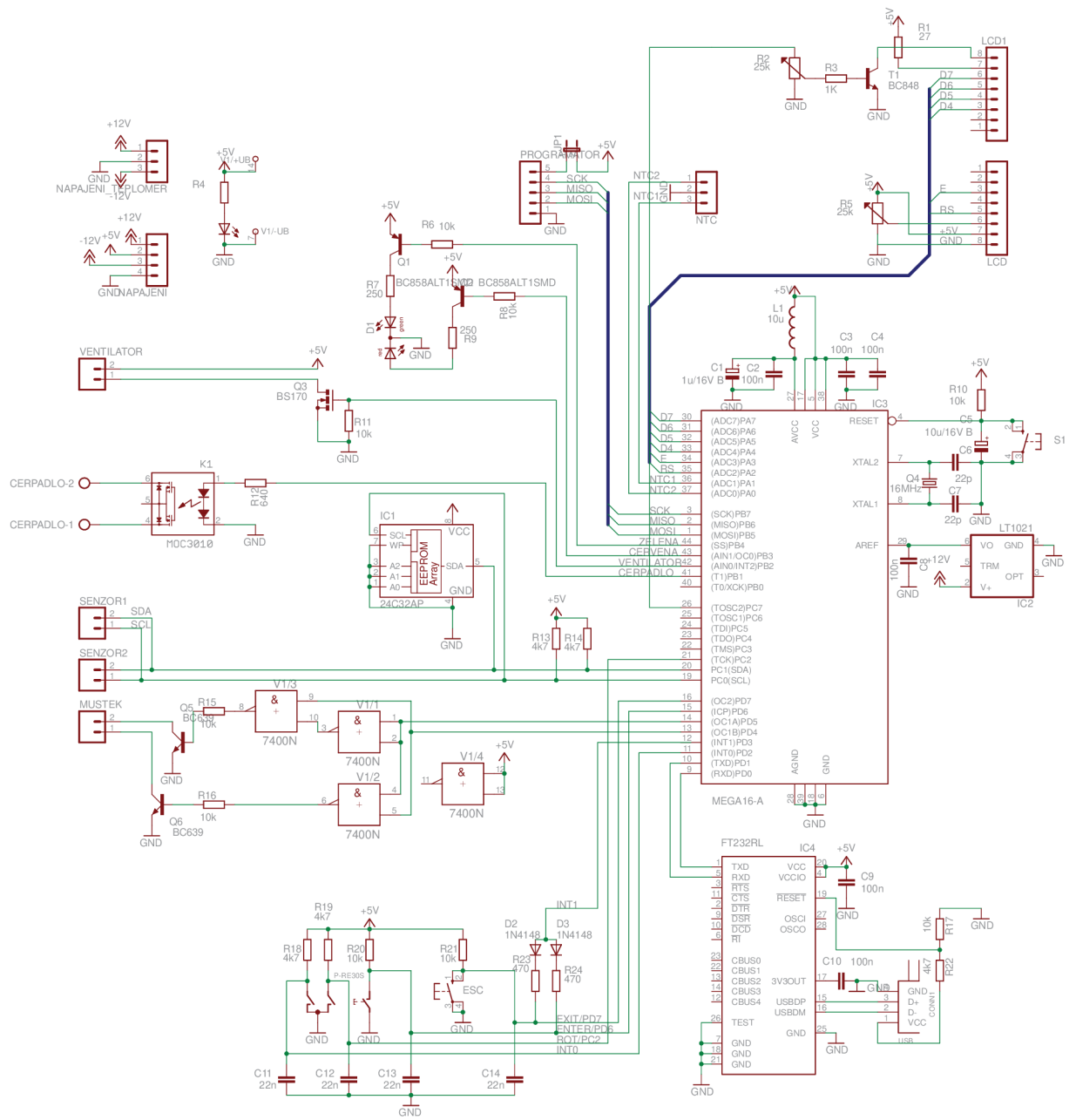
# PŘÍLOHY



## B PROGRAM V LABVIEW

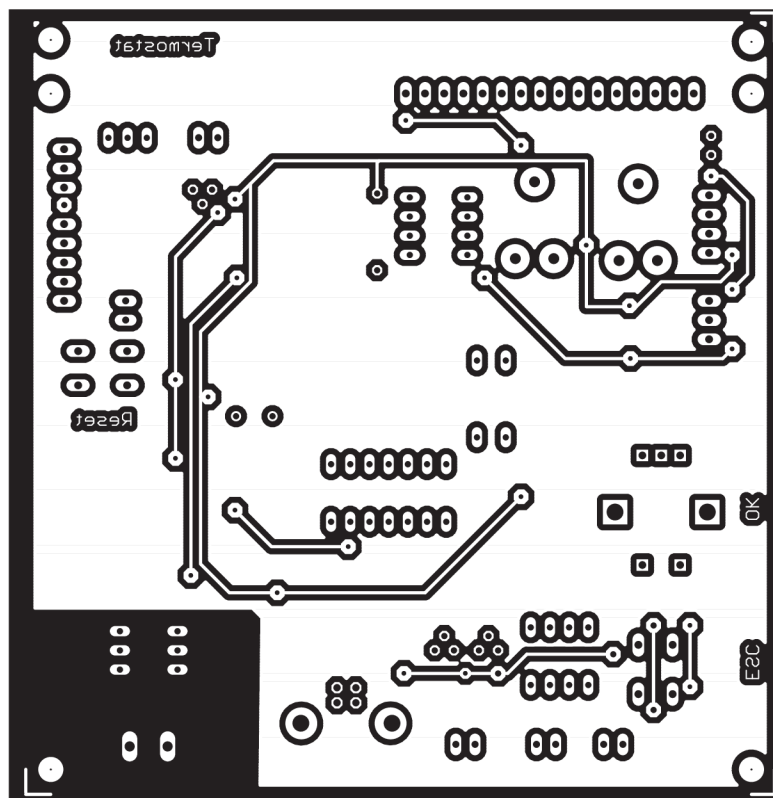


# C ŘÍDÍČÍ ČÁST

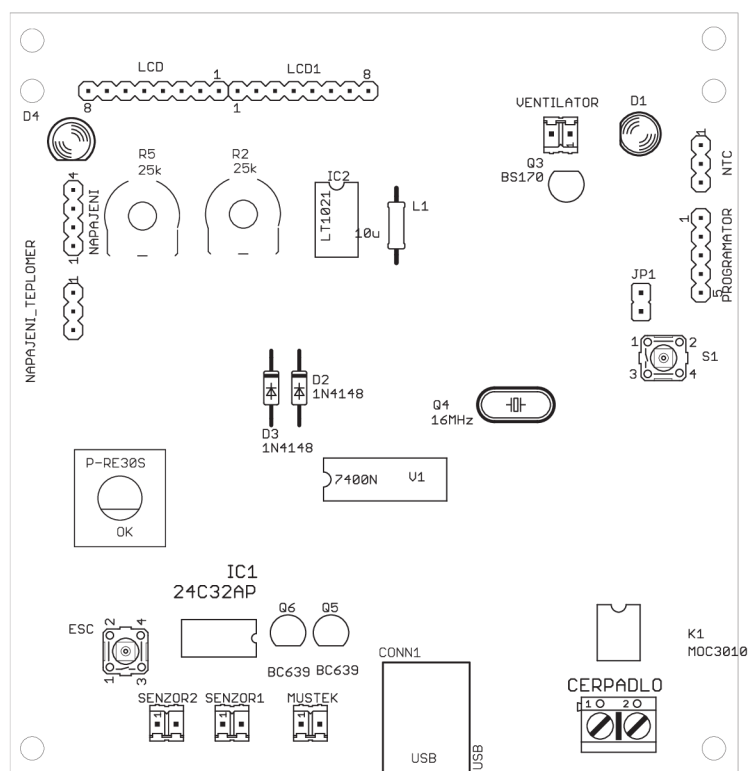


Obr. C.1: Schéma zapojení řídicí části

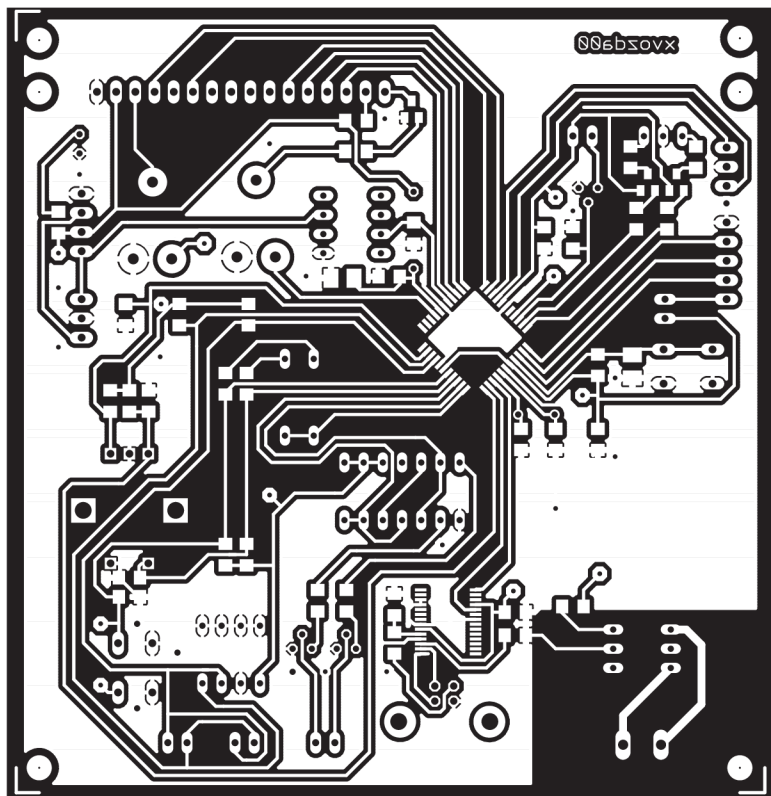




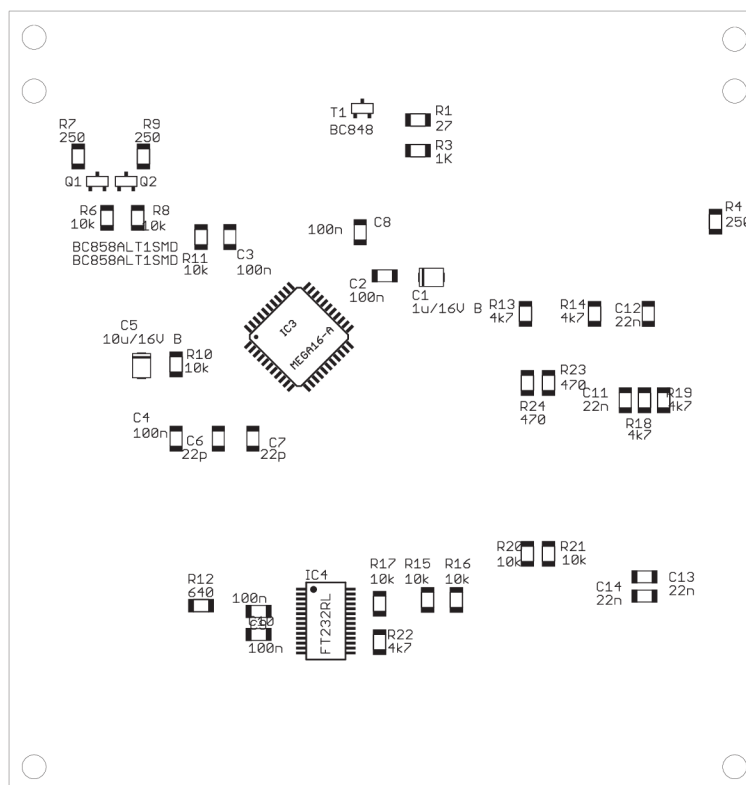
Obr. C.2: Předloha pro výrobu DPS ze strany součástek „top“, měřítko 1:1



Obr. C.3: Osazovací plán strany „top“



Obr. C.4: Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1

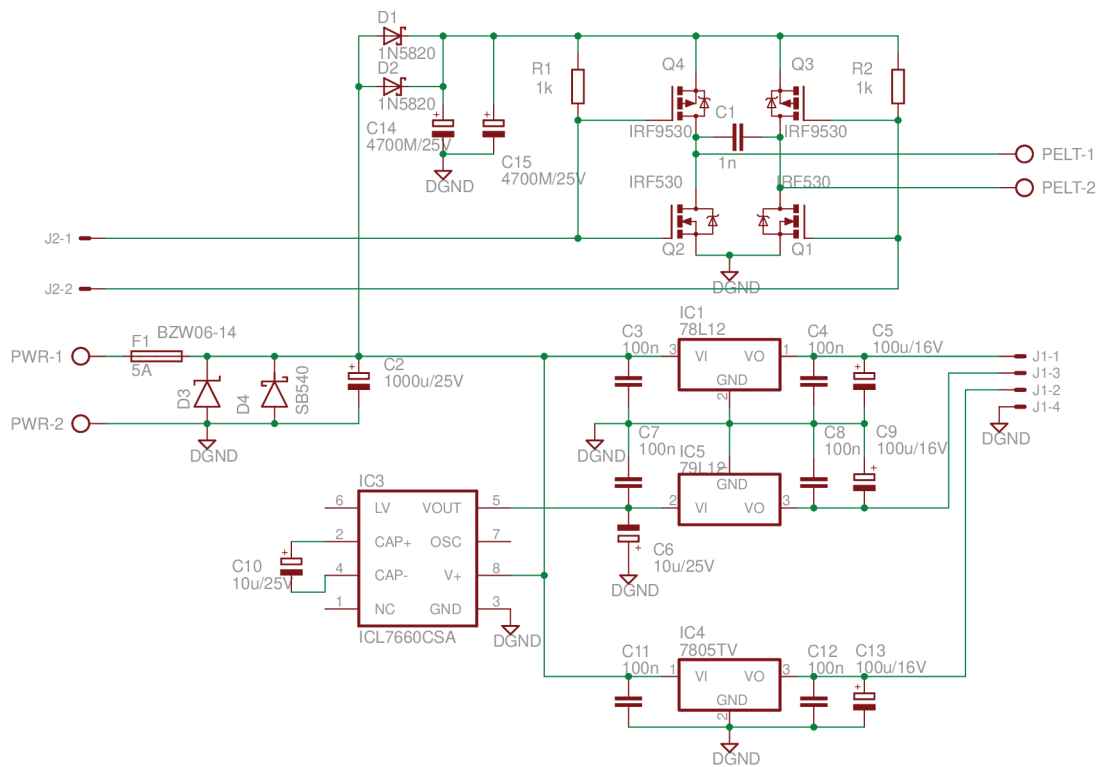


Obr. C.5: Osazovací plán strany „bottom“

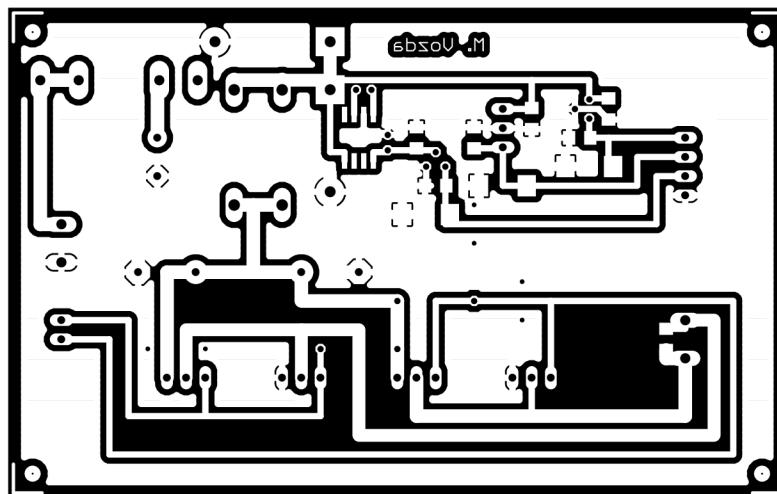
Tab. C.1: Rozpiska součástek pro řídicí část

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R1	27 $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R4, R7, R9	250 $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R23, R24	470 $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R12	640 $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R3	1 k $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R13, R14, R18, R19, R22	4,7 k $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R6, R8, R10, R11, R15, R16, R17, R20, R21	10 k $\Omega$	R1206	0,25 W, SMD
R2, R5	25 k $\Omega$ , lin.	PT10V	Trimr ležatý, 0,15 W
C6, C7	22 pF	C1206	Keramický, SMD
C11, C12, C13, C14	22 nF	C1206	Keramický, SMD
C2, C3, C4, C8, C9, C10	100 nF	C1206	Keramický, SMD
C1	1 $\mu$ F/16 V B	CTS-B	Tantalový, SMD
C5	10 $\mu$ F/16 V B	CTS-B	Tantalový, SMD
L1	10 $\mu$ H	TLEC24-100K	0.72 $\Omega$ , 370 mA
D1	L-59EGW	DUOLED5MM	Dvoubarevná LED
D4	L-53GD	LED5MM	Zelená LED
D2, D3	1N4148	DO35-10	75 V/0,2 A
Q1, Q2	BC858A	SOT23-BEC	Bip. tran. PNP
Q3	BS170	SOT54E	Unip. tran. N-kanal
Q5, Q6	BC639	SOT54D	Bip. tran. NPN
T1	BC848	SOT23	Bip. tran. NPN
Q4	16 MHz	HC49U-V	Kdystal 16 MHz
IC1	24C32AP	DIP8	I2C EEPROM
IC2	LT1021	DIP8	Nap. reference 5 V
IC3	MEGA644-A	TQFP44	MCU
IC4	FT232RL	SSOP28	USART/USB
V1	7400N	DIP14	4xNAND
K1	MOC3010	DIP06	Optorele
CERPADLO	AK500/2		Svorkovnice
CONN1	USB1X90B PCB		Zasuvka typu B
LCD		MA08-1	Lámací lišta 8 pinů
LCD1		MA08-1	Lámací lišta 8 pinů
MUSTEK, SENZOR1, SENZOR2, VENTILATOR	PSH02-02PG	02P	Konektor 2 piny
NAPAJENI_TEPLOMER, NTC	PSH02-03PG		Konektor 3 piny
NAPAJENI	PSH02-04PG		Konektor 4 piny
PROGRAMATOR	PSH02-05PG		Konektor 5 pinů
JP1			Jumper 2 piny
ESC	P-B1721B	B3F-10XX	Mikrospínač do DPS
S1	P-B1721B	B3F-10XX	Mikrospínač do DPS
OK	P-RE30S		Rot. kódér 30 imp./ot.

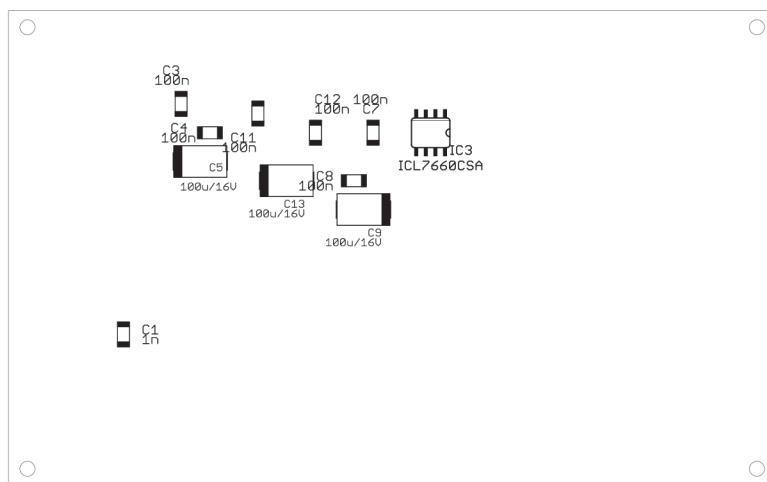
## D NAPÁJECÍ ČÁST



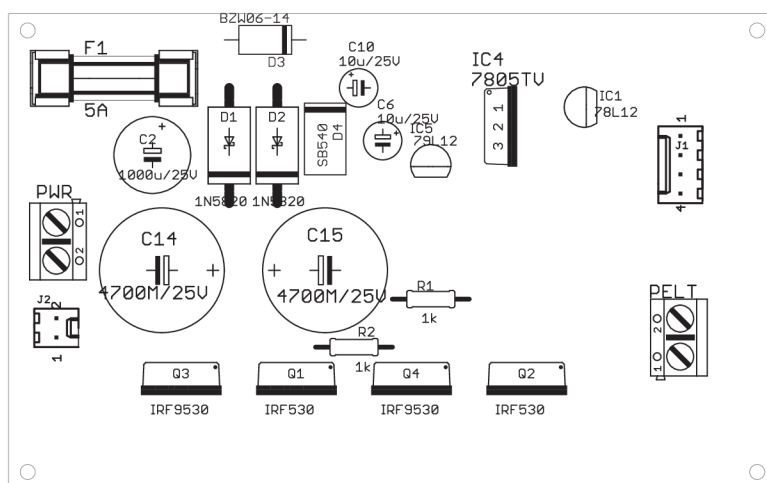
Obr. D.1: Schéma zapojení napájecí části



Obr. D.2: Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1



Obr. D.3: Osazovací plán strany „bottom“

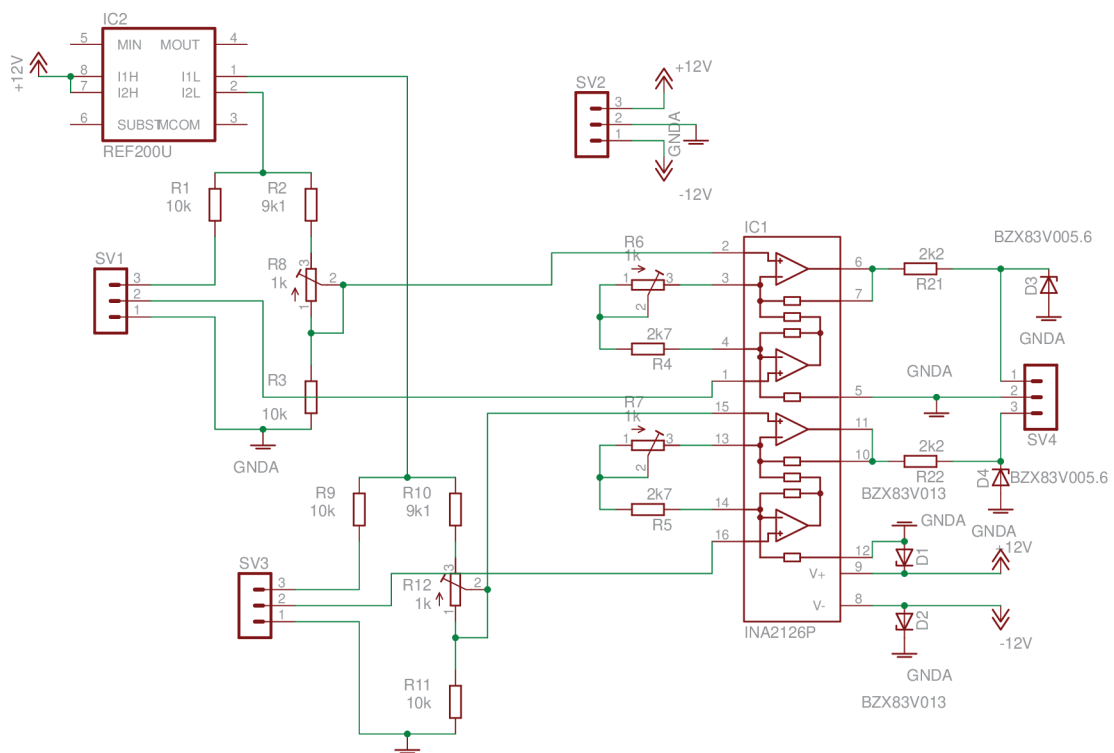


Obr. D.4: Osazovací plán strany „top“

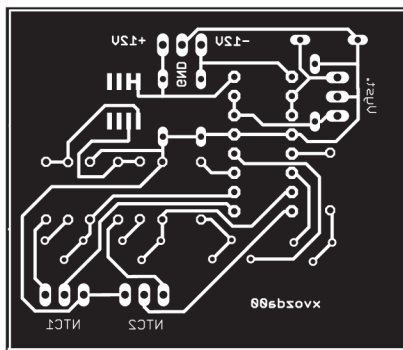
Tab. D.1: Rozpiska součástek pro napájecí část

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R1, R2	1 k $\Omega$	0207/10	0,25 W
C1	1 nF	C1206	Keramický, SMD
C3 , C4, C7, C8, C11, C12	100 nF	C1206	Keramický, SMD
C6, C10	10 $\mu$ F/25 V D	CTS-D	Tantalový SMD
C5, C9, C13	100 $\mu$ F/16 V D	CTS-D	Tantalový SMD
C2	1000 $\mu$ F/25 V	E5-10,5	Elyt., radiální
C14 , C15	4700 $\mu$ F/25 V	E7,5-16	Elyt., radiální
D1, D2	1N5820	DO201T15	Shottkyho dioda 20 V/3 A
D3	BZW06-14	DO15UN	Transil unip. 15 V
D4	SB540	DO201	Shottkyho dioda 40 V/5 A
Q1, Q 2	IRF530	TO220BV	Unip. tran. N-kanál
Q3, Q4	IRF9530	TO220BV	Unip. tran. P-kanál
F1	5 A	SHK20L	Pojistka
IC1	78L12	TO92	Stabilizátor +12 V, 0,1 A
IC3	ICL7660CSA	SO08	DC-DC měnič
IC4	7805TV	TO220V	Stabilizátor +5 V/1 A
IC5	79L12	TO92	Stabilizátor -12 V/0,1 A
J1	PSH02-04P		Konektor 4 piny
J2	PSH02-02P		Konektor 2 piny
PELT, PWR	AK500/2		Svorkovnice

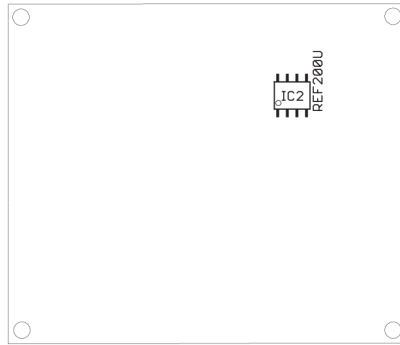
# E MĚŘICÍ ČÁST



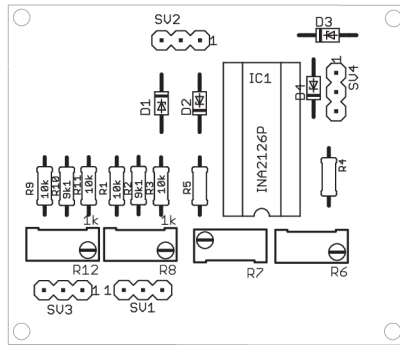
Obr. E.1: Schéma zapojení měřicí části



Obr. E.2: Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1



Obr. E.3: Osazovací plán strany „bottom“



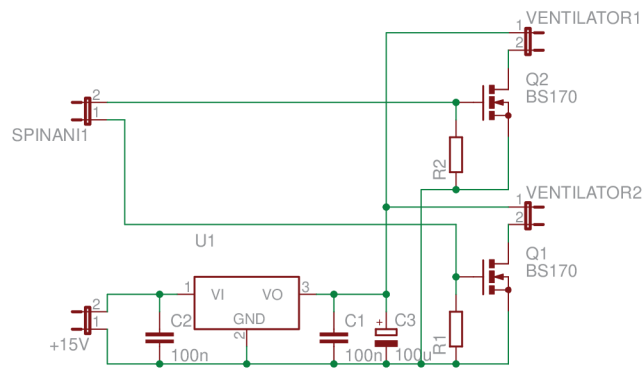
Obr. E.4: Osazovací plán strany „top“

Tab. E.1: Rozpiska součástek pro měřicí část

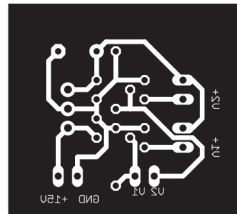
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R6 , R7, R8, R12	1 k $\Omega$	RTRIM64Y	Víceotáčkový trimr, stojatý
R21, R22	2,2 $\Omega$	0204/7	0,25 W
R4, R5	2,7 $\Omega$	0204/7	0,25 W
R2 , R10	9,1 $\Omega$	0204/7	0,25 W
R1, R3, R9, R11	10 k $\Omega$	0204/7	0,25 W
D3, D4	BZX83V005.6	DO34Z7	Zenerova dioda 5,6 V
D1 , D2	BZX83V013	DO34Z7	Zenerova dioda 13 V
IC1	INA2126P	DIP16	Přístrojový zesilovač
IC2	REF200U	SO08	Proudová reference
SV1, SV2, SV3, SV4	PSH02-03PG		Konektor 3 piny



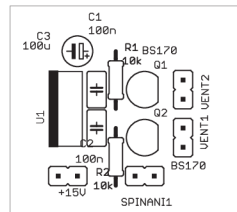
## F SPÍNÁNÍ VENTILÁTORŮ



Obr. F.1: Schéma zapojení pro spínání ventilátorů



Obr. F.2: Předloha pro výrobu DPS ze strany spojů „bottom“, měřítko 1:1



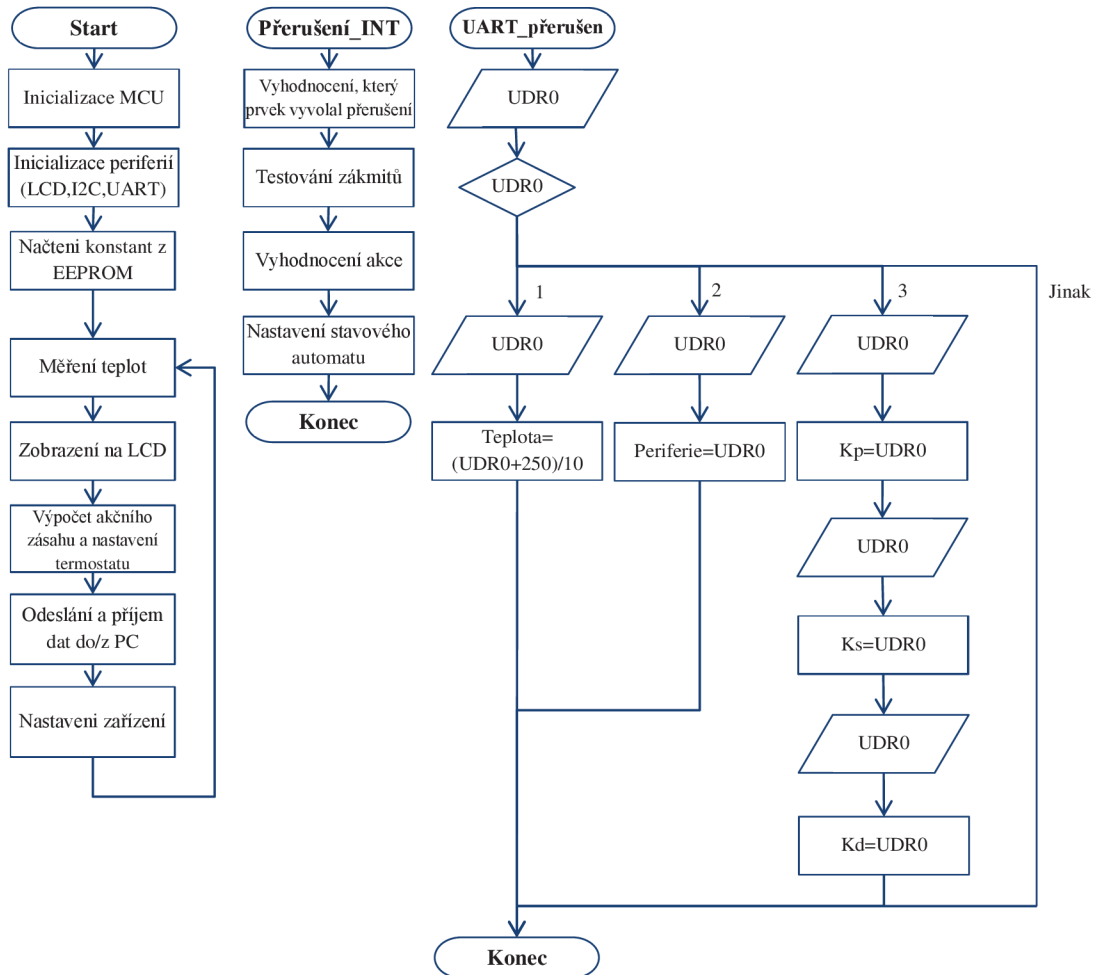
Obr. F.3: Osazovací plán strany „top“

Všechny předlohy pro výrobu DPS jsou vytvořeny pro technologii s negativním fotorezistem tzn. neosvětlené části se odleptají. Předlohy jsou zrcadleny pro tisk na pauzovací papír nebo fólii a při osvitu se přikládají potištěnou stranou k desce.

Tab. F.1: Rozpiska součástek pro spínání ventilátorů

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R1, R2	10 k $\Omega$	0204/7	0,25 W
C1, C2	100 nF	C025	Keram., rozeč 2,54 mm $U_C > 15$ V
C3	100 $\mu$ /16 V	E5-4	Elyt. Radiální
Q1, Q2	BS170	SOT54E	Unip. tran. N-kanál
U1	7812-STM	TO-220S	Stabilizátor +12 V/1,5 A
VENT1, VENT2, +15V, SPINANI	PSH02-02		Konektor 2 piny

# G VÝVOJOVÉ DIAGRAMY PROGRAMU MIKROKONTROLÉRU



## H POPIS KONEKTORŮ A OVLÁDACÍCH PRVKŮ ZAŘÍZENÍ

