

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Regulátor teploty laboratorní testovací komory  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dalibor Ficek**  
Osobní číslo: **I20035**  
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**  
Téma práce: **Regulátor teploty laboratorní testovací komory**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace elektronického regulátoru teploty uvnitř laboratorní testovací komory. Komora bude určena k testování teplotní závislosti parametrů elektronických komponent. K řízení teploty bude využit mikropočítač s implementovaným PSD regulátorem. Pro realizaci jednotky mikropočítače může být využit zvolený vývojový kit, obsahující příslušné podpůrné obvody mikropočítače. Firmware mikropočítače bude realizován v jazyce C, například v prostředí IDE Atmel (Microchip) studia. Jako akční člen pro řízení teploty bude použit polovodičový elektronický prvek – „Peltierův článek“. Součástí řešení práce bude i návrh mechanického řešení testovací komory. Kompletní realizace zařízení bude provedena na úrovni prototypového řešení a jejího základního testování. Součástí práce bude řešení tematického zaměření práce, kompletní výrobní dokumentace konstrukčního řešení, okomentované zdrojové kódy firmware mikropočítače a podrobný uživatelský manuál.

Rozsah pracovní zprávy: **40**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Aplikace mikrokontrolérů řady Atmel SMART SAM D na bázi ARM Cortex-M0+ CPU, 1. vydání, BEN – technická literatura, 2016, ISBN 978-80-7300-531-3  
MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4  
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4  
MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 9. ledna 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Regulator teploty laboratorní testovací komory jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 11. 5. 2023

Dalibor Ficek v. r.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji mému vedoucímu práce Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné rady při tvorbě této práce.

Dále za veškerou podporu děkuji svým blízkým a výjimečnému školnímu kolektivu, který se při tomto studiu sešel.

## **ANOTACE**

Tato práce se týká návrhu a konstrukce malé teplotně regulovatelné komory s Peltierovým článkem jako akčním členem s přesně nastavitelnou teplotou a možností měřit teplotní závislosti určitých součástek. Práce dále obsahuje měření teplotních závislostí určitých součástek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PID, regulace, komora, teplota, peltier

## **TITLE**

Laboratory test chamber temperature controller

## **ANNOTATION**

This work is about design and construction of a small chamber with controlled temperature with Peltier cell as an actuator and with the ability to measure the change of value of some temperature dependent electronic components. This work also contains measurements of some of those temperature dependent electronic components.

## **KEYWORDS**

PID, control, chamber, temperature, peltier

# OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....	11
ÚVOD.....	12
1. REŠERŠE .....	13
1.1 Termoelektrické jevy .....	13
1.2 Peltierův článek.....	13
1.3 Chlazení a izolace akčního členu.....	15
1.3.1 Chladiče .....	15
1.3.2 Teplovodivá pasta .....	16
1.3.3 Pěnový polystyren.....	16
1.4 Měření teploty.....	17
1.4.1 Jednočipová PN polovodičová čidla.....	17
1.4.2 Termočlánky .....	17
1.4.3 NTC termistory .....	18
1.4.4 RTD čidla.....	19
1.5 Silové spínací prvky.....	20
1.5.1 Typy .....	20
1.5.2 H-můstek.....	21
1.6 Způsoby regulace.....	22
1.6.1 On/Off regulace .....	22
1.6.2 PID regulace .....	23
1.6.2.1 P složka .....	23
1.6.2.2 I složka .....	24
1.6.2.3 D složka .....	24
2. ZAŘÍZENÍ.....	25
2.1 Obvod Peltierova článku a chlazení modulu .....	25
2.1.1 Modul TEC1-12706.....	25
2.1.2 Napájecí napětí modulu TEC1-12706 .....	26
2.1.3 Odvod tepla z modulu TEC1-12706.....	27

2.1.4 Spínání ventilátoru chladiče.....	28
2.1.5 H-můstek BTS7960B.....	28
2.2 Období logického řízení a měření.....	29
2.2.1 Vývojový modul Arduino UNO .....	29
2.2.2 Teploměr DS18B20 .....	31
2.2.2.1 One-Wire .....	32
2.2.3 Oddělení silové části pomocí LM358N .....	32
2.2.4 Zobrazovač.....	33
2.2.5 Odesílání dat do počítače .....	34
2.2.6 Měřicí obvod.....	35
2.2.7 Obvod měření výkonu .....	35
2.3 Napájení.....	36
2.3.1 Napájení akčního členu.....	36
2.3.2 Napájení ostatní elektroniky .....	37
2.4 Programové vybavení a chování programu .....	38
2.4.1 Běh programu .....	38
2.4.2 Menu .....	41
2.4.3 Funkce regulace .....	41
2.4.3.1 Generování PWM .....	43
2.5 Návod k použití.....	45
2.6 Měření.....	48
2.6.1 Teplotní stabilita, rozsah, přesnost .....	48
2.6.2 Naměřené výsledky diod .....	49
2.7 Konstrukce .....	51
ZÁVĚR .....	52
POUŽITÁ LITERATURA .....	55
SEZNAM PŘÍLOH.....	58
OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD NOSIČE .....	67



## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Peltierův článek (Peltierův jev, 2006) .....	14
Obrázek 2: Peltierova baterie (v praxi nazývaná Peltierův článek), uspořádání článků (Peltierův jev, 2006) .....	14
Obrázek 3: Příklad vzduchového chladiče s ventilátorem (Chladiče a ventilátor 12V k Peltierovému článku, 2023) .....	15
Obrázek 4: Typický termočlánek často dodávaný s multimetry (Thermocouple, 2023).....	18
Obrázek 5: Příklady konstrukce NTC termistorů (NTC Thermistor, 2019).....	19
Obrázek 6: Příklad konstrukcí RTD čidel (Designing with RTD Temperature sensors, 2023) .....	20
Obrázek 7: Příklad zapojení H-můstku (What Is an H-Bridge?, 2023).....	22
Obrázek 8: Modul TEC1-12706 (Peltierův článek TEC1-12706, 2023).....	25
Obrázek 9: Křivky koeficientu účinnosti (TEC1-12706, 2023) .....	27
Obrázek 10: Použitý modul spínače (Výkonový spínač MOSFET PWM 15A 400W).....	28
Obrázek 11: Modul H-můstku (H-můstek BTS7960B pro stejnosměrné motory, 2023).....	29
Obrázek 12: Vývojový kit Arduino UNO (Arduino, 2023).....	30
Obrázek 13: Teploměr DS18B20 ve vodotěsném provedení (Teplotní sonda DS18B20 100cm) .....	31
Obrázek 14: Použitý modul zobrazovače (Displej OLED, 2023) .....	34
Obrázek 15: Schéma zapojení měřicího obvodu s příkladem zapojení měřené součástky (diody).....	35
Obrázek 16: Schéma zapojení obvodu měření výkonu .....	36
Obrázek 17: Modul step-down měniče pro akční člen (Napájecí modul, step-down měnič 6-40V/1,5-35V 20A, 2023).....	37
Obrázek 18: Modul step-down měniče pro napájení elektroniky (Napájecí modul, step-down měnič 3A s LM2596, 2023).....	38
Obrázek 19: Princip chování celého programu.....	40
Obrázek 20: Mapa menu.....	41
Obrázek 21: Chování funkce regulace.....	42
Obrázek 22: Mapa menu.....	46
Obrázek 23: Ovládací prvky .....	47
Obrázek 24: Příklad vzhledu odeslaných informací do PC .....	47
Obrázek 25: Ukázka zakončení měření .....	47

Obrázek 26: Odezva systému na skokovou změnu požadované teploty v čase 0 na 60°C (okolní teplota 20°C).....	48
Obrázek 27: Teplotní závislost diody 1N4007 .....	49
Obrázek 28: Teplotní závislost diody BAV21.....	50
Tabulka 1: Seznam parametrů .....	54

## **SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

EPS – Expandovaný Polystyren

NTC – Negative Temperature Coefficient, záporný teplotní koeficient

RTD – Resistance Temperature Detectors, odporové teplotní čidlo

AD – analogově digitální

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

PID – Proporcionálně Integračně Derivační

USB – Universal Serial Bus

PC – osobní počítač

PWM – Pulse width Modulation, pulsně šířková modulace

OLED – Organic Light Emitting Diode, zobrazovač

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

GND – zem

DC – stejnosměrný proud

IDE – integrované vývojové prostředí

## ÚVOD

Na trhu existují velké a nákladné testovací komory součástek. Tyto komory jsou obvykle navrženy pro použití v průmyslových podmínkách. Tato práce se týká vytvoření velmi jednoduché, ale stále schopné malé testovací komory v domácích podmínkách. Hlavním cílem je vytvoření schopného měřicího zařízení s dobrým propracovaným softwarem a jednoduchým funkčním hardwarem.

První část práce se týká zjišťování informací o tom, jak vlastně pracovat s teplem a Peltierovým článkem, jak jej měřit, jak jej izolovat, jak jej regulovat, jaká elektronika se má použít atd.

Druhá část práce se týká již samotného experimentování se zařízením, popisu funkčních dílů a dosahování co nejlepších vlastností jednoduché komory. Celé vytvoření zařízení je od začátku pojato experimentálním způsobem, tedy bez výpočtů tepelných soustav, s nastavením parametrů metodou pokus-omyl, zjištěním skutečných parametrů zařízení pokusným měřením apod. Také je zde popsán již složitější program pro zařízení. Díky propracovanosti programu však zařízení disponuje mnoha užitečnými funkcemi a intuitivním ovládním. Jsou zde také obsažena měření na reálných součástkách a výsledné chování tohoto zařízení.

Nakonec je v práci také obsažena konstrukce zařízení, která je však velmi subjektivní a může být mechanicky zkonstruována také úplně jinak díky modularitě celého zařízení, které je dosaženo použitím převážně již hotových elektronických modulů.

# 1. REŠERŠE

## 1.1 Termoelektrické jevy

Termoelektrické jevy jsou fyzikální jevy, které se vyskytují v materiálech při změnách teploty. Konkrétně jde o tři hlavní jevy: Seebeckův efekt, Peltierův efekt a Thomsonův efekt.

Seebeckův efekt je jev, při kterém se vodič nebo polovodič zahřeje na jednom místě a ochladí na místě druhém. Tento rozdíl teploty vodiče vytváří rozdíl v elektrickém potenciálu, což způsobuje tok elektronů a vznik elektrického proudu. Tento jev se využívá v termoelektrických generátorech. (Seebeckův jev, 2006)

Peltierův efekt je opačným jevem k Seebeckovu efektu. Při Peltierově jevu se vodič nebo polovodič zahřívá nebo ochlazuje vlivem připojení k zdroji elektrického proudu. Tím se vytváří rozdíl teplot na různých místech materiálu, což může být využito k vytvoření chladícího zařízení. (Peltierův jev, 2006)

Thomsonův efekt je jev, při kterém se vodič nebo polovodič zahřívá nebo ochlazuje při průchodu elektrického proudu. Rozdíl teploty způsobuje změnu v elektrickém potenciálu, což má vliv na tok elektronů a tím i na vytvoření termoelektrického pole. Tento jev se využívá například k měření teploty. (Thomsonův jev, 2006)

Termoelektrické jevy mají mnoho praktických aplikací, jako jsou termoelektrické generátory, chladící zařízení a senzory teploty.

## 1.2 Peltierův článek

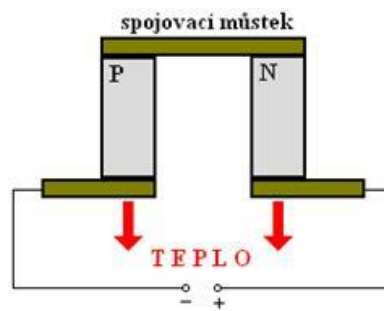
Peltierův článek je elektrický obvod, který využívá Peltierův efekt k chlazení nebo ohřevu. Jedná se o zařízení, které se skládá z několika vodičů nebo polovodičů spojených v obvodu a připojených ke zdroji elektrického proudu.

Každý prvek v Peltierově článku je tvořen dvěma vrstvami vodiče nebo polovodiče, které jsou navzájem odděleny tenkou vrstvou izolantu. Na jedné straně článku jsou prvky připojeny ke zdroji proudu, na druhé straně jsou odděleny.

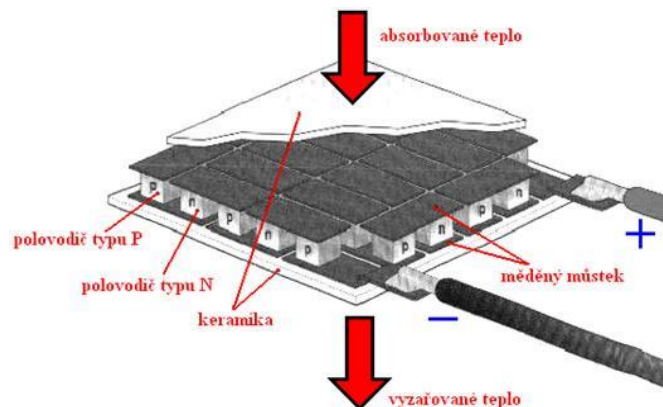
Při zapojení zdroje proudu vzniká v článku rozdíl teplot mezi jeho konci. Elektrony vodiče nebo polovodiče se pohybují směrem k místu, kde jsou připojeny ke zdroji proudu, a na místě uvolňují teplo. Na místě, kde jsou odpojeny, se elektrony spojují s kladně nabitými atomy vodiče nebo polovodiče a tím se místo ochlazuje. (Peltierův jev, 2006)

Při chlazení je důležité, aby byl Peltierův článek co nejvíce chlazen, aby teplo bylo co nejlépe odváděno. Při ohřevu je naopak důležité, aby byl článek co nejvíce izolován, aby teplo zůstalo uvnitř.

Peltierovy články jsou využívány například v termoelektrických chladících zařízeních pro chlazení elektroniky nebo v medicíně pro terapeutické účely. Mohou být také využívány jako generátory elektrického proudu z tepla, například v kosmických sondách nebo v aplikacích pro snímání teploty.



Obrázek 1: Peltierův článek (Peltierův jev, 2006)



Obrázek 2: Peltierova baterie (v praxi nazývaná Peltierův článek), uspořádání článků (Peltierův jev, 2006)

## 1.3 Chlazení a izolace akčního členu

### 1.3.1 Chladiče

Existuje mnoho různých způsobů chlazení elektronických součástek, zde je popsáno několik běžných typů:

**Přirozené chlazení:** Tento způsob využívá pasivních přirozených tepelných proudů, které vycházejí z elektronických součástek nebo chladičů a proudí do okolního prostředí, aby se snížila jejich teplota.

**Chlazení vzduchem:** Tento typ využívá nucené proudění vzduchu k odvodu tepla z elektronických součástek. Používá se ventilátor, který přivádí čerstvý vzduch do oblasti, kde jsou součástky umístěny.

**Chlazení vodou:** Tento způsob využívá vody k odvodu tepla z elektronických součástek. Voda je přiváděna k chladicímu bloku, který je umístěn přímo na součástkách. Zde se ohřeje a je poté odváděna pryč, aby se znovu ochladila.

**Chlazení kapalinami:** Tento typ využívá kapalinu, jako je například olej, k odvodu tepla z elektronických součástek. Kapalina je přiváděna k součástkám, kde se ohřeje a poté je odváděna pryč a ochlazena.



Obrázek 3: Příklad vzduchového chladiče s ventilátorem (Chladiče a ventilátor 12V k Peltierovému článku, 2023)

### 1.3.2 Teplovodivá pasta

Teplovodivá pasta se používá ke zlepšení přenosu tepla mezi dvěma povrchy. Obvykle se aplikuje mezi součástkou a chladičem v počítačích a jiných elektronických zařízeních, aby se zlepšil přenos tepla ze součástky na chladič a tím se snížila teplota součástky.

Teplovodivá pasta obsahuje vysokou koncentraci dobře tepelně vodivých jemných částic, jako je oxid křemičitý, stříbro nebo diamantový prášek, které umožňují rychlejší a účinnější přenos tepla mezi dvěma povrchy. Bez teplovodivé pasty by mohlo dojít k přehřátí součástky, což by mohlo vést k jejímu poškození. (Types of Thermal Paste (Grease), 2021)

### 1.3.3 Pěnový polystyren

Polystyren je termoplastický polymer vyráběný z monomeru styrenu. Je to typ plastu, který je známý pod obchodními názvy jako například Styrofoam nebo EPS (expandovaný polystyren). (Encyklopedie plastů: polystyreny (PS), 2023)

Pěnový polystyren se vyrábí z expandovaného polystyrenu, což je materiál, který se vyrábí pomocí vysokého tlaku a teploty, při které expandují polystyrenové kuličky. Tím vznikne lehký a pevný materiál, který se používá v mnoha různých oblastech, jako jsou například obaly, stavebnictví, výroba modelů nebo izolace. (Encyklopedie plastů: polystyreny (PS), 2023)

Pěnový polystyren má vynikající izolační vlastnosti díky jeho uzavřeným buněčným strukturám, které zabraňují přenosu tepla. Vnitřek materiálu je plný malých, těsně uzavřených buněk, které neumožňují volný přenos tepla. Z tohoto důvodu se tepelná energie nebo chlad nešíří snadno přes materiál. (Encyklopedie plastů: polystyreny (PS), 2023)

Díky těmto izolačním vlastnostem se pěnový polystyren používá pro izolaci stavebních konstrukcí, jako jsou například stěny, stropy, podlahy a střechy. Pěnový polystyren se také používá pro izolaci potrubí, nádrží a chladících zařízení.

Kromě svých izolačních vlastností má pěnový polystyren také nízkou hmotnost, což umožňuje snadnou manipulaci a instalaci. Toto je důvod, proč se tento materiál často používá v různých konstrukčních aplikacích, kde je nutné zajistit vysokou tepelnou izolaci při zachování lehkosti a pevnosti materiálu.



## 1.4 Měření teploty

Snímače teploty slouží k převádění teploty předmětu nebo prostředí na nějakou jinou veličinu jako je například elektrický odpor, napětí atd.

Existuje mnoho různých typů snímačů teploty, včetně termočlánků, NTC termistorů, RTD čidel a digitálních teplotních čidel. Každý typ snímače teploty má své výhody a nevýhody a je vybírán na základě specifických potřeb aplikace.

### 1.4.1 Jednočipová PN polovodičová čidla

PN polovodičová čidla pro měření teploty jsou čidla, která využívají vlastností polovodičů a PN přechodů k měření teploty. Tyto čidla jsou založena na změnách elektrických vlastností polovodičů v závislosti na teplotě. (Kester, 1999)

Jednočipová PN polovodičová čidla jsou čidla, která obsahují všechny potřebné obvody pro měření teploty na jednom čipu. Na čipu se nachází vstupní zesilovač, A/D převodník, referenční napětí a další potřebné obvody. (Kester, 1999)

Tyto čidla mohou měřit teplotu v širokém rozmezí, například -50 až + 150°C. Zpravidla mají vysokou přesnost, malé rozměry a nízkou spotřebu energie. Mají malý samoohřev. Čidla mohou mít analogový i digitální výstup. Analogový výstup má lineární závislost napětí na teplotě. Digitální výstup zase odesílá data sběrnici, například One-Wire, SPI apod. Pro měření teploty se používá detekce změny difuzního napětí polovodičového přechodu na teplotě. (Kester, 1999)

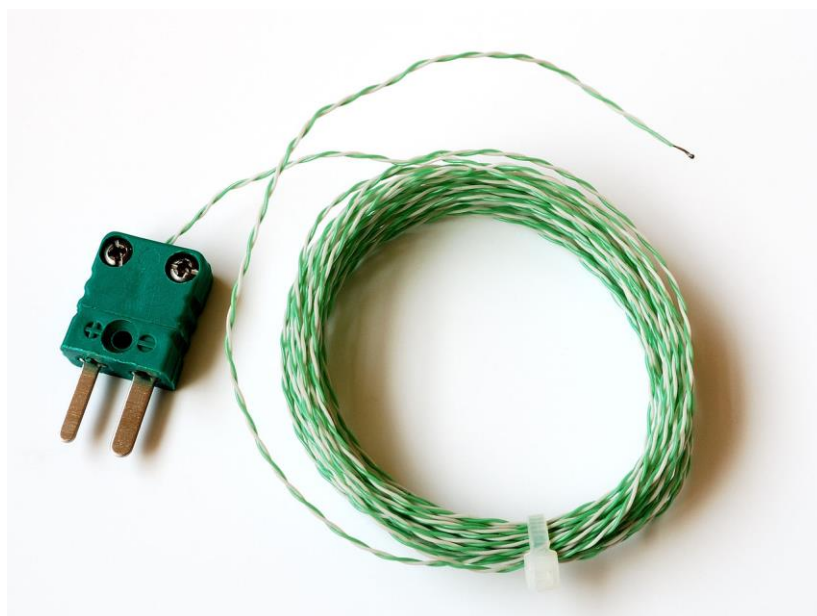
### 1.4.2 Termočlánky

Termočlánek je zařízení pro měření teploty, které využívá termoelektrického jevu, přesněji Seebeckova jevu. Skládá se z dvou kovových vodičů, které jsou na jednom konci spojeny dohromady a na druhém konci izolovány. Když se tyto dvě kovové části spojí, vznikne termoelektrické napětí, které je úměrné teplotnímu rozdílu mezi místem spojení a izolace. (Kester 1999)

Existuje mnoho druhů termočlánků, které se liší materiálem použitým pro vodiče. Nejběžnější termočlánky jsou K, J, T, E a N. Každý z těchto termočlánků má své vlastnosti a použití v různých aplikacích. (Kester 1999)

Termočlánky jsou výhodné pro měření teploty v extrémních podmínkách, jako jsou velmi vysoké nebo velmi nízké teploty, vysoké tlaky a chemicky agresivní prostředí. Jsou také snadno použitelné a mají malé rozměry. (Kester 1999)

Nicméně, termočlánky mají i některé nevýhody, jako jsou menší přesnost v porovnání s jinými způsoby měření teploty, potřebu vyššího napětí na měření a potřebu kalibrace v průběhu času. Navíc, termočlánky nejsou vhodné pro měření teplot v blízkosti teploty pokojové teploty kvůli jejich malé citlivosti v tomto rozmezí. Nedochází u nich však k samoohřevu. (Kester 1999)



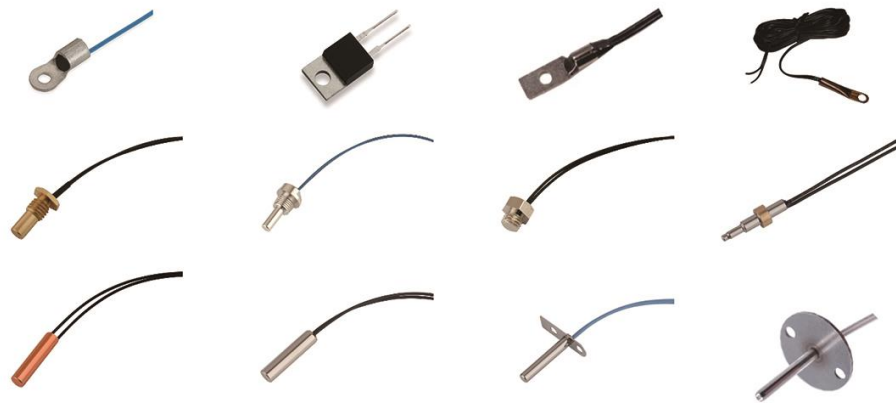
Obrázek 4: Typický termočlánek často dodávaný s multimetry (Thermocouple, 2023)

### 1.4.3 NTC termistory

NTC termistor (Negative Temperature Coefficient) je polovodičové teplotní čidlo, které mění svůj elektrický odpor v závislosti na teplotě. NTC termistor je tvořen kovovým diskem pokrytým vrstvou keramiky nebo plastu. Polovodičový materiál, který je použit pro výrobu termistoru, má vlastnost zvyšovat svůj elektrický odpor, když se teplota snižuje a snižovat svůj odpor, když se teplota zvyšuje. (Thermistor, 2023)

NTC termistory se používají v aplikacích, kde je třeba měřit teplotu v rozsahu například  $-50^{\circ}\text{C}$  až  $+150^{\circ}\text{C}$ . (Thermistor, 2023)

NTC termistory mají několik výhod, jako jsou vysoká citlivost na teplotu, rychlé odezvy na změny teploty a malé rozměry. Nicméně, mají i některé nevýhody, jako jsou menší přesnost v porovnání s jinými způsoby měření teploty, závislost na typu materiálu použitého pro výrobu termistoru a potřebu kalibrace v průběhu času. Navíc trpí velkým samoohřevem. (Thermistor, 2023)



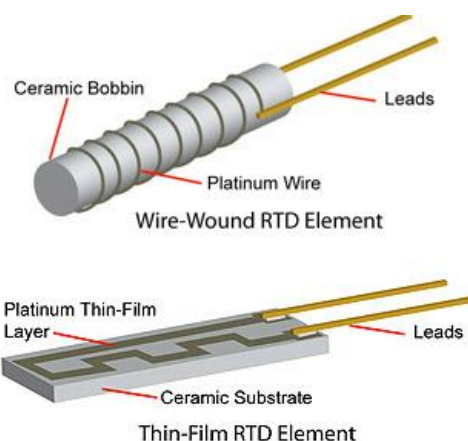
Obrázek 5: Příklady konstrukce NTC termistorů (NTC Thermistor, 2019)

#### 1.4.4 RTD čidla

RTD čidla (Resistance Temperature Detectors) jsou teplotní čidla, která mění svůj elektrický odpor v závislosti na teplotě. RTD čidla jsou tvořena vodičem, který je vinut do spirály a vložen do izolovaného pouzdra. Spirálový vodič je obvykle vyroben z platiny, mědi nebo niklu. Platina je nejčastěji používaný materiál pro výrobu RTD čidel, protože má stabilní teplotní chování a vysokou přesnost. (Pt100 temperature sensor – useful things to know, 2019)

RTD čidla se používají pro měření teplot v rozsahu  $-200^{\circ}\text{C}$  až  $+850^{\circ}\text{C}$ , přičemž platina RTD čidla mohou měřit teploty až do  $1000^{\circ}\text{C}$ . RTD čidla mají vysokou přesnost, stabilitu a opakovatelnost měření teploty. (Pt100 temperature sensor – useful things to know, 2019)

RTD čidla mají však i některé nevýhody, jako jsou vysoké náklady, pomalá odezva na změny teploty a závislost od okolních podmínek. Také u nich dochází k malému samoohřevu. (Pt100 temperature sensor – useful things to know, 2019)



Obrázek 6: Příklad konstrukcí RTD čidel (Designing with RTD Temperature sensors, 2023)

## 1.5 Silové spínací prvky

### 1.5.1 Typy

V elektronice lze použít různé typy silových spínacích prvků v závislosti na požadovaném výkonu, napětí, proudu a funkci. Některé z možností spínacích prvků jsou:

Tranzistory – tranzistory jsou často používané spínací prvky v elektronice. Jsou k dispozici v mnoha typech a velikostech, což umožňuje použití pro všelijaké účely.

Tyristory – tyristory jsou spínací prvky, které umožňují řídit průběh proudu v jednom směru. Tyristory se často používají v aplikacích, jako jsou regulátory výkonu a spínací zdroje.

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor je spínací prvek, který kombinuje vlastnosti tranzistoru a tyristoru. IGBT se používají pro vysoké výkony, jako jsou řídicí motory a spínací zdroje.

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor je spínací prvek, který umožňuje řízení proudu pomocí napětí. MOSFET se používá v aplikacích, jako jsou spínané zdroje, regulátory výkonu a řízení motorů.

Relé – Relé jsou elektromechanické spínací prvky, které umožňují spínat vysoké výkony a jsou často používány pro ovládání elektrických zařízení, jako jsou světla, ventilátory a elektromotory.

Hlavní rozdíl mezi mechanickými a elektronickými spínacími prvky spočívá v tom, jakým způsobem ovládají přenos signálu. Mechanické spínací prvky využívají fyzického kontaktu mezi dvěma póly pro ovládání elektrického signálu, zatímco elektronické spínací prvky používají elektronické polovodičové prvky (neobsahují žádné pohyblivé mechanické části) pro ovládání přenosu signálu.

Existují různé výhody a nevýhody pro oba typy spínacích prvků. Mechanické spínací prvky jsou obecně spolehlivé při méně častém spínání a také umožňují snadné spínání velkých výkonů. Nicméně mohou být pomalejší a méně přesné než elektronické spínací prvky.

Elektronické spínací prvky jsou rychlejší a přesnější než mechanické spínací prvky, ale jsou citlivější na elektromagnetické rušení a potřebují přesnou kontrolu výkonu a ochranu před přetížením. Také na rozdíl od mechanických prvků umožňují použití pulsně šířkové regulace.

### **1.5.2 H-můstek**

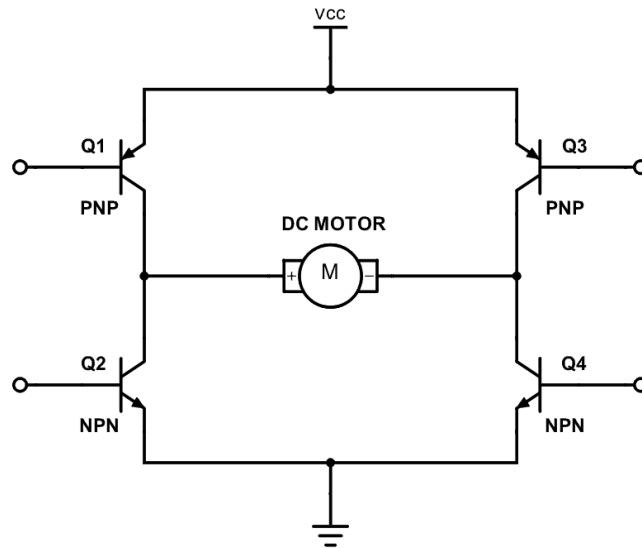
H-můstek je elektronický obvod, který slouží ke spínání a změně polarit napájecího napětí pro připojené zařízení, jako je motor, elektromagnet apod. H-můstek tedy umožňuje ovládat směr a rychlost otáčení motoru.

H-můstek je složen ze čtyř spínacích prvků (např. tranzistorů nebo MOSFETů), které jsou uspořádány do tvaru písmene "H". Tyto spínací prvky jsou rozděleny do dvou diagonálních větví, přičemž každá větev obsahuje dva spínací prvky - jeden horní a jeden dolní.

Pokud jsou všechny spínací prvky v jedné větvi uzavřeny, zařízení (např. motor) je napájeno jednou polaritou napětí a otáčí se v jednom směru. Pokud jsou uzavřeny spínací prvky v opačné větvi, zařízení je napájeno opačnou polaritou napětí a otáčí se v opačném směru. Pokud jsou uzavřeny spínací prvky v obou větvích, je napájecí napětí v obvodu nulové a zařízení se neotáčí.

Pro správné řízení H-můstku je potřeba vhodné řídicí napětí, které je aplikováno na spínací prvky. Pokud je napětí na horním spínacím prvku větší než na dolním, spínací prvek se otevře a proud projde zařízením jedním směrem. Pokud je napětí na dolním spínacím prvku větší než na horním, dolní spínací prvek se otevře a proud projde zařízením opačným směrem.

H-můstky se často používají v aplikacích jako jsou například robotika, modelářství, elektromobily a mnoho dalších, kde je potřeba řídit směr a rychlost otáčení motorů.



Obrázek 7: Příklad zapojení H-můstku (What Is an H-Bridge?, 2023)

## 1.6 Způsoby regulace

### 1.6.1 On/Off regulace

On/Off regulace je základní typ regulace, který pracuje na principu zapnutí a vypnutí napájení v závislosti na požadované úrovni. Tento typ regulace může být využíván například k řízení teploty v domácnostech pomocí topení nebo klimatizace.

Při On/Off regulaci je napájení spínáno v závislosti na tom, zda je výstupní veličina nad nebo pod stanovenou hodnotou. Pokud je výstupní veličina pod požadovanou úroveň, regulace zapne napájení, aby se výstupní veličina zvýšila na požadovanou úroveň. Pokud je výstupní veličina nad požadovanou úroveň, regulace vypne napájení, aby se výstupní veličina snížila na požadovanou úroveň.

On/Off regulace má výhodu jednoduché konstrukce a nízkých nákladů. Na druhou stranu však může být tento typ regulace neefektivní a nepřesný v situacích, kdy je nutné udržovat výstupní veličinu na přesné hodnotě, jelikož se jedná o nespojitou regulaci.

Také bývá do On/Off regulace často uměle zaváděna hystereze pro omezení příliš častého spínání. Vedlejší efekt hystereze je snížení přesnosti regulace.

## 1.6.2 PID regulace

PID regulace (Proporcionálně-Integračně-Derivační) je nejčastěji používaný typ regulace v průmyslu a automatizaci. Jedná se o spojitý regulátor, který kombinuje tři základní typy regulace: proporcionální, integrační a derivační. Tato kombinace umožňuje přesné a rychlé řízení výstupní veličiny.

Rovnici PID regulace lze zapsat jako:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (1.1)$$

kde:

$u(t)$  je výstupní signál, který ovládá řízený proces

$e(t)$  je chyba, tedy rozdíl mezi žádanou hodnotou a aktuální hodnotou řízené veličiny

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  jsou konstanty zvané koeficienty PID regulace, které určují vliv proporcionální, integrační a derivační složky na výstupní signál

$\int e(t)dt$  je integrální funkce, která integruje chybu v průběhu času

$de(t)/dt$  je rychlost změny chyby v čase, tedy derivace chyby podle času

### 1.6.2.1 P složka

Proporcionální složka v PID regulaci je první částí tohoto regulátoru a je zodpovědná za generování výstupního signálu na základě velikosti chyby. Tato složka pracuje na principu proporcionality, což znamená, že výstupní signál je úměrný velikosti chyby, tedy rozdílu mezi požadovanou a aktuální hodnotou výstupní veličiny.

Při zvyšování velikosti chyby se zvyšuje i výstup proporcionální složky a naopak, při snižování chyby se snižuje i výstup. Tento mechanismus umožňuje přesné řízení výstupní veličiny vzhledem k požadované hodnotě.

Koeficient proporcionality ( $K_p$ ) udává poměr mezi velikostí chyby a výstupním signálem proporcionální složky. Tento koeficient určuje citlivost proporcionální složky a musí být správně nastaven pro každou konkrétní aplikaci. Pokud je koeficient  $K_p$  příliš malý, regulace bude příliš pomalá a nedosáhne požadované hodnoty výstupní veličiny. Naopak, příliš vysoká hodnota koeficientu  $K_p$  může vést k oscilacím a překmitům v řízení.

### 1.6.2.2 I složka

Integrační složka je druhou částí PID regulace a je zodpovědná za sledování chyby v průběhu času. Tato složka generuje výstup, který se postupně zvyšuje, dokud se výstupní veličina nedostane na požadovanou hodnotu. Tento mechanismus umožňuje rychlejší dosažení požadované hodnoty výstupní veličiny a odstranění přetrvávajících chyb v řízení.

Integrační složka funguje na principu akumulace chyby v průběhu času, což znamená, že čím déle je chyba přítomna, tím větší bude výstup této složky. To umožňuje rychlejší řízení výstupní veličiny, zejména při dlouhodobých chybách.

Koeficient integrace ( $K_i$ ) udává, jak rychle se výstup integrační složky zvyšuje v závislosti na velikosti a době trvání chyby. Pokud je koeficient  $K_i$  příliš malý, integrační složka bude pracovat příliš pomalu a nedosáhne požadované hodnoty výstupní veličiny v dostatečně rychlém čase. Naopak, příliš vysoká hodnota koeficientu  $K_i$  může vést k nadměrným oscilacím a překmitům v řízení.

### 1.6.2.3 D složka

Derivační složka je třetí částí PID regulace a je zodpovědná za predikci budoucích změn výstupní veličiny na základě aktuálního trendu změn. Tato složka generuje výstup, který je úměrný rychlosti změny chyby v průběhu času. To umožňuje rychlejší reakci na změny vstupního signálu a minimalizaci přetrvávajících chyb v řízení.

Derivační složka funguje na principu rozdílu mezi aktuální a předchozí hodnotou chyby v průběhu času. Tento rozdíl je poté vynásoben koeficientem derivace ( $K_d$ ), který udává, jak rychle se výstup derivační složky mění v závislosti na rychlosti změn chyby.

Koeficient derivace ( $K_d$ ) určuje citlivost derivační složky a musí být správně nastaven pro každou konkrétní aplikaci. Pokud je koeficient  $K_d$  příliš malý, derivační složka nebude pracovat dostatečně rychle a nebude schopna predikovat budoucí změny výstupní veličiny. Naopak, příliš vysoká hodnota koeficientu  $K_d$  může vést k přehnané reakci na drobné změny vstupního signálu a k oscilacím a překmitům v řízení.



## 2. ZAŘÍZENÍ

### 2.1 Obvod Peltierova článku a chlazení modulu

#### 2.1.1 Modul TEC1-12706

Jako akční člen byl zvolen modul TEC1-12706. Tento jednostupňový modul má 127 jednotlivých Peltierových článků z bismut teluridu. Rozměry funkční plochy destičky z oxidu hlinitého jsou 40mm na 40mm. Při teplotách nižších, než je ambientní teplota, dochází ke kondenzaci vody. Tento modul má proto články uvnitř zalité silikonem, tedy nemůže dojít k poškození vodou. Pokud by tomu tak nebylo z výroby, bylo by nutné modul nějak dodatečně učinit vodotěsným. Maximální limity modulu se mění v závislosti na jeho teplotě, ale modul může být za běžných (startovních) podmínek, tj. 25°C, napájen napětím až 14,4V a proudem až 6,4A, přičemž může dosáhnout rozdílu teplot studené a teplé strany až 70°C. Maximální dovolená teplota modulu je 100°C. Při překročení této teploty může dojít k poškození modulu, jelikož se při 138°C začne tavit pájka uvnitř článku, která drží celý modul pohromadě. Elektrické a teplotní vlastnosti modulů se mohou kus od kusu značně lišit. Při aplikaci kladného napájení na červený vývod modulu a záporného napájení na černý vývod modulu dochází k ochlazování strany modulu s potiskem. (TEC1-12706, 2023)



Obrázek 8: Modul TEC1-12706 (Peltierův článek TEC1-12706, 2023)

### 2.1.2 Napájecí napětí modulu TEC1-12706

Dosáhnout co nejnižší teploty je mnohem náročnější, než dosáhnout vysokých teplot. Pro dosažení co nejnižší teploty je nutné zvolit správné napájecí napětí. Pro zvolení optimálního napětí modulu pro co největší chlazení je třeba zvážit několik faktorů.

Nejprve je třeba si uvědomit, že výkon chlazení modulu TEC1-12706 je přímo úměrný teplotnímu rozdílu mezi jeho dvěma stranami. To znamená, že pokud je teplotní rozdíl mezi stranami menší, bude i výkon chlazení menší.

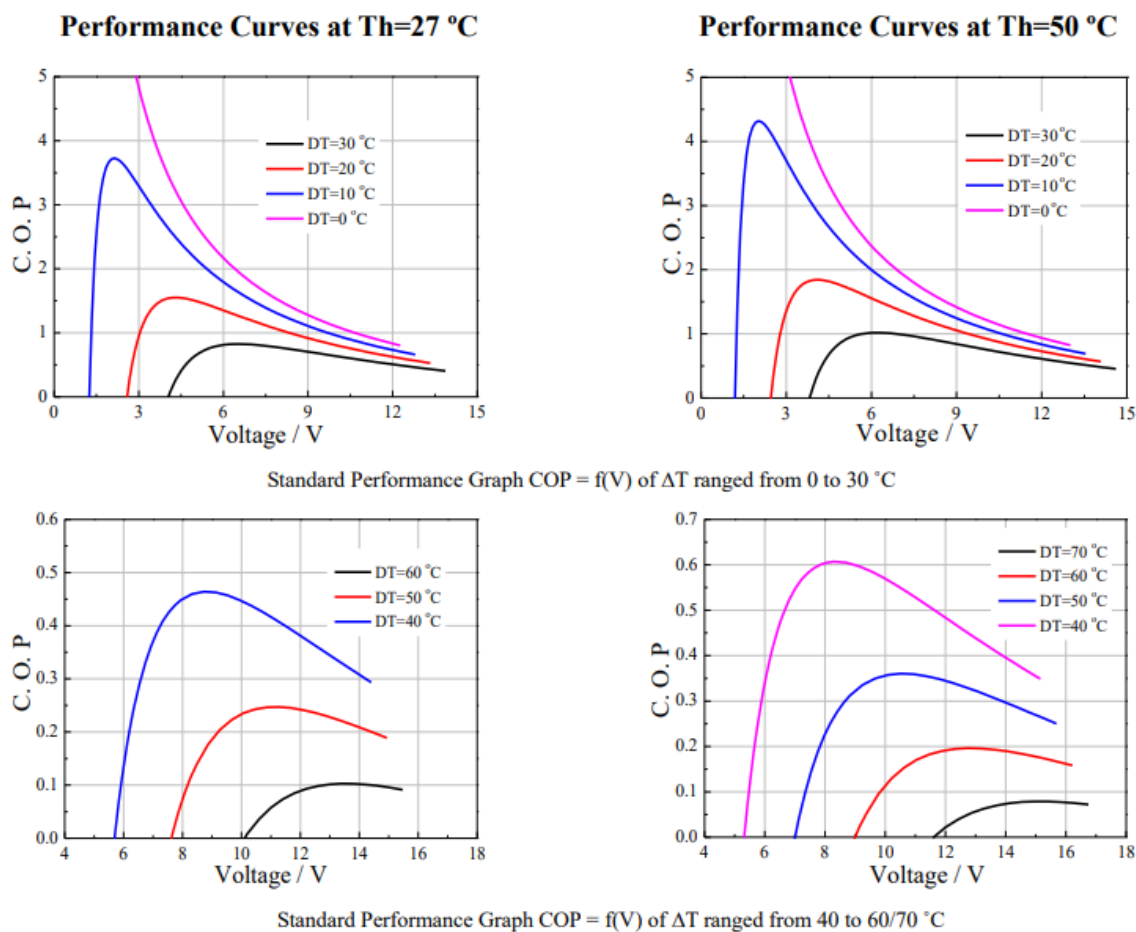
Dalším faktorem, který je třeba zvážit, je koeficient účinnosti modulu. Tento koeficient se mění v závislosti na napětí (ale také teplotě), které je přivedeno na modul. Obecně platí, že čím vyšší je napětí, tím je koeficient účinnosti nižší. Koeficient účinnosti je chladicí výkon vydělený elektrickým výkonem. Modul se sám chová jako dynamický odpor, tedy vytváří vlastní teplo.

Z těchto důvodů je vhodné zvolit napětí, které umožňuje dosažení dostatečného teplotního rozdílu a zároveň maximalizuje koeficient účinnosti. Obvykle se doporučuje zvolit napětí mezi 50% a 70% maximálního napětí modulu, které umožní dosažení dostatečného teplotního rozdílu a zároveň minimalizuje úbytek koeficientu účinnosti.

V každém případě je vhodné provést experimentální měření a zvolit nejlepší nastavení napětí pro danou aplikaci, s ohledem na požadovaný výkon chlazení a účinnost modulu.

Experimentálním způsobem bylo zvoleno napájecí napětí modulu 10V. Při tomto napětí modul s použitým chladičem dosáhl největšího možného chlazení. Při použití jiného chladiče by samozřejmě nejideálnější napájecí napětí bylo také jiné.

Z křivek koeficientu účinnosti (pravé dolní) lze tedy odhadnout, že horká strana modulu má asi 50°C při maximálním chlazení (studená strana má -10°C). Při tomto napětí modul dokáže nejlépe překonávat teplo vytvořené samotným modulem.



Remark: The coefficient of performance (COP) is the cooling power  $Q_c$ /Input power ( $V \times I$ ).

Obrázek 9: Křivky koeficientu účinnosti (TEC1-12706, 2023)

### 2.1.3 Odvod tepla z modulu TEC1-12706

Modul při činnosti sám vytváří teplo a také teplo přesouvá. Pro zabránění přehřátí modulu v režimu chlazení je nutné z něj důkladně teplo odvádět, tedy modul ochlazovat. O chlazení modulu se stará modifikovaný hliníkový chladič, který původně sloužil k chlazení počítačového procesoru. Jedná se o aktivní chlazení, jelikož je do chladiče z boku vháněn vzduch 60mm počítačovým 12V ventilátorem.

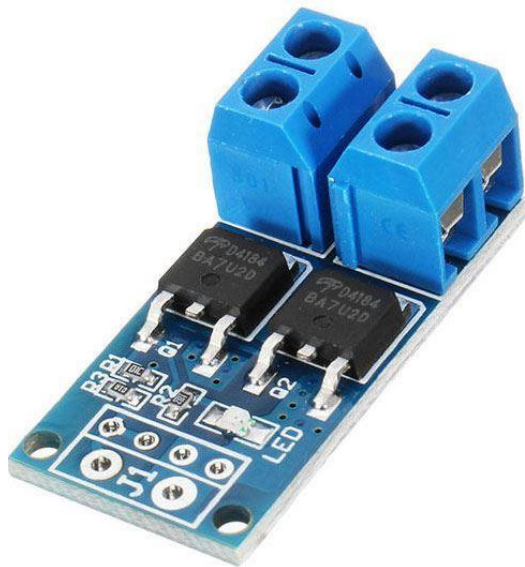
Mezi modulem upevněným ke chladiči a vlastním chladičem je nanesená teplovodivá pasta, která zlepšuje odvod tepla z modulu.

### 2.1.4 Spínání ventilátoru chladiče

Odvod tepla z modulu je nutný pouze pokud operuje v režimu chlazení. Pokud operuje v režimu ohřevu, tak by bylo naopak lepší, aby neztrácel žádné teplo v chladiči.

Nejsnazším řešením omezení tepelných ztrát do chladiče při režimu ohřevu je vypnutí aktivního vhánění vzduchu do chladiče.

Toto lze snadno vyřešit například pomocí relé nebo třeba pomocí výkonového MOSFET spínače. Ventilátor je tedy připojený do MOSFET modulu, který může odpojit napájení, pokud je to potřeba.



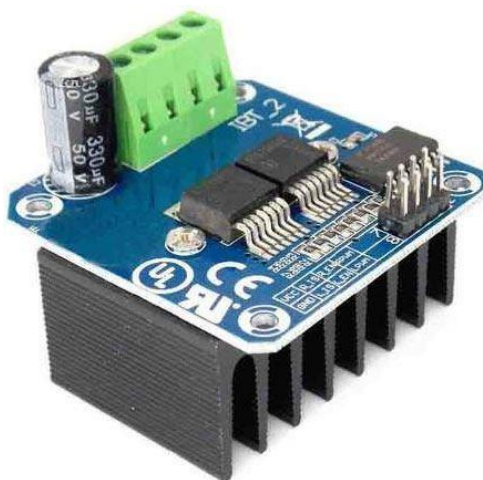
Obrázek 10: Použitý modul spínače (Výkonový spínač MOSFET PWM 15A 400W)

### 2.1.5 H-můstek BTS7960B

Pro regulaci výkonu a přepínání režimů je jako silový spínací prvek použit modul H-můstku BTS7960B. BTS7960B je čip výkonového MOSFETu s dvěma kanály pro řízení stejnosměrných motorů a jiných zátěží. Je vhodný pro použití v aplikacích, které vyžadují vysoký výkon, jako jsou například roboti, automobily, letadla a průmyslové stroje. (BTS7960B, 2023)

BTS7960B disponuje nízkými ztrátami při spínání a má vysokou účinnost. Jeho maximální proudová zatížitelnost je až 43A, je tedy schopen řídit i velké zátěže. Napájecí napětí zátěže je 5,5V až 27V. Je také vybaven ochrannými funkcemi, jako jsou například detekce přetížení, nadproudová ochrana a ochrana proti zkratu, což zvyšuje jeho spolehlivost a bezpečnost. (BTS7960B, 2023)

BTS7960B lze ovládat pomocí logického signálu v rozsahu 3,3 V až 5 V, což umožňuje snadnou integraci s mikro-kontroléry a jinými logickými obvody. Logické signály jsou na modulu připojeny k H-můstku přes pomocný buffer integrovaný obvod. (BTS7960B, 2023)



Obrázek 11: Modul H-můstku (H-můstek BTS7960B pro stejnosměrné motory, 2023)

## 2.2 Obvod logického řízení a měření

### 2.2.1 Vývojový modul Arduino UNO

Mozkem celého zařízení je vývojový kit Arduino UNO, který obsluhuje veškeré ovládání, zobrazování a regulaci. Použití již hotového vývojového kitu se všemi potřebnými pomocnými obvody je mnohem snazší a efektivnější řešení, než vyvíjení komplet nového obvodu mikro-kontroléru, pokud se jedná pouze o prototypové, experimentální nebo demonstrační řešení.

Arduino UNO je jedna z nejpobulárnějších platform pro vývoj elektronických projektů, která nabízí mnoho výhod pro začínající i pokročilé vývojáře. Dále jsou uvedeny základní vlastnosti této platformy:

**Mikro-kontrolér:** Arduino UNO je vybaven mikro-kontrolérem ATmega328P od firmy Atmel. Tento mikrokontrolér má 32kB flash paměti pro programování, 2kB SRAM paměti pro ukládání dat programu a 1kB EEPROM paměti pro ukládání trvalých dat.

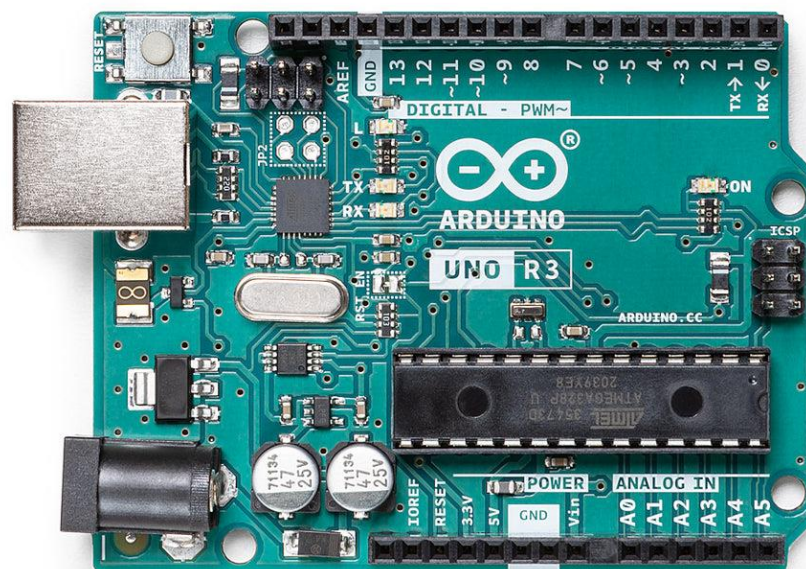
**Digitální piny:** Arduino UNO má 14 digitálních vstupně/výstupních pinů (GPIO), z nichž 6 může být použito jako PWM (Pulse Width Modulation) výstupy. Tyto digitální piny jsou označeny čísly od 0 do 13.

Analogové piny: Arduino UNO má 6 analogových vstupních pinů, které mohou být také použity jako digitální vstupy/výstupy. Tyto piny jsou označeny čísly A0 až A5.

Komunikace: Arduino UNO podporuje komunikaci přes USB (série), SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit) a UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).

Napájení: Arduino UNO může být napájeno přes USB kabel, externí napájecí adaptér nebo baterii. Externí napájecí napětí by mělo být v rozmezí 7V až 12V. Součástí výbavy desky je také stabilizátor 5V a 3,3V, které lze využít jako zdroje pro napájení připojených periférií.

Programování: Arduino UNO lze programovat pomocí jazyka Wiring, který je velmi podobný jazyku C. Programovací prostředí je k dispozici zdarma ke stažení na oficiálních stránkách Arduino. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)



Obrázek 12: Vývojový kit Arduino UNO (Arduino, 2023)

### 2.2.2 Teploměr DS18B20

DS18B20 je digitální teploměr s One-Wire komunikací od společnosti Maxim Integrated. Jedná se o velmi přesný a snadno použitelný senzor pro měření teploty s nastavitelným rozlišením 9 až 12 bitů. Integrovaný One-Wire řadič umožňuje připojení více senzorů na jednu sběrnici. Tento senzor může měřit teplotu v rozsahu od  $-55^{\circ}\text{C}$  do  $+125^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  v rozsahu od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$ . DS18B20 obsahuje taky EEPROM paměť, která umožňuje nastavení například alarmu na určitých teplotách a další konfigurace přímo na čidle. Dodává se buďto v samotném TO-92 pouzdru nebo také ve vodotěsném provedení s kabelem. Lze u něj využít také parazitní napájení. (DS18B20, 2023)

Na zařízení je použito vodotěsné provedení s 12-bitovou přesností (tedy  $0,0625^{\circ}\text{C}$ ) a bez využití parazitního napájení. Teploměr je přitisklý na modulu TEC1-12706 a snímá jeho teplotu. K lepšímu přenosu tepla z akčního členu do modulu je použito trochu teplovodivé pasty na teploměru a na akčním členu.



Obrázek 13: Teploměr DS18B20 ve vodotěsném provedení (Teplotní sonda DS18B20 100cm)

### 2.2.2.1 One-Wire

One-Wire je komunikační protokol vyvinutý společností Maxim Integrated, který umožňuje přenos dat pomocí jediného vodiče. Tento protokol se používá pro komunikaci s různými zařízeními, včetně senzorů teploty jako je DS18B20. (DS18B20, 2023)

One-Wire komunikace se skládá z jediného datového vodiče, který slouží k přenosu dat mezi zařízením a mikro-kontrolérem. Kromě toho se na této sběrnici používá také zemní vodič a napájecí vodič pro napájení připojených zařízení. (DS18B20, 2023)

Pro komunikaci se zařízením se používají speciální komunikační sekvence, které jsou určeny pro identifikaci zařízení, posílání dat a příjem dat. Každé zařízení na sběrnici má unikátní 64bitovou adresu, která umožňuje mikro-kontroléru identifikovat konkrétní zařízení na sběrnici. (DS18B20, 2023)

Komunikace se zařízením je asynchronní a probíhá na základě časových prodlev. Mikro-kontrolér posílá impulsy na sběrnici a zařízení na tyto impulsy odpovídají. Tyto impulsy mají různou délku a v závislosti na tom se určuje, zda jde o logickou 0 nebo 1. (DS18B20, 2023)

Mikro-kontrolér využívá softwarového dekodování One-Wire komunikace. Zpráva o teplotě přichází přibližně každou 0,5s. Komunikace také vyžaduje připojení pull-up rezistoru na datovou sběrnici.

### 2.2.3 Oddělení silové části pomocí LM358N

ATmega 328p je z výstupu schopná dodávat až 40mA. To není nikde v logické části překročeno, ale přesto je lepší u silových prvků vložit do cesty další komponentu pro větší zabezpečení mikro-kontroléru.

Jako komponenta pro oddělení (pouze přenesení výkonu na jiný prvek než mikro-kontrolér) je použit operační zesilovač LM358N v zapojení napětěového sledovače.

LM358N je integrovaný obvod, který slouží jako duální operační zesilovač. V pouzdře DIL8 obsahuje dva na sobě nezávislé operační zesilovače s vysokým zesílením a vysokou vstupní impedancí, díky tomu může téct z mikro-kontroléru co nejmenší proud. LM358N je operační zesilovač pro všeobecné použití s malým výkonem (asi 0,5W). Maximální napětí zesilovače je 32V. (LM358N, 2023)



Napětový sledovač je obvod, který umožňuje sledovat úroveň na vstupu a přenášet ji na výstup bez zesílení. Na neinvertující vstup se připojí signál a výstup se propojí s invertujícím vstupem, tedy to co se zesílí, je okamžitě znovu zeslabeno.

Tímto způsobem jsou odděleny dva vývody do H-můstku a jeden do spínače ventilátoru. O napájení operačních zesilovačů se stará zdroj 5V z Arduina.

#### **2.2.4 Zobrazovač**

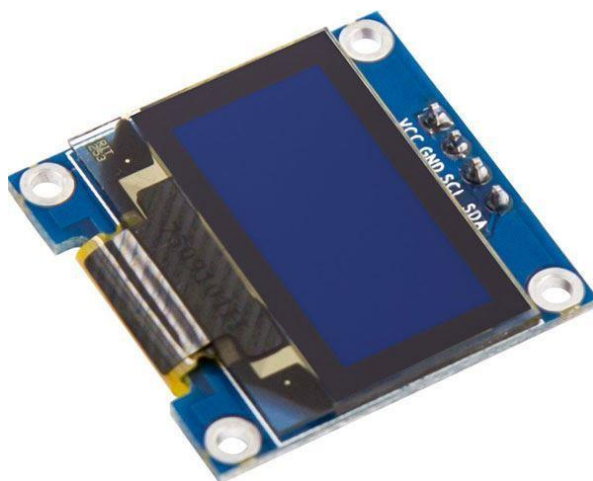
Pro zobrazování informací je použit modul OLED zobrazovače. Černobílý zobrazovač má rozlišení 128x64 pixelů, velikost 0,96 palce a je ovládán kontrolérem SSD1306. Má velmi malou spotřebu 40mW a napájení 5V z Arduina. Zobrazovač se chová jako matice. OLED technologie funguje na principu, že jednotlivé pixely jsou jednotlivé svítivé diody, které lze rozsvítit nebo úplně zhasnout. Zobrazovač využívá komunikační rozhraní I2C. (Displej OLED, 2023)

I2C používá dvě linky k přenosu dat: datovou (SDA) a hodinovou (SCL) linku. SDA linka slouží k přenosu dat mezi zařízeními a SCL linka slouží k synchronizaci přenosu dat mezi zařízeními.

Každé zařízení na I2C sběrnici má unikátní adresu, kterou používá pro komunikaci s ostatními zařízeními na sběrnici. Adresa zařízení je 7 bitů dlouhá a může být konfigurována pomocí hardwaru nebo software.

Komunikace mezi zařízeními probíhá v jednom ze dvou režimů: master nebo slave. Master je zařízení, které řídí komunikaci a iniciovalo ji. Slave je zařízení, které komunikuje s masterem a odpovídá na jeho požadavky.

Při komunikaci master začne odesláním startovacího signálu na sběrnici, poté odešle adresu zařízení se kterým chce komunikovat a určí, zda chce zapisovat nebo číst z tohoto zařízení. Pokud zařízení odpovídá na adresu a žádost o čtení nebo zápis, začne probíhat přenos dat. Po dokončení přenosu master odešle stopovací signál, aby ukončil komunikaci.



Obrázek 14: Použitý modul zobrazovače (Displej OLED, 2023)

### 2.2.5 Odesílání dat do počítače

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) na desce Arduino Uno je integrovaný obvod ATmega328P, který je schopen přijímat a odesílat data pomocí sériového komunikačního protokolu. UART pracuje na asynchronním přenosu, což znamená, že data jsou přenášena bez použití synchronizačních signálů.

UART komunikace využívá dvou signálů: Tx (přenos dat) a Rx (příjem dat). Signál Tx je použit pro odesílání dat z mikro-kontroléru (Arduino Uno) do jiného zařízení, zatímco signál Rx je použit pro příjem dat z jiného zařízení do mikro-kontroléru. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)

Pro použití UARTu na desce Arduino Uno musí být nejprve inicializován pomocí funkce `Serial.begin()`. Tato funkce nastaví rychlost komunikace (baudy), paritu a počet bitů na přenos dat. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)

Při použití funkce `Serial.print()` pro odeslání dat z desky Arduino Uno jsou data posílána do bufferu přenosu a UART je použit k odeslání těchto dat po sériové lince. Přijatá data jsou pak přijímána z Rx pinu a ukládána do bufferu příjmu. Funkce `Serial.available()` kontroluje, zda jsou k dispozici nějaká přijatá data, a funkce `Serial.read()` pak umožňuje načíst přijatá data ze vstupního bufferu. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)

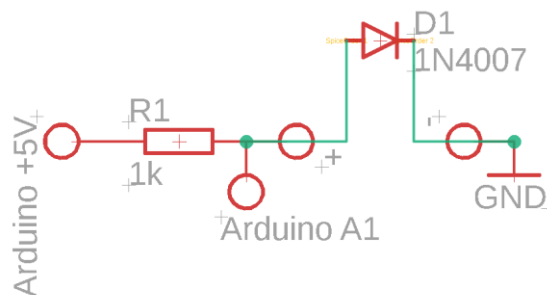
Na desce Arduino Uno je UART obvod připojen přes USB konvertor, který umožňuje přenášet data mezi Arduinem a počítačem pomocí USB rozhraní. Když se Arduino Uno připojí k počítači pomocí USB kabelu, USB konvertor převádí signály UARTu na USB protokol a posílá je do počítače. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)

Komunikace pomocí USB konvertoru je realizována pomocí virtuálního sériového portu. Když je USB konvertor připojen k počítači, systém ho rozpozná jako virtuální sériový port a umožní komunikaci pomocí sériového protokolu. (Arduino, 2023; ATmega328p, 2023)

Ve výrobku je využitý virtuální sériový port s rychlostí 9600 baudů pro odesílání dat do počítače.

### 2.2.6 Měřicí obvod

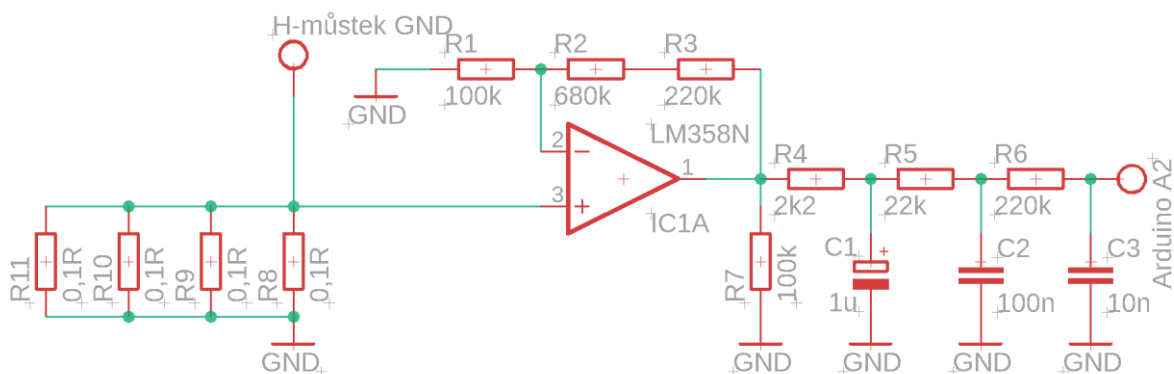
Zařízení též umožňuje měření teplotních závislostí určitých součástek. Měřicí obvod je složený z rezistoru  $1k\Omega$  a měřené součástky v sérii. Obvod je napájen 5V z Arduina. Napětí na součástce je měřeno AD převodníkem vůči zemi, který je integrovaný v mikro-kontroléru s rozlišením 10 bitů (1024 úrovní) a vnitřním referenčním napětím 1,1V.



Obrázek 15: Schéma zapojení měřicího obvodu s příkladem zapojení měřené součástky (dioda)

### 2.2.7 Obvod měření výkonu

Zařízení také disponuje orientačním měřením aktuálního výkonu akčního členu. Funguje tak, že se počítá výkon z úbytku napětí na odporu zařazeném v sérii s akčním členem (mezi pinem GND H-můstku a zemí). Úbytek napětí na odporu je poté desetkrát zesílen operačním zesilovačem a poslán do dolní propusti, ze které se poté již měří napětí pomocí integrovaného AD převodníku vůči zemi. Dolní propust je zde nutná, jelikož je v tomto obvodu pulsující proud kvůli využití PWM regulace. Dolní propust tyto pulsující úbytky napětí vyhlazuje na stálé napětí závislé na střídě PWM.



Obrázek 16: Schéma zapojení obvodu měření výkonu

## 2.3 Napájení

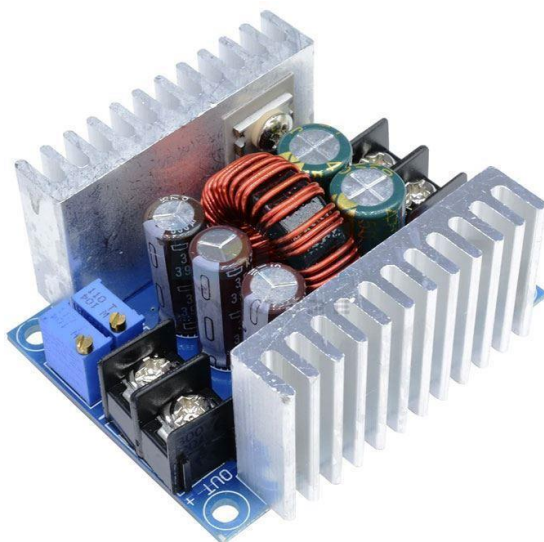
Celé zařízení je uzpůsobené k napájení stejnosměrným zdrojem 15V až 35V s výkonem alespoň 50W. K připojení externího zdroje je využit koaxiální napájecí konektor 2,1mm (barrel jack) s kladným napětím na kolíku. Jelikož nemá barrel jack nijak definovanou polaritu, tak je zařízení ještě vybaveno diodou v sérii, která slouží jako ochrana proti přepólování.

Variabilní napájecí napětí je možné díky tomu, že uvnitř zařízení jsou použity další zdroje, které napájecí napětí upravují na požadované fixní hodnoty pro jednotlivé komponenty. Celé zařízení má jednu společnou zem.

### 2.3.1 Napájení akčního členu

K napájení akčního členu je potřeba fixní napětí 10V, přičemž akční člen vyžaduje pro svou činnost proudy větší než 2A. Proto je zde využit silný DC/DC step-down měnič, který umožňuje proměnlivé vstupní napětí s vysokou efektivitou snížit na nastavitelné stabilní výstupní napětí. Vstupní napětí musí být vždy vyšší než požadované výstupní napětí. Tento zdroj je nastavený na 10V a napájí akční člen (přes H-můstek). Obvod je připojený ke společné zemi.

Tento zdroj může pracovat se vstupním napětím v rozsahu 6V až 40V, výstupní napětí lze nastavit v rozsahu 1,2V až 36V, maximální trvalý výstupní proud zdroje je až 15A. Zdroj umožňuje práci ve dvou režimech – konstantní napětí a konstantní proud (zařízení využívá režimu konstantního napětí). (Napájecí modul, step-down měnič 6-40V/1,5-35V 20A, 2023)



Obrázek 17: Modul step-down měniče pro akční člen (Napájecí modul, step-down měnič 6-40V/1,5-35V 20A, 2023)

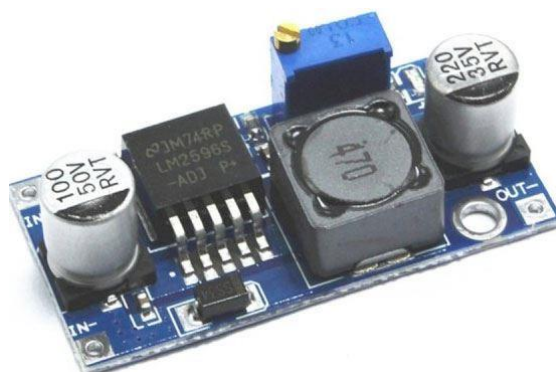
### 2.3.2 Napájení ostatní elektroniky

K napájení ostatní elektroniky je nutné použít druhý zdroj s fixním napětím 12V, ale již není potřeba aby dosahoval vysokého výkonu. Elektronika (mikro-kontrolér, ventilátor, zobrazovač, ...) má dohromady velmi malou spotřebu. Napájecí napětí 12V je odvozeno z maximálního napájecího napětí Arduina (12V) a napájecího napětí chladícího ventilátoru (12V).

Zde je použit DC/DC step-down měnič, který umožňuje proměnlivé vstupní napětí s vysokou efektivitou snížit na nastavitelné stabilní výstupní napětí. Vstupní napětí musí být vždy vyšší než požadované výstupní napětí. Tento zdroj je nastavený na 12V a napájí Arduino a ventilátor. Obvod je připojený ke společné zemi.

Tento zdroj může pracovat se vstupním napětím v rozsahu 5V až 35V, výstupní napětí lze nastavit v rozsahu 3V až 33V, maximální trvalý výstupní proud zdroje je 2A. Zdroj funguje pouze v režimu konstantního výstupního napětí. (Napájecí modul, step-down měnič 3A s LM2596, 2023)

Arduino poté na desce obsahuje stabilizátor 5V 1A, ze kterého je napájený samotný mikro-kontrolér, logika H-můstku, operační zesilovače LM358N, zobrazovač, čidlo DS18B20 a měřená součástka (všechno nízkopříkonové komponenty, tedy vůbec nedochází k nějakému přílišnému zatěžování stabilizátoru).



Obrázek 18: Modul step-down měniče pro napájení elektroniky (Napájecí modul, step-down měnič 3A s LM2596, 2023)

## 2.4 Programové vybavení a chování programu

Program pro mikro-kontrolér je napsaný pomocí Arduino IDE v jazyku Wiring (velmi podobný jazyku C). V programu jsou také využity již předem vytvořené cizí knihovny, které se starají o čtení dat z teploměru a o zobrazování dat na OLED.

### 2.4.1 Běh programu

Program je pro přehlednost rozložený do jednotlivých funkcí, které vždy obstarávají nějakou činnost – kontrola tlačítek a úprava parametrů, regulace, vypsání na zobrazovač atd.

Po spuštění zařízení dojde k inicializaci mikro-kontroléru, tzn. že se nastaví chování jednotlivých pinů, inicializace vnitřních pull-up rezistorů pro tlačítka, inicializuje se komunikace, zobrazovač, teploměr atd. Poté program přejde do hlavní smyčky, kde se již cyklicky provádějí všechny funkce.

Program je rozčleněn do jednotlivých funkcí, které jsou volány z hlavní smyčky:

Funkce pro kontrolu tlačítek a nastavování zařízení: Tato část programu se v kódu jmenuje `btnPress()`. V této části se kontroluje, zda je stisknuté nějaké tlačítko. Funkce kontroluje, jestli se piny, na kterých jsou připojena tlačítka (digitální piny 10, 9, 8), připojí k zemi. Pokud je nějaké tlačítko stisknuté tak se v této funkci také provádí úprava proměnných jako například požadovaná teplota, ale také proměnných, které určují, jak má zařízení pracovat a co se má zobrazit na zobrazovači. Dále, pokud dochází k automatickému měření, tak se v této funkci také provádí automatická úprava proměnných použitých k automatickému měření. Tato funkce se vykonává při každém cyklu programu.

Funkce pro měření teploty: Tato část programu se v kódu jmenuje `temperatureRead()`. V této části dojde pouze k načtení a uložení teploty z teploměru DS18B20 na digitálním pinu 2. K tomuto pinu je také připojen pull-up rezistor 4,7kΩ z 5V, který One-Wire komunikace vyžaduje. K načtení teploty je využita knihovna, která softwarově přečte One-Wire signál z teploměru a knihovna, která tyto data přeloží na teplotu ve stupních celsia. Tato funkce se vykonává v každém cyklu programu za podmínky, že je zařízení v manuálním nebo automatickém režimu měření.

Funkce pro regulaci teploty: Tato část programu se v kódu jmenuje `PWM()`. V této části dochází k teplotní regulaci akčního členu. Tato funkce také zapíná nebo vypíná ventilátor. Tato funkce se vykonává v každém cyklu programu za podmínky, že je zařízení v manuálním nebo automatickém režimu měření.

Funkce pro měření napětí na testované součástce: Tato část programu se v kódu jmenuje `voltageMeasure()`. V této části pouze dochází k AD převodu a uložení napětí na testované součástce a také na rezistoru pro měření proudu protékajícího přes akční člen. Tato funkce se vykonává v každém cyklu programu za podmínky, že je zařízení v manuálním nebo automatickém režimu měření.

Funkce pro zobrazování informací: Tato část programu se v kódu jmenuje `displayData()`. Tato funkce se stará o zobrazování dat na zobrazovači a odesílání dat po sériové lince. Funkce funguje tak, že zkontroluje všechny proměnné nastavené ve funkci `btnPress()`, které určují, v jakém režimu právě zařízení je a co se má na zobrazovači zobrazovat. Při každém cyklu dojde k překreslení zobrazovače a zobrazení pouze toho, co je právě podle proměnných nastaveno, že se má zobrazit. V této funkci je pro zápis na zobrazovač využita knihovna, která umožňuje instrukcemi jednoduše zobrazovat texty. K převodu například deseti bitových proměnných na volty dochází přímo v instrukci pro zápis na zobrazovač, není zde tedy žádné předčasné přepočítávání hodnot. Tato funkce se vykonává při každém cyklu programu.

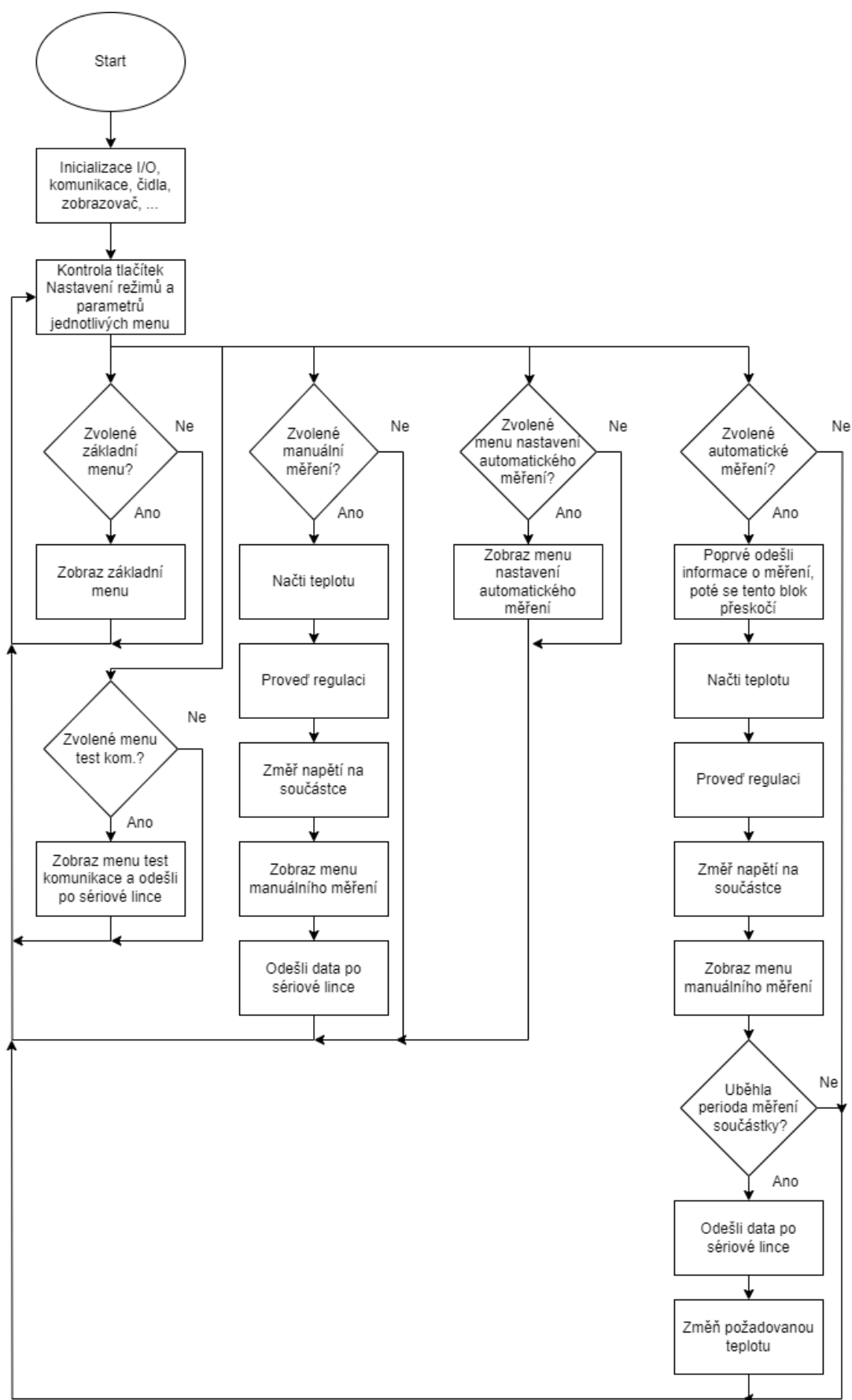
Přepočet na napětí na měřené součástce s referenčním napětím 1,12V:

$$U = \frac{1,12V * 1000 * 10 \text{ bit hodnota napětí na diodě}}{1023} \quad (2.1)$$

Výpočet výkonu akčního prvku s referenčním napětím 1,12V:

$$P = \frac{\frac{1,12V * 10 \text{ bit hodnota napětí na rezistoru}}{1023}}{\frac{\text{zesílení } 10}{0,025\Omega}} * 1,44 * 10V \quad (2.2)$$

Hodnota 1,44 slouží jako kompenzace pro trvalou chybu která se v měření nachází.

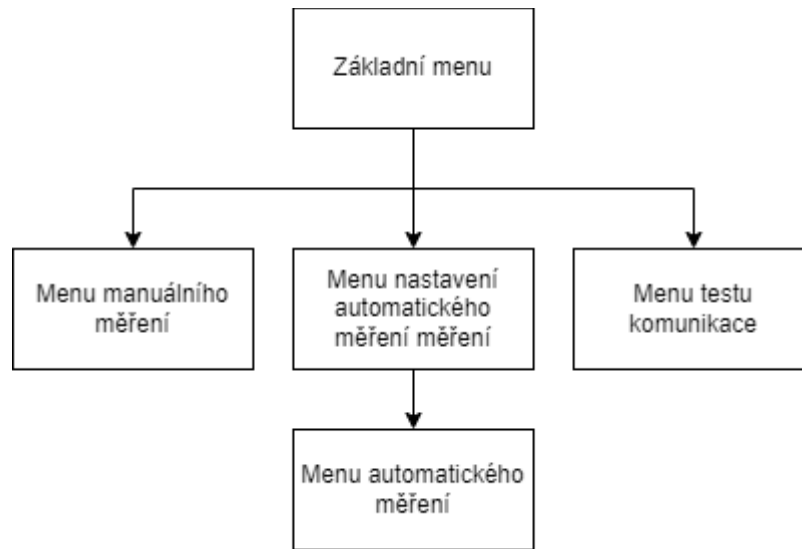


Obrázek 19: Princip chování celého programu



## 2.4.2 Menu

Celý program obsahuje 4 obrazovky (menu). Jaké menu se má právě zobrazovat je určované nastavováním jednotlivých proměnných typu bool, kdy každé nastavitelné menu a řádek má svoji vlastní proměnnou.



Obrázek 20: Mapa menu

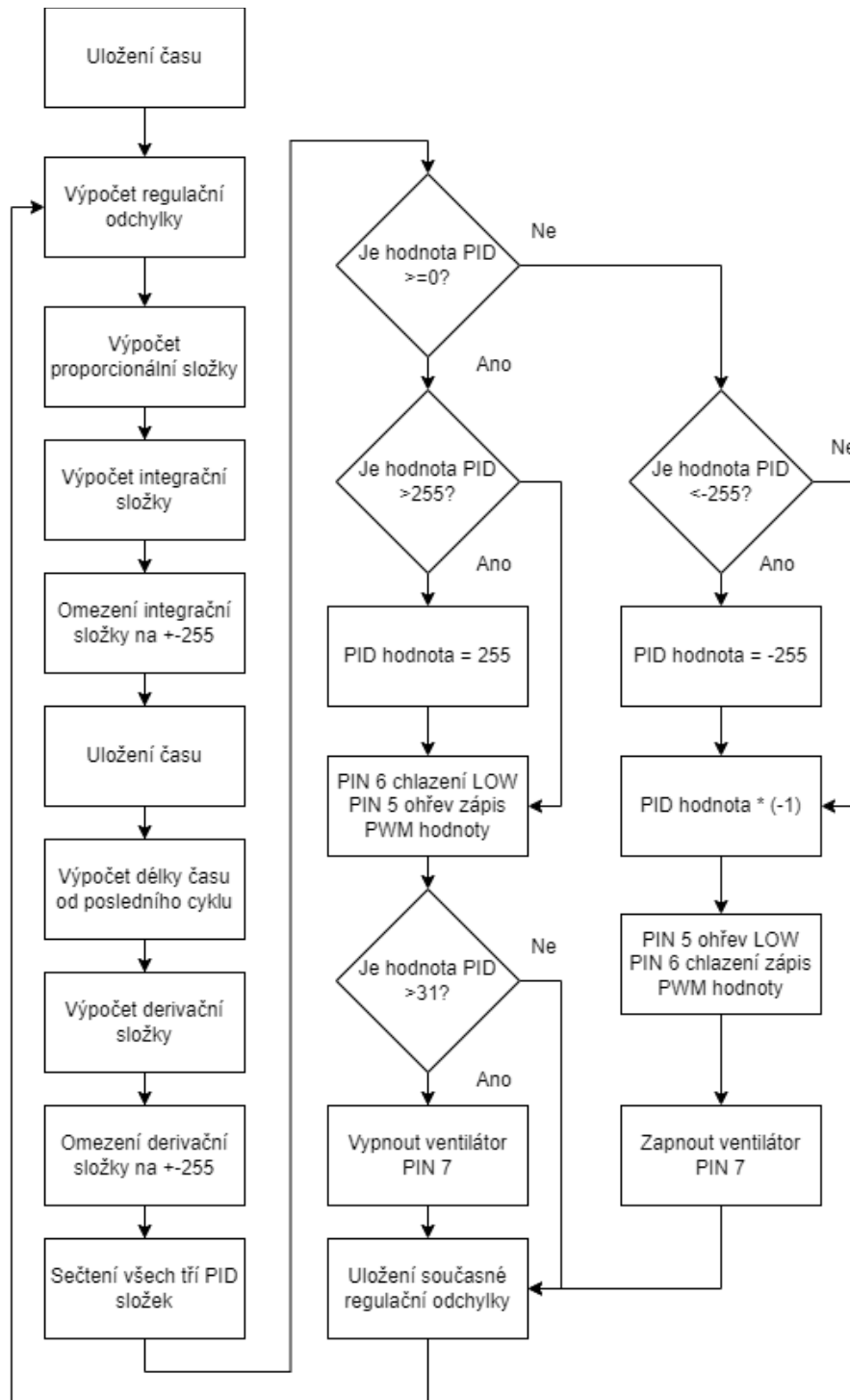
## 2.4.3 Funkce regulace

Výpočet regulace funguje na tomto algoritmu přírůstkové regulace (pamatuje si pouze předchozí hodnotu). Při inicializaci dojde k prvnímu uložení času, toto uložení se již znovu neopakuje. Poté při zavolání regulační funkce dojde k výpočtu regulační odchylky (požadovaná hodnota minus změřená hodnota). Nejprve dojde k výpočtu proporcionální složky – koeficient proporcionality krát regulační odchylka. Poté dojde k výpočtu integrační složky – koeficient integrace krát regulační odchylka plus hodnota integrační složky. Nadále dojde k omezení integrační složky na  $\pm 255$ , toto slouží jako částečný anti wind-up. Poté dojde k výpočtu (odměření) a uložení času od posledního cyklu regulace a k výpočtu derivační složky – regulační odchylka minus přechozí regulační odchylka, to celé vydělené uběhlým časem a to celé nakonec vynásobené koeficientem derivace. Nakonec dojde k sečtení těchto tří PID složek.

Pokud je vypočítaná PID hodnota větší nebo rovna nule, má docházet k ohřevu, dojde tedy k zapsání PID hodnoty na pin ohřevu 5, kde se vygeneruje PWM signál, na pin chlazení 6 se zapíše hodnota LOW a dojde k vypnutí ventilátoru – navíc je zde také zabudovaná malá hystereze.

Pokud je vypočítaná PID hodnota mešší než nula, má docházet ke chlazení, dojde tedy k zapsání PID hodnoty krát -1 na pin chlazení 6, kde se vygeneruje PWM signál, na pin ohřevu 5 se zapíše hodnota LOW a dojde k zapnutí ventilátoru.

Na konci funkce dojde k uložení současné regulační odchylky pro výpočet derivace a funkce se znovu opakuje.



Obrázek 21: Chování funkce regulace

### 2.4.3.1 Generování PWM

Pro zapsání spojité regulace na digitální pin je využito pulsně šířkové modulace. Tento PWM signál poté spíná H-můstek a tím akční člen. K vytvoření PWM se v jazyku Wiring používá funkce `analogWrite()` na digitální pin, který umožňuje PWM výstup. Nula v této funkci znamená střidu 0%, 127 odpovídá střídě 50% a 255 odpovídá střídě 100%.

PWM (Pulse Width Modulation) je technika pro řízení signálu, která se používá k ovládní výkonu nebo rychlosti v mnoha zařízeních. Tento signál se skládá z periodických impulsů s konstantní amplitudou, ale s různou délkou impulsu.

Princip PWM signálu spočívá v tom, že výstupní signál je periodicky přepínán mezi dvěma úrovněmi, mezi vysokou a nízkou úrovní. Délka trvání impulsu vysoké úrovně se mění, zatímco celková délka cyklu (časový interval mezi začátkem jednoho impulsu a začátkem následujícího impulsu - perioda) zůstává konstantní. Tím se mění poměr (střída) mezi délkou impulsu vysoké úrovně a celkovou délkou cyklu a tím i průměrná hodnota signálu.

Atmega328p, kterou Arduino Uno využívá, obsahuje hardwarový modul Timer/Counter pro generování PWM signálu. Modul Timer/Counter je schopný generovat signál s nastavitelnou frekvencí a šířkou pulzu, což umožňuje vytvářet analogové signály z digitálních výstupů. (ATmega328p, 2023)

Pro generování PWM signálu se používají registry Timer/Counter a nastavení se provádí přímo v kódu. Timer/Counter modul je vybaven třemi časovači (Timer0, Timer1 a Timer2), každý z nich obsahuje dva nebo více kanálů pro generování PWM signálu. (ATmega328p, 2023)

Každý z těchto časovačů využívá 8-bitového čítače (někdy označováno jako TCNT) a 8-bitového registru srovnávací hodnoty (OCR). Timer0 obsahuje také 8-bitový čítač srovnávací hodnoty (OCR0A), který může být použit jako druhý kanál pro generování PWM signálu. (ATmega328p, 2023)

Abychom mohli generovat PWM signál, musíme nejprve nastavit správnou frekvenci časovače, což se dělá pomocí předděličky (Prescaler). Předdělička umožňuje dělit vstupní frekvenci časovače a snížit tak jeho frekvenci. (ATmega328p, 2023)

Pro nastavení předděličky používáme registry TCCRnB (kde „n“ značí číslo Timer/Counter), které obsahují bity CSn2, CSn1 a CSn0, kde „n“ značí číslo Timer/Counter.

Tyto bity určují hodnotu předděličky, která se použije k dělení vstupní frekvence časovače. (ATmega328p, 2023)

Následně musíme nastavit srovnávací hodnotu registru OCR, což určí délku trvání signálu. Šířka pulzu se nastavuje tím, že srovnávací hodnota se nastaví na určitou hodnotu, což určuje, kdy se signál přepne ze stavu HIGH na LOW. Pro nastavení šířky pulzu se používají registry OCR<sub>n</sub> (kde „x“ značí číslo Timer/Counter a „n“ značí kanál). (ATmega328p, 2023)

Když je časovač spuštěn, začne počítat s využitím vstupního signálu a nastavené předděličky. Pokud se dosáhne srovnávací hodnoty OCR, signál se přepne z HIGH na LOW, čímž se dosáhne požadované šířky pulzu. Po přepnutí signálu na LOW začne časovač opět počítat a po dosažení maximální hodnoty čítače se signál přepne zpět na HIGH a proces se opakuje. Výsledkem tohoto procesu je PWM signál s určenou frekvencí a šířkou pulzu. (ATmega328p, 2023)

Atmega328p, kterou Arduino Uno využívá, podporuje různé druhy PWM signálu, které mohou být použity v závislosti na požadované aplikaci. Zde jsou některé z používaných typů PWM signálu, které může Atmega328p generovat:

**Fast PWM** - Tento typ PWM generuje signál s pevnou frekvencí a nastavitelnou šířkou pulzu. Při tomto typu PWM je výstupní signál generován po každém cyklu čítače, což umožňuje rychlejší odezvu na změny šířky pulzu. (ATmega328p, 2023)

**Phase Correct PWM** - Tento typ PWM generuje signál s proměnnou frekvencí a nastavitelnou šířkou pulzu. Signál se generuje na každém z dvou fází čítače, což umožňuje dosažení vyšší přesnosti v určitých aplikacích, jako například při řízení motorů. (ATmega328p, 2023)

**Phase and Frequency Correct PWM** - Tento typ PWM je kombinací předchozích dvou typů a umožňuje generovat signál s proměnnou frekvencí a nastavitelnou šířkou pulzu s vysokou přesností. Signál se generuje na každé z čtyř fází čítače. (ATmega328p, 2023)

**Inverted PWM** - Tento typ PWM generuje signál s invertovanou logikou, když se srovnávací hodnota dosáhne. To znamená, že signál bude vysoký, pokud je srovnávací hodnota menší než aktuální hodnota čítače, a nízký, pokud je větší. Tento typ PWM se často používá pro řízení motorů nebo pro osvětlovací aplikace. (ATmega328p, 2023)

Každý z těchto typů PWM signálu má své vlastní výhody a nevýhody a vhodnost použití závisí na konkrétní aplikaci. Toto zařízení využívá Fast PWM.

## 2.5 Návod k použití

Zařízení se spustí připojením ke zdroji napájení. Napájecí zdroj musí být zakončený koaxiálním napájecím konektorem 2,1mm (barrel jack) s kladným napětím na kolíku. Napětí musí být v rozmezí 15V až 35V a zdroj by měl mít výkon alespoň 50W.

Dále je možné zařízení také připojit k PC pomocí USB. Na PC je poté potřeba spustit libovolný program na čtení virtuálních sériových portů a nastavit ho na komunikaci 9600 baud (například Serial monitor v Arduino IDE).

Po spuštění zařízení je na zobrazovači základní menu, ve kterém lze volit mezi třemi položkami pomocí tlačítek označených + a -, tlačítkem OK se vybere položka:

Manual – ruční měření: zařízení zůstane na nastavené teplotě. Na zobrazovači se poté zobrazuje v tomto pořadí: požadovaná teplota; změřená (reálná) teplota; střída PWM; orientační výkon akčního členu; zpráva, jestli akční člen právě chladí nebo hřeje; napětí na měřené součástce; položka exit. Pokud je zařízení připojeno k PC tak se také po sériové lince odesílají aktuální změřené hodnoty teploty a napětí na součástce ve formátu [teplota °C]\_[napětí mV]. V tomto režimu lze požadovanou teplotu měnit přidržením tlačítka + nebo -. Při stisku tlačítka + se požadovaná teplota zvedne o 0,1°C. Při držení tlačítka + se požadovaná teplota bude postupně zvedat nejdříve po 0,1°C, poté po 1°C a nakonec po 10°C. Po uvolnění tlačítka a dalším stisku se toto zase opakuje. Tento princip operace platí stejně i pro tlačítko -, ale s tím rozdílem, že toto tlačítko teplotu snižuje. Rozsah nastavitelné teploty je -10°C až 100°C. Při stisku tlačítka OK v tomto režimu dojde k přechodu do základního menu.

Auto – automatické měření: zařízení bude automaticky upravovat teplotu podle nastavení. V tomto režimu je nutné, aby bylo zařízení připojeno k PC. Při zvolení této položky se objeví menu s nastavením parametrů. Mezi položkami menu se přepíná pomocí tlačítek + a -. Na zobrazovači jsou tyto položky v tomto pořadí: startovní teplota měření; konečná teplota měření; teplotní krok měření; časová délka mezi jednotlivými kroky; start; exit. Tento režim funguje tak, že zařízení provede automatické měření v zadaném intervalu. Hodnoty těchto položek se nastavují přidržením tlačítka OK na položce a současným stiskem tlačítka + nebo -. Změna hodnot položek funguje podobně jako v ručním měření, tedy při stisku se změní o malou hodnotu a při držení se postupně zvedá o větší a větší hodnotu. Startovní a konečnou teplotu lze nastavovat v rozmezí -10°C až 100°C, teplotní krok v rozmezí 0,1°C až 10°C a čas teplotního kroku rozmezí 1 minuta až 60 minut, avšak minimální čas teplotního kroku se mění podle nastaveného teplotního kroku, tedy při teplotním kroku 0,1°C bude

minimální možný čas 1 minuta, při 0,3°C to již budou 2 minuty, při 1°C to budou 3 minuty a při 4°C a více to bude 5 minut. Chování vysvětleno na příkladu: pokud je startovní teplota -10°C, konečná teplota 100°C, teplotní krok 0,1°C a čas kroku 1 minuta, tak se zařízení po zvolení položky start přepne do režimu automatického měření a nastaví teplotu na -10°C, k tomu také odešle informace o měření do PC. Po uplynutí 5 minut pro stabilizaci teploty se začne odpočítávat 1 minuta, po které dojde ke změření testované součástky (zprůměrování 10 hodnot napětí) a odeslání této hodnoty do PC ve formátu [teplota °C]\_[napětí mV]. Poté se požadovaná teplota automaticky nastaví na -9,9°C a zařízení opět čeká minutu. Po minutě se znovu provede měření, hodnota se odešle a teplota změní. Takto se to bude opakovat až do konečné teploty 100°C, kdy zařízení provede poslední měření a samo se vrátí do menu s volbou parametrů. Při běhu měření se na zobrazovači zobrazují aktuální parametry zařízení. Při stisknutí tlačítka OK při měření se zařízení vrátí do menu nastavení parametrů. Při zvolení položky exit v menu nastavení parametrů se přejde do základního menu.

Test kom. – test komunikace: zvolení této položky vypíše na zobrazovači informace o použité komunikaci (9600 baud) a odešle jednou po sériové lince hlášku „Test komunikace“ do PC. Dalším stiskem OK se lze vrátit do základního menu.



Obrázek 22: Mapa menu



Obrázek 23: Ovládací prvky

```
Automaticke mereni
Zacatek = -10.00 °C
Konec = 100.00 °C
Krok = 1.00 °C
Cas kroku = 3 m
Format:
[teplota °C]_[napeti mV]
-10.0625_734.6237
-8.9375_732.6530
-8.0625_731.2297
-7.0625_728.6022
```

Obrázek 24: Příklad vzhledu odeslaných informací do PC

```
93.0625_561.6422
94.0000_559.1242
95.0000_557.3724
96.0000_555.5112
97.0000_550.5845
98.0000_550.6940
99.0000_550.1466
100.0625_546.2053
Konec mereni
```

Obrázek 25: Ukázka zakončení měření

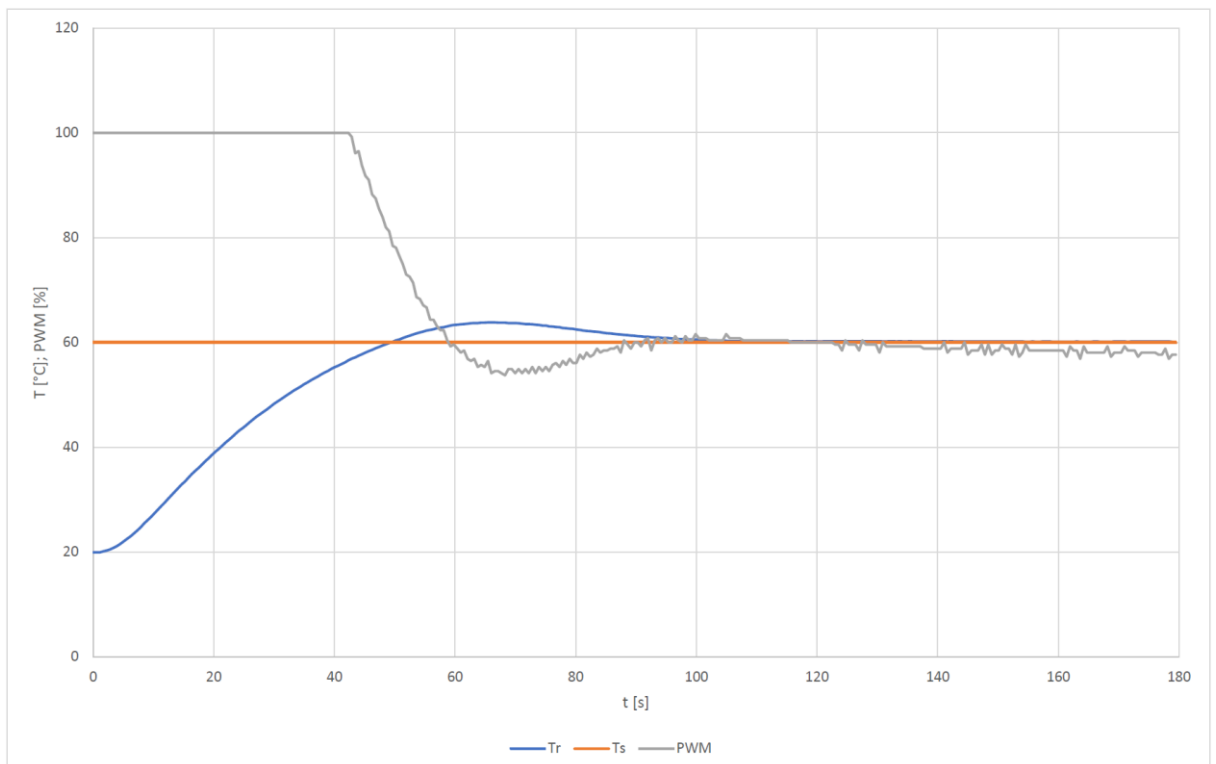
## 2.6 Měření

### 2.6.1 Teplotní stabilita, rozsah, přesnost

Zařízení má být schopné přesně udržet požadovanou teplotu. Zařízení je schopné na celém rozsahu (-10°C až 100°C) dlouhodobě udržet požadovanou teplotu ve stabilitě  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  za normálních podmínek (20°C okolní teplota). Při velké skokové změně požadované teploty trvá přibližně 2 minuty, než se zařízení kompletně ustálí. Celý systém má poměrně dlouhé časové konstanty. Při malých změnách požadované teploty je změna reálné teploty v podstatě lineární, není zde viditelný žádný zajímavý přechodový děj, který lze jinak pozorovat u prudkých změn.

Přesnost teploměru DS18B20 byla také odzkoušena za pomoci přesného rtuťového laboratorního teploměru. Nebyla nalezena žádná významná odchylka, teploměr DS18B20 se tedy dá považovat za přesný.

Nastavení koeficientů regulátoru bylo od začátku pouze řešeno metodou pokus-omyl, dokud se nedospělo k nejvyšší stabilitě zařízení. Dospělo se k nejlepším hodnotám koeficientů pro toto zařízení  $K_p = 15$ ,  $K_i = 0,5$  a  $K_d = 20$ .



Obrázek 26: Odezva systému na skokovou změnu požadované teploty v čase 0 na 60°C (okolní teplota 20°C)

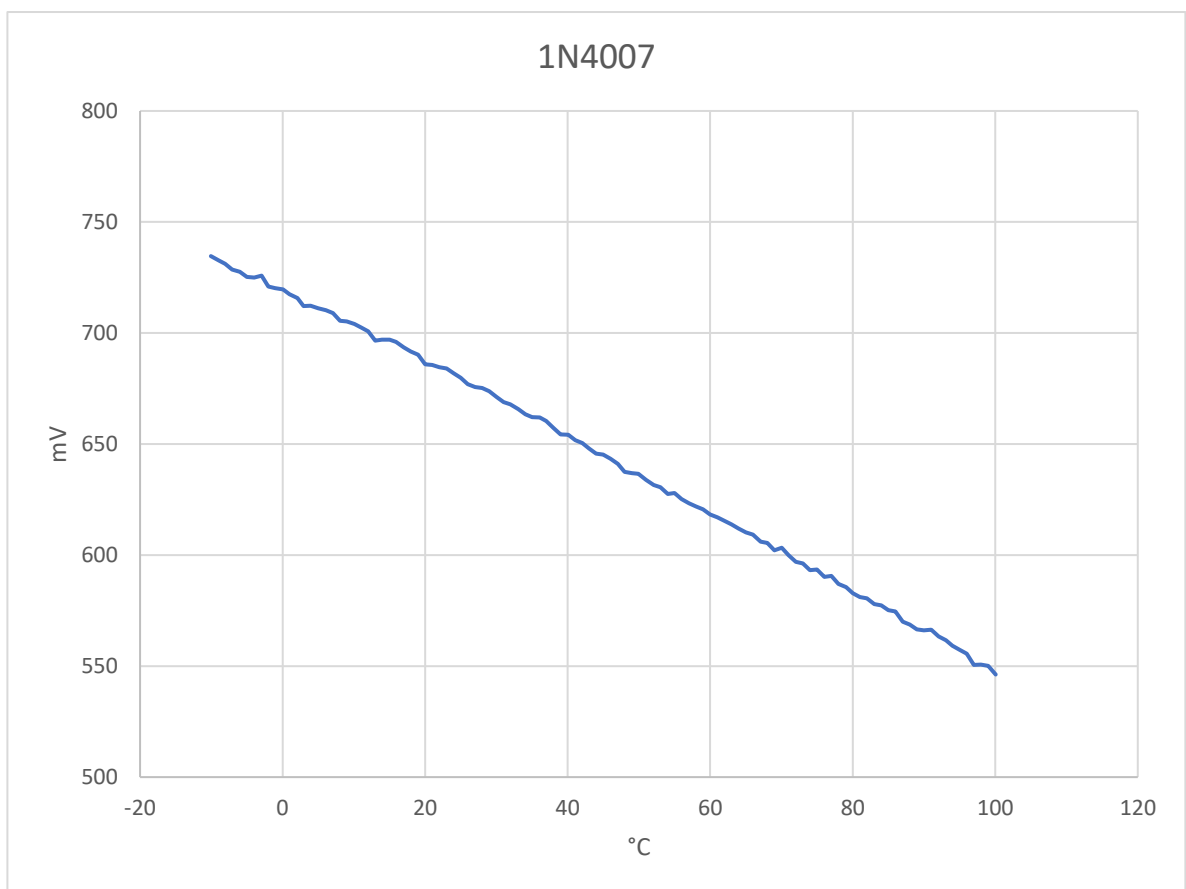


## 2.6.2 Naměřené výsledky diod

Jako měřené součástky jsou zvoleny dvě diody, jelikož se na PN přechodu dají dobře pozorovat teplotní závislosti. Obecně lze říci, že s rostoucí teplotou křemíkové diody klesá její prahové napětí, což je minimální napětí, které musí být překonáno, aby dioda začala vodit proud. Tento efekt je způsoben tím, že s rostoucí teplotou se snižuje šířka zakázaného pásma, což znamená, že se zvýší pravděpodobnost termického vynuceného průchodu proudem. To může vést k tomu, že dioda bude více vodivá i v opačném směru, což se označuje jako zpětný průraz. S rostoucí teplotou klesá maximální proud, který dioda může vést, a zvyšuje se množství šumu. To může být způsobeno například zvýšením mobility nosičů náboje. (Effect of temperature on diode characteristics, 2022)

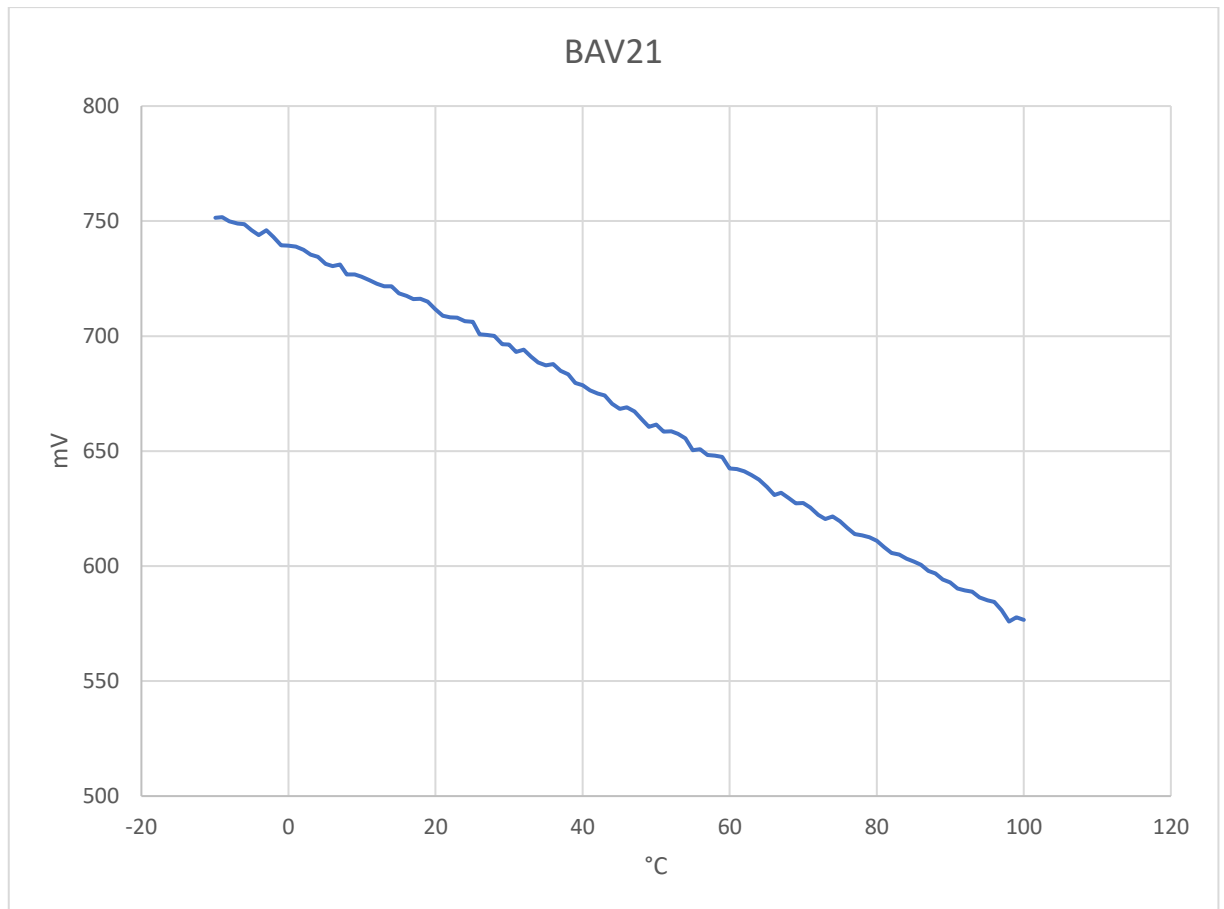
Obě diody byly měřeny v rozsahu  $-10^{\circ}\text{C}$  až  $100^{\circ}\text{C}$  s krokem měření  $1^{\circ}\text{C}$  a časem kroku měření 3 minuty. V měřícím obvodu je v sérii s diodou také  $1\text{k}\Omega$  rezistor připojený k  $5\text{V}$ .

Dioda 1N4007 má v podstatě skoro lineární charakteristiku, přičemž začínala na  $734\text{mV}$  při  $-10^{\circ}\text{C}$  a končila na  $546\text{mV}$  při  $100^{\circ}\text{C}$ . Z toho vychází teplotní závislost přibližně na  $1,7\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 27: Teplotní závislost diody 1N4007

Dioda BAV21 má také v podstatě skoro lineární charakteristiku, přičemž začínala na 751mV při -10°C a končila na 576mV při 100°C. Z toho vychází teplotní závislost přibližně na 1,6mV/°C.



Obrázek 28: Teplotní závislost diody BAV21

## 2.7 Konstrukce

Zařízení je pro jednoduchost zkonstruováno z již hotových modulů. Díky tomu je velice modulární a mohlo by být poskládáno do nespočetného množství forem. Ke konstrukci tohoto zařízení je využit starý plastový kufřík, který je odolný a také umožňuje snadné vložení a upevnění všech použitých modulů. Celé zařízení lze díky tomu snadno přenášet jako jeden kus (když se nepočítá externí napájecí adaptér).

Uvnitř kufříku se nacházejí moduly zdrojů, mikro-kontrolér, modul H-můstku, modul MOSFET spínače a malá univerzální deska plošného spoje, na které se nacházejí operační zesilovače a pomocné obvody.

Na horní straně kufříku se nachází všechny uživatelsky přístupné prvky, tedy samotná teplotní komora s konektory pro testovanou součástku, chladicí aparát, zobrazovač a tlačítka.

Na pravé straně kufříku se nachází už jen napájecí konektor a na levé straně kufříku se nachází pouze USB konektor.

Jedná se o unikátní a subjektivní konstrukci, která však díky modulárnosti může být snadno překonstruována do nespočetného množství forem. Lze použít jiné druhy chladičů, jiné uspořádání ovládacích prvků, jiná pouzdra atd. Ukázka použité konstrukce a zapojení zařízení je v přílohách.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo realizovat malou teplotní komoru s Peltierovým článkem jako akčním členem. V komoře má být přesně a stabilně regulovaná teplota a také zde má být možnost provádět měření součástek.

Po provedení rešerše bylo zjištěno, z jakých dílů bude celé zařízení nejspíše složeno a také jak se vlastně má takové zařízení regulovat. Byly probrány termoelektrické jevy a celkové chování Peltierových článků. Byly zjištěny různé druhy chlazení akčního členu. Také byla probrána problematika teplotních čidel. Došlo též k vysvětlení funkce spojitě regulace, která musí být v zařízení použita.

Poté již nastala samotná konstrukce zařízení, které je pojato takovým způsobem, aby bylo co nejjednodušší. Je tedy využito co nejvíce již hotových modulů. Obvody zařízení jsou rozděleny do silové části a logické části. Tyto obvody jsou od sebe lehce odděleny přes několik prvků. Toto oddělení zajišťuje alespoň částečné zabezpečení logické části. Silová část se skládá ze zdrojů, H-můstku, Peltierova článku, MOSFET spínače a ventilátoru. Logická část se poté skládá z vývojového kitu Arduino UNO, operačních zesilovačů, teploměru, tlačítek a zobrazovače. Dále je možná komunikace s PC pomocí USB. Při práci byl také použit OLED, který se subjektivně jeví jako mnohem lepší a modernější zobrazovač než běžné alfanumerické zobrazovače na principu tekutých krystalů.

Zařízení bylo realizováno a vloženo do praktické, odolné a přitom velmi jednoduché mechanické konstrukce, která umožňuje snadnou obsluhu operátorem. Při konstrukci zařízení bylo využito mnoho použitých součástek, což mohlo učinit práci náročnější, ale za to bylo zařízení mnohem levnější na postavení. Navíc je všeobecně lepší využívat použité součástky, než kupovat nové. Díky těmto součástkám zde bylo mnohem více místa pro experimentování se zařízením. Po sestavení zařízení byl vytvořen program a pak již následovalo dlouhé, celkově od začátku experimentální, ladění zařízení. Kompletně experimentálně bylo nalezeno nejlepší napájecí napětí pro akční člen, aby se maximalizovalo chlazení. Čistě metodou pokus-omyl byly dále nalezeny nejlepší koeficienty pro spojitou regulaci. Díky použití převážně experimentálních metod zde nejsou použity skoro žádné výpočty, které také nejsou vůbec pro konstrukci takového jednoduchého zařízení potřeba. Zařízení dosahuje rozsahu teplot  $-10^{\circ}\text{C}$  až  $100^{\circ}\text{C}$  s přesností nastavení  $0,1^{\circ}\text{C}$ , přičemž teploty  $-10^{\circ}\text{C}$  dosahuje i při zvýšené okolní teplotě, tj. větší než  $20^{\circ}\text{C}$ . Na celém rozsahu je zařízení schopné udržet stabilitu teploty na  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Přesnost teploty a stability byla ověřena přesným rtuťovým laboratorním

teploměrem. Dále má zařízení implementovanou funkci měření testované součástky. Měření je možné dělat v ručním režimu, kde nemusí pracovat s počítačem, ale také má zařízení navíc plně automatizovaný režim, ve kterém dojde ke kompletně samočinnému změření součástky podle zadaných parametrů měření. Poté se s daty dá šikovně pracovat v PC. Zařízení bylo hlavně pojato jako automatické měřicí zařízení. Dále bylo do zařízení navíc implementováno orientační měření výkonu akčního členu, které vyžadovalo implementaci dolní propusti a dalších pomocných obvodů.

Všechny zadané požadavky byly splněny a zařízení kompletně funguje. Zařízení má velmi široký teplotní rozsah, má velmi vysokou přesnost a stabilitu a k tomu je jednoduše složené. Umožňuje velký rozsah napájecích napětí s ochranou proti přepólování. Zařízení díky jednoduchému intuitivnímu menu a ovládacím prvkům snadno umožňuje obsluhu a měření vlastností součástek. Jako hlavní priorita práce bylo právě pojato, aby zařízení umožňovalo snadné měření součástek a precizně regulovalo teplotu. Proto je ovládací menu orientované hlavně na měření součástek. Zařízení je převážně uzpůsobené na měření diod, ale určitě zvládne měřit i jiné součástky, které se měří s rezistorem v sérii. Při tvorbě zařízení byly získány poznatky o nastavování regulátorů, Peltierových článků a o tepelných soustavách.

Oblasti zařízení, které by mohly být lepší jsou rozhodně implementace plného galvanického oddělení. K tomu také vytvoření pravé DPS. V zařízení je nyní tak málo součástek, že jsou místo vytvořené DPS všechny připájené na malé univerzální desce pro jednoduchost. Při použití více součástek by již bylo užitečné vytvořit DPS. Dále by se zařízení ještě dalo vylepšit lepším chladičem, přesnějším teploměrem a větší komorou. To by mohlo umožnit ještě rychlejší a přesnější regulaci a k tomu také dosáhnout ještě nižších teplot. Všechny tyto vylepšení ale také přicházejí s vyšší celkovou cenou zařízení. Díky využití použitých součástek je právě držena cena zařízení nízko při dosažení stále dobrých výsledků.

Tabulka 1: Seznam parametrů

Vlastnosti:	
Teplotní rozsah:	-10°C až 100°C
Přesnost nastavení teploty:	0,1°C
Teplotní stabilita:	+0,1°C
Režimy měření:	Manuální a automatický
Teplotní krok aut. měření:	0,1°C až 10°C
Délka jednoho teplotního kroku aut. měření:	1 minuta až 60 minut
Měřicí obvod:	5V s rezistorem 1kΩ v sérii
Měřitelné napětí:	0V až 1,1V
Přesnost odeslaných dat:	4 desetinná místa
Aut. měření se vzrůstající nebo klesající teplotou (oba směry):	Ano
Použitelná aktivní plocha pro měřenou součástku:	15x25mm
Komunikace s PC:	Virtuální sériový port přes USB
Maximální okolní teplota pro plný provozní rozsah:	<25°C
Spotřeba energie:	<50W
Napájecí napětí:	15V až 35V DC
Ochrana proti přepólování:	Ano
Zobrazovač:	0,96" 128x64px černobílý OLED
Hmotnost:	900g

## POUŽITÁ LITERATURA

KESTER, Walt. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning. Analog Devices, 1999. ISBN 0-916550-20-6.

Arduino - Home. Arduino - Home [online]. [cit. 2023.04.17].

Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>

ATmega328p [online]. [cit. 2023.04.17]. Dostupné z:

[https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)

BTS7960B [online]. [cit. 2023.04.17]. Dostupné z:

[https://www.infineon.com/dgdl/BTS7960\\_Datasheet.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b43945006d5d](https://www.infineon.com/dgdl/BTS7960_Datasheet.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b43945006d5d)

Designing with RTD Temperature Sensors. Design Engineering News, Engineering Videos, Engineering Resources [online]. Copyright © 2023 WTWH Media LLC. All Rights Reserved.

[cit. 17.04.2023]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/designing-with-rtd-temperature-sensors/>

Displej OLED 0,96", 128x64 znaků, IIC/I2C, 4piny, bílý : H A D E X , spol. s r.o..

H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 27.04.2023].

Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m508b-displej-oled-096-128x64-znaku-iici2c-4piny-bily/>

DS18B20 [online]. [cit. 2023.04.17]. Dostupné z:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>

Effect of temperature on diode characteristics - Semiconductor for You. Semiconductor News, Technology, Market - Semiconductor for You [online]. Copyright © 2022

[cit. 30.04.2023]. Dostupné z: <https://www.semiconductorforu.com/effect-temperature-v-characteristics/>

Encyklopedie plastů: polystyreny (PS) - Samosebou.cz. Samosebou.cz [online]. Copyright © 2023 [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/09/04/encyklopedie-plastu-polystyreny-ps/>

H-můstek BTS7960B pro stejnosměrné motory : H A D E X , spol. s r.o..

H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 23.04.2023]. Dostupné

z: <https://www.hadex.cz/m536-h-mustek-bts7960b-pro-stejnosmerne-motory/>

Chladiče a ventilátor 12V k Peltierovému článku : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/h996-chladice-a-ventilator-12v-k-peltierovemu-clanku/>

LM358N [online]. [cit. 2023.04.17]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/snosbt3j/snosbt3j.pdf?ts=1682204474376&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/snosbt3j/snosbt3j.pdf?ts=1682204474376&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

Napájecí modul, step-down měnič 6-40V/1,5-35V 20A : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 28.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m411a-napajeci-modul-step-down-menic-6-40v15-35v-20a/>

Napájecí modul, step-down měnič 3A s LM2596, Uinmax.35V : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 28.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m406-napajeci-modul-step-down-menic-3a-s-lm2596-uinmax35v/>

NTC Thermistor - Vsec elec. Vsec elec [online]. Copyright © 2019 Vsec. [cit. 17.04.2023]. Dostupné z: <https://www.vsec.top/product/ntc-thermistor/>

Peltierův článek TEC1-12706, 12V 4A : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 23.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/h995-peltieruv-clanek-tec1-12706-12v-4a/>

Peltierův jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>

Pt100 temperature sensor – useful things to know. Beamex Blog for Calibration Professionals [online]. Copyright © 2019 Beamex Oy Ab. All rights reserved. [cit. 17.04.2023]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/pt100-temperature-sensor#RTD-sensors>

Seebeckův jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>

TEC1-12706 [online]. [cit. 17.04.2023]. Dostupné z: [https://asset.re-in.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA\\_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf](https://asset.re-in.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf)



Teplotní sonda DS18B20 100cm : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 23.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/r255-teplotni-sonda-ds18b20-100cm/>

Thermistor. In: Wikipedia [online]. [cit. 17.04.2023]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>

Thermocouple. In: Wikipedia [online]. [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>

Thomsonův jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>

Types of Thermal Paste (Grease): Composition Explained - Cyber Risk. Cyber Risk - Tech, Packets, Hardware, and More [online]. Copyright © 2021 [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://cyberisk.biz/types-of-thermal-paste/>

Výkonový spínač MOSFET PWM 15A 400W, modul XY-MOS : H A D E X , spol. s r.o.. H A D E X , spol. s r.o. [online]. Copyright © [cit. 23.04.2023]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m369-vykonovy-spinac-mosfet-pwm-15a-400w-modul-xy-mos/>

What Is an H-Bridge?. Electronics Explained The Easy Way [online]. [cit. 17.04.2023]. Dostupné z: <https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

### **A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ**

Příloha A.1: Blokové schéma zapojení zařízení

Příloha A.2: Schéma zapojení součástí a modulů zařízení

Příloha A.3: Vnitřní uspořádání zařízení

Příloha A.4: Vnější uspořádání zařízení

Příloha A.5: Detail komory

Příloha A.6: Komora s nasazeným krytem

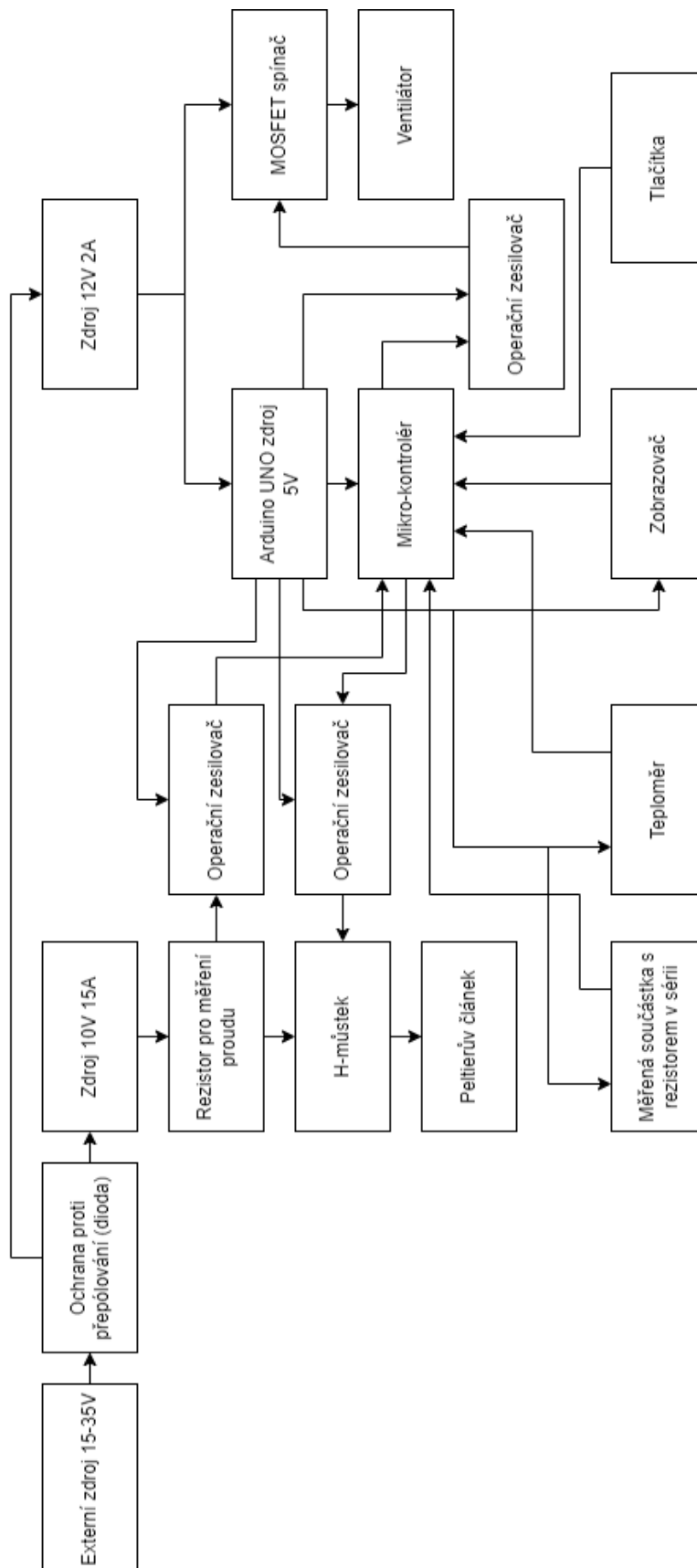
Příloha A.7: Pohled na zařízení zprava

Příloha A.8: Pohled na zařízení zleva

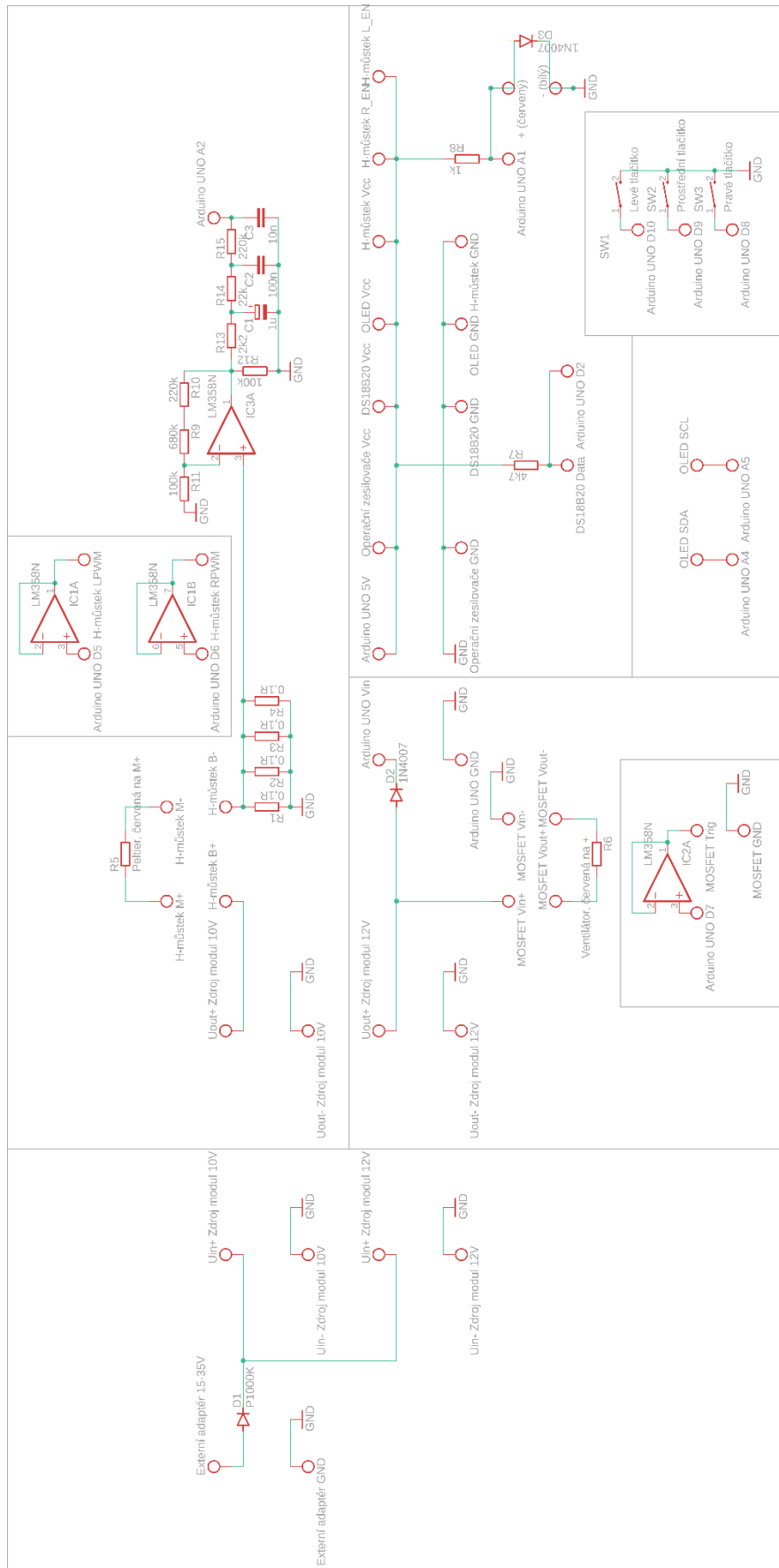
### **B SEZNAM SOUČÁSTEK**

# A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

## PŘÍLOHA A.1: Blokové schéma zapojení zařízení



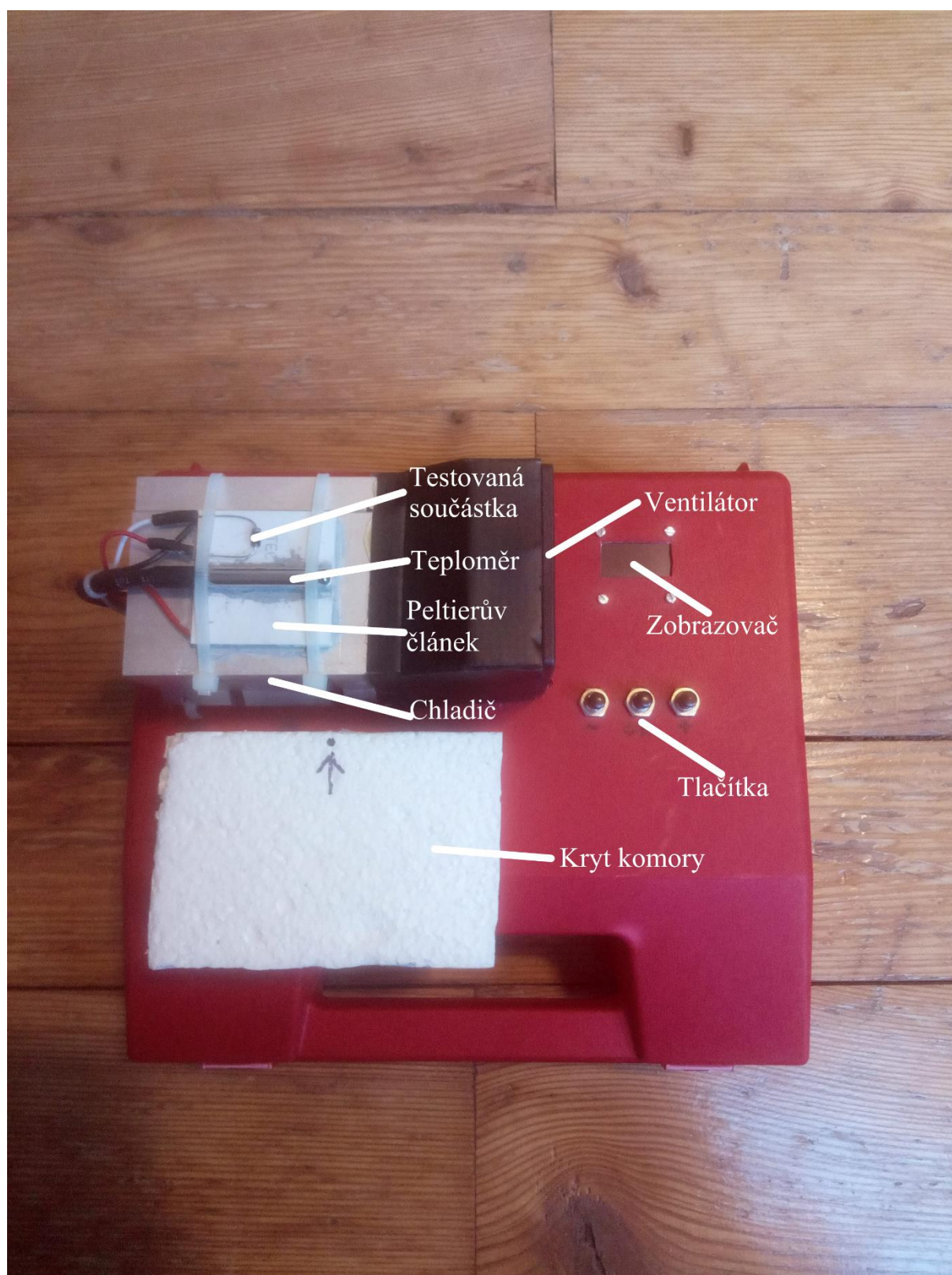
# PŘÍLOHA A.2: Schéma zapojení součástek a modulů zařízení



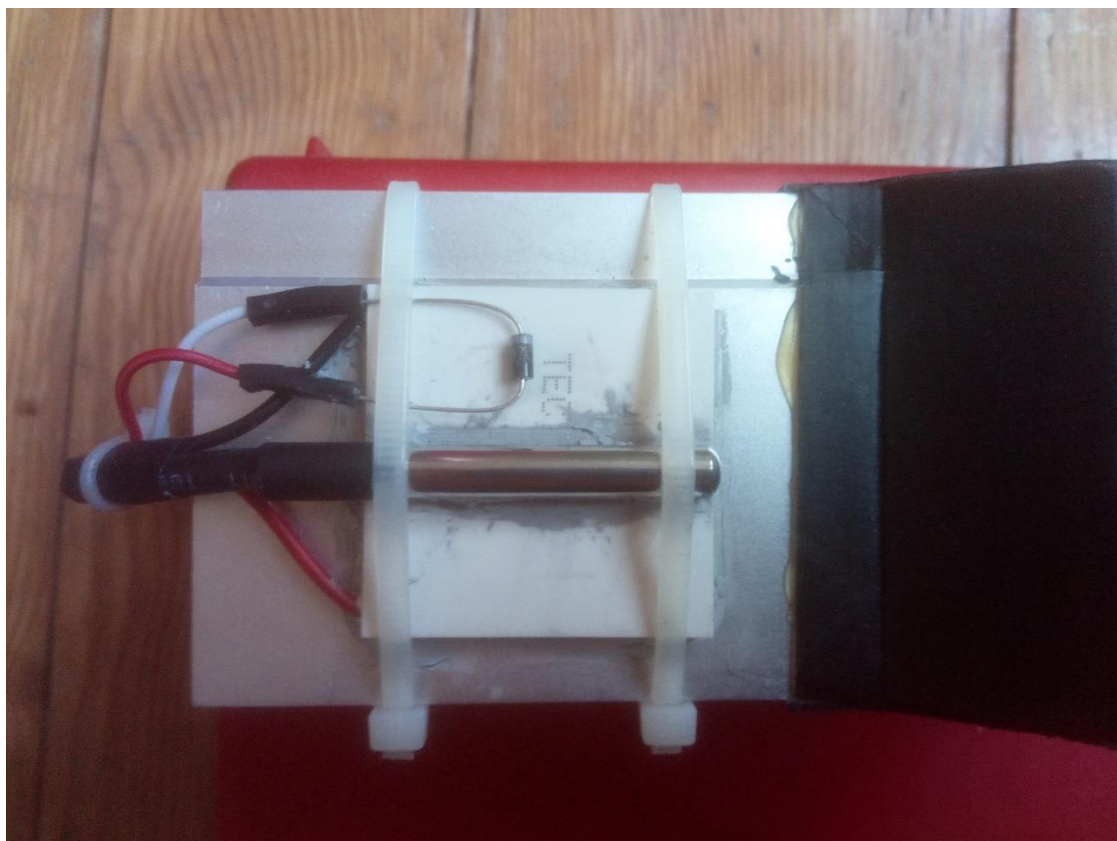
### PŘÍLOHA A.3: Vnitřní uspořádání zařízení



## PŘÍLOHA A.4: Vnější uspořádání zařízení



## PŘÍLOHA A.5: Detail komory



## PŘÍLOHA A.6: Komora s nasazeným krytem



## PŘÍLOHA A.7: Pohled na zařízení zprava





## PŘÍLOHA A.8: Pohled na zařízení zleva



## B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
D1	P1000K	P600	Křemíková dioda
D2	1N4007	DO-41	Křemíková dioda
D3	1N4007	DO-41	Křemíková dioda (testovaná součástka)
R1	0,1 $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R2	0,1 $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R3	0,1 $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R4	0,1 $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R5	TEC1-12706	Silikon + keramika	Peltiérův článek
R6	12V	60mm	DC ventilátor
R7	4,7k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R8	1k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R9	680k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R10	220k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R11	100k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R12	100k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R13	2,2k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R14	22k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
R15	220k $\Omega$	207	Metaloxydový rezistor
C1	1 $\mu$ F	10x16	Elektrolytický kondenzátor
C2	100nF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C3	10nF	C5B2,6	Keramický kondenzátor
IC1	LM358N	DIL-8	Operační zesilovač
IC2	LM358N	DIL-8	Operační zesilovač
SW1	Spínací	PBS-10B	Tlačítko
SW2	Spínací	PBS-10B	Tlačítko
SW3	Spínací	PBS-10B	Tlačítko
OLED	Bílý I2C 128x64	0,96" SSD1306	Zobrazovač
Barrel jack	2,1mm	Do panelu	Koaxiální napájecí konektor
Regulovatelný zdroj 10V <a href="https://www.hadex.cz/m411a-napajeci-modul-step-down-menic-6-40v15-35v-20a/">https://www.hadex.cz/m411a-napajeci-modul-step-down-menic-6-40v15-35v-20a/</a>			
Regulovatelný zdroj 12V <a href="https://www.hadex.cz/m406-napajeci-modul-step-down-menic-3a-s-lm2596-uinmax35v/">https://www.hadex.cz/m406-napajeci-modul-step-down-menic-3a-s-lm2596-uinmax35v/</a>			
MOSFET spínač 15A <a href="https://www.hadex.cz/m369-vykonovy-spinac-mosfet-pwm-15a-400w-modul-xy-mos/">https://www.hadex.cz/m369-vykonovy-spinac-mosfet-pwm-15a-400w-modul-xy-mos/</a>			
H-můstek BTS7960B <a href="https://www.hadex.cz/m536-h-mustek-bts7960b-pro-stejnoserne-motory/">https://www.hadex.cz/m536-h-mustek-bts7960b-pro-stejnoserne-motory/</a>			
Arduino UNO R3 <a href="https://www.hadex.cz/m380a-uno-r3-atmega328p-klon-arduino-s-ch340/">https://www.hadex.cz/m380a-uno-r3-atmega328p-klon-arduino-s-ch340/</a>			
DUPONT propojovací vodiče			

## **OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD NOSIČE**

Elektronická verze bakalářské práce

Zdrojový kód programu

Použité knihovny

Schéma zapojení