

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## Elektronicky řízená teplotní komora s Peltierovými články

**Tomáš Šprachta**

Vedoucí: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
Obor: Kybernetika a robotika  
Květen 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šprachta** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **492324**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Elektronicky řízená teplotní komora s Peltierovými články**

Název bakalářské práce anglicky:

**Electronically controlled temperature chamber with Peltier elements**

Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte současný stav řešení systémů pro řízení teploty s Peltierovými články pro objemy dm<sup>3</sup>.
2. Navrhněte teplotní komoru o objemu cca 2 dm<sup>3</sup> s chlazením i ohřevem zajišťovaným Peltierovými články. Vytvořte model teplotní komory se simulací závislosti vnitřní teploty na vstupních veličinách. Navrhněte a implementujte regulátor pro řízení teploty v komoře v rozmezí 5 °C - 45 °C při teplotě okolí 25°C. Zajistěte nastavení a zobrazení vnitřní teploty komory.
3. Zjistěte dosažené parametry, především závislost vnitřní teploty na vnější teplotě, hysterezi řízení vnitřní teploty, rychlost chlazení a ohřevu, přesnost regulace teploty. Naměřené hodnoty porovnejte se simulovanými daty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ROWE, D. M.: Handbook of Thermoelectrics. CRC Press, July 1995, ISBN 0849301467  
[2] SHARP, J. GOLDSMID, H. J. NOLAS, G. S.: Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Development. Springer Verlag, August 2001.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Miroslav Husák, CSc. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.12.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2022/2023**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## Poděkování

Chtěl bych poděkovat především své rodině za podporu nejen finanční, ale i psychickou, kdy mi pomáhali udržet si ke studiu správný a zdravý přístup. Dále bych rád poděkoval všem svým přátelům, s nimiž mi byla konzultace různých problémů vždy přínosem. V neposlední řadě bych rád poděkoval také vedoucímu práce panu prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za věcné připomínky a odborné vedení práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 20. května 2022

## Abstrakt

V práci je popsán princip chlazení a ohřevu pomocí Peltierových článků a jsou v ní uvedeny základní zákonitosti s tímto principem spojené. Dále práce uvádí některé teplotní komory s Peltierovými články a jejich využití. Hlavním cílem předložené práce je návrh a realizace teplotní komory včetně modelu celého tepelného systému pro simulaci vnitřní teploty komory a jsou v ní zahrnuta také měření pro zhodnocení dosažených výsledků.

**Klíčová slova:** Peltierův článek, Peltierova komora, teplotní regulace

**Vedoucí:** prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

## Abstract

The thesis describes cooling and heating principles with Peltier elements, and there are fundamental regularities connected with these principles written in the thesis. Furthermore, the thesis presents some temperature chambers with Peltier elements and their applications. The primary purpose of the thesis is to design and construct a temperature chamber with Peltier elements, including designing the model of the temperature system for simulation temperature inside the chamber and there are measurements for evaluation of reached results involved in the thesis.

**Keywords:** Peltier element, Peltier chamber, temperature regulation

**Title translation:** Electronically controlled temperature chamber with Peltier elements

# Obsah

<b>Tabulka použitých zkratk a symbolů</b>	<b>1</b>		
Tabulka použitých veličin	1		
Tabulka použitých zkratk	2		
<b>Část I</b>			
<b>Úvodní část</b>			
<b>1 Úvod</b>	<b>7</b>		
<b>Část II</b>			
<b>Teoretická část</b>			
<b>2 Rešerše</b>	<b>11</b>		
2.1 Peltierův jev	11		
2.2 Peltierův článek	12		
2.3 Model Peltierova článku	14		
2.4 Teorie modelování tepelných systémů	15		
2.5 Peltierovy komory	17		
2.5.1 Peltierova komora PKK-50 od společnosti Kambič	17		
2.5.2 Peltierova komora HPPeco od společnosti Memmert	18		
2.5.3 Peltierova komora KBF115 od společnosti BINDER	18		
2.5.4 Peltierova komora pro testování bioprocusů	19		
2.5.5 Peltierova komora pro kalorimetrické měření ztrátového výkonu	20		
<b>Část III</b>			
<b>Praktická část</b>			
<b>3 Modelování a simulace</b>	<b>23</b>		
3.1 Diferenciální rovnice modelu systému	23		
3.2 Nelineární stavový model systému	24		
3.3 Skokové odezvy modelu systému	25		
<b>4 Elektronická část</b>	<b>27</b>		
4.1 Výkonová část	27		
4.1.1 Zdroj	28		
4.1.2 Spínač	28		
4.1.3 Peltierovy články	29		
4.1.4 Napájení řídicí elektroniky	30		
4.2 Řídicí část	30		
4.2.1 Mikrokontrolér	30		
4.2.2 Displej	31		
4.2.3 Tlačítka	32		
4.2.4 Senzory teploty	32		
<b>5 Regulace</b>	<b>35</b>		
5.1 Identifikace systému	35		
5.2 Návrh regulátoru	36		
<b>6 Softwarové řešení</b>	<b>39</b>		
6.1 Hlavní větev programu	40		
6.1.1 Inicializace	40		
6.1.2 Načtení vstupů	40		
6.1.3 Regulace	40		
6.1.4 Nastavení výstupů	40		
6.2 Přerušování	41		
6.2.1 ADC	41		
6.2.2 GPIO vstupy	41		
<b>7 Konstrukce</b>	<b>43</b>		
7.1 Tepelně izolovaná komora	43		
7.1.1 Vnější konstrukce	43		
7.1.2 Vnitřní konstrukce	44		
7.1.3 Vnější chlazení	45		
7.2 Kryt elektroniky	46		
<b>Část IV</b>			
<b>Diskuzní část</b>			
<b>8 Dosažené výsledky</b>	<b>49</b>		
8.1 Měření teplotních vlastností komory	49		
8.1.1 Skokové odezvy vnitřní teploty	49		
8.1.2 Přesnost regulace vnitřní teploty	50		
8.1.3 Hystereze vnitřní teploty	51		
8.1.4 Vliv teploty okolí na regulaci vnitřní teploty	52		
8.2 Ekonomická rozvaha	53		
8.3 Porovnání s dostupnými teplotními komorami	54		
<b>Část V</b>			
<b>Závěrečná část</b>			
<b>9 Závěr</b>	<b>57</b>		
<b>Přílohy</b>			
<b>A Schémata a nákresy</b>	<b>3</b>		
<b>B Fotografie</b>	<b>7</b>		
<b>C Seznam elektronických příloh</b>	<b>11</b>		
<b>D Literatura</b>	<b>13</b>		

## Obrázky

2.1 Znázornění Peltierova jevu . . . . .	11	5.4 Skokové odezvy uzavřených regulačních smyček pro chlazení a ohřev . . . . .	37
2.2 Peltierův modul . . . . .	12	6.1 Softwarový diagram . . . . .	39
2.3 Charakteristiky Peltierova článku TEC1-12710 . . . . .	14	6.2 Zobrazení na LCD . . . . .	41
2.4 Schéma modelu Peltierova článku	15	8.1 Skokové odezvy vnitřní teploty pro chlazení napětími 12 V a 9 V při teplotě okolí 25 °C . . . . .	49
2.5 Schéma izolované komory . . . . .	16	8.2 Skokové odezvy vnitřní teploty pro ohřev napětími 2 V a 3 V při teplotě okolí 25 °C . . . . .	50
2.6 Schéma náhradního elektrického obvodu . . . . .	16	8.3 Přesnost regulace vnitřní teploty pro chlazení s referenčními teplotami 5 °C a 15 °C při teplotě okolí 25 °C	50
2.7 Peltierova komora PKK-50 od společnosti Kambič . . . . .	17	8.4 Přesnost regulace vnitřní teploty pro ohřev s referenčními teplotami 35 °C a 45 °C při teplotě okolí 25 °C	51
2.8 Peltierova komora HP Peco od společnosti Memmert . . . . .	18	8.5 Hystereze vnitřní teploty pro počáteční teploty 5 °C a 45 °C při teplotě okolí 27 °C . . . . .	52
2.9 Peltierova komora KBF115 od společnosti BINDER . . . . .	19	8.6 Vliv teploty okolí na regulaci vnitřní teploty s referenčními teplotami 35 °C a 45 °C . . . . .	52
2.10 Peltierova komora pro testování bioprocusů . . . . .	20	A.1 Schémata modelu pro chlazení a ohřev . . . . .	3
2.11 Peltierova komora pro kalorimetrické měření ztrátového výkonu při elektronickém spínání .	20	A.2 Celkový náčrt konstrukce . . . . .	4
3.1 Schéma náhradního elektrického obvodu pro teplotní komoru . . . . .	23	A.3 Náčrty přední části tepelné komory, zadní části tepelné komory, boční části tepelné komory, spodní části tepelné komory, víka tepelné komory, spodní části krytu elektroniky, předního panelu krytu elektroniky a zadního panelu krytu elektroniky . . . . .	6
3.2 Skokové odezvy modelu teplotní komory pro chlazení a ohřev při teplotě okolí 25 °C . . . . .	25	B.1 Výsledné zapojení elektroniky . . . . .	7
4.1 Diagram zapojení elektroniky . . . . .	27	B.2 Rozvod napájení a obvod měření teploty na deskách univerzálních plošných spojů . . . . .	8
4.2 Spínaný zdroj . . . . .	28	B.3 Přední a boční část výsledné podoby zařízení . . . . .	8
4.3 H-můstek . . . . .	29	B.4 Vnější chlazení zepředu, vnější chlazení shora, vnitřní chlazení s izolací a víko tepelné komory . . . . .	9
4.4 Peltierův článek TEC1-127HTS . . . . .	29		
4.5 Step down DC měnič . . . . .	30		
4.6 Využití jednotlivých pinů vývojové desky s mikrokontrolérem . . . . .	31		
4.7 LCD . . . . .	32		
4.8 Teplotní závislost odporu NTC termistoru . . . . .	33		
4.9 Schéma obvodu měření teploty . . . . .	33		
5.1 Naměřené skokové odezvy vnitřní teploty komory pro chlazení vstupním napětím 9 V a pro ohřev vstupním napětím 3 V při teplotě okolí 25 °C . . . . .	35		
5.2 Upravené skokové odezvy vnitřní teploty komory pro chlazení a ohřev . . . . .	36		
5.3 Porovnání skokových odezev skutečného a identifikovaného systému pro chlazení a ohřev . . . . .	36		

B.5 Přední panel, zadní panel, spodní a boční část krytu elektroniky . . . . .	9
---	---

## Tabulky

1 Použité veličiny . . . . .	1
2 Použité zkratky . . . . .	2
2.1 Základní parametry Peltierova modulu TEC1-12710 . . . . .	13
7.1 Součásti vnější konstrukce tepelné komory . . . . .	44
7.2 Součásti vnitřní konstrukce tepelné komory . . . . .	45
7.3 Součásti vnějšího chlazení tepelné komory . . . . .	46
7.4 Součásti krytu elektroniky . . . . .	46
8.1 Doby ustálení a relativní překmity	51
8.2 Ceny elektronických součástí . . .	53
8.3 Ceny mechanických součástí . . .	53



## Tabulka použitých zkratk a symbolů

### Tabulka použitých veličin

**Tabulka 1:** Použité veličiny

Označení	Jednotka	Veličina
$\alpha$	$V \cdot K^{-1}$	Seebeckův koeficient
$\beta$	$W \cdot A^{-1}$	Peltierův koeficient
B	-	Koeficient NTC termistoru
$C_s$	F	Elektrická kapacita S&H obvodu MCU
$C_\theta$	$J \cdot K^{-1}$	Tepelná kapacita
$c$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
$C_{\theta_c}$	$J \cdot K^{-1}$	Tepelná kapacita vnitřního chladiče komory
$C_{\theta_v}$	$J \cdot K^{-1}$	Tepelná kapacita vzduchu uvnitř komory
$d$	m	Délka (tloušťka)
$\Delta T$	K	Rozdíl teplot horké a chladné strany Peltierova článku
$f_{adc}$	Hz	Frekvence ADC mikrokontroléru
$G_{ic}$	-	Přenos identifikovaného systému pro chlazení
$G_{ih}$	-	Přenos identifikovaného systému pro ohřev
$I$	A	Elektrický proud
$K_{pc}$	-	Proporcionální složka regulátoru pro chlazení
$K_{sc}$	-	Sumační složka regulátoru pro chlazení
$K_{ph}$	-	Proporcionální složka regulátoru pro ohřev
$K_{sh}$	-	Sumační složka regulátoru pro ohřev
$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
$m$	kg	Hmotnost
$n$	kg	Počet bitů ADC mikrokontroléru
$q$	W	Tepelný tok
$q_c$	W	Tepelný tok odebíraný chladnou stranou Peltierova článku

$q_h$	W	Tepelný tok dodávaný horkou stranou Peltierova článku
$R$	$\Omega$	Elektrický odpor
$R_{in}$	$\Omega$	Vstupní elektrický odpor S&H obvodu MCU
$R_m$	$\Omega$	Elektrický odpor Peltierova článku
$R_p$	$\Omega$	Elektrický odpor předřadného rezistoru
$R_\theta$	$K \cdot W^{-1}$	Tepelný odpor
$R_{\theta c}$	$K \cdot W^{-1}$	Tepelný odpor vnitřního chladiče komory
$R_{\theta m}$	$K \cdot W^{-1}$	Tepelný odpor Peltierova článku
$R_{\theta s}$	$K \cdot W^{-1}$	Tepelný odpor stěny komory
$R_T$	$\Omega$	Elektrický odpor NTC termistoru
$R_{T0}$	$\Omega$	Jmenovitý elektrický odpor NTC termistoru
$S$	$m^2$	Plocha
$t_c$	cyklus	Doba převodu ADC mikrokontroléru
$t_s$	s	Doba ustálení
$t_{_1}$	$^{\circ}C$	Zobrazovaná teplota levého vnějšího chladiče
$t_{_2}$	$^{\circ}C$	Zobrazovaná teplota pravého vnějšího chladiče
$t_{_i}$	$^{\circ}C$	Zobrazovaná teplota uvnitř komory
$t_{_o}$	$^{\circ}C$	Zobrazovaná teplota vně komory
$t_{_s}$	$^{\circ}C$	Zobrazovaná nastavená vnitřní teplota komory
$T$	K	Teplota
$T_0$	K	Jmenovitá teplota NTC termistoru
$T_a$	K	Teplota okolí
$T_c$	K	Teplota chladné strany Peltierova článku
$T_h$	K	Teplota horké strany Peltierova článku
$T_i$	K	Vnitřní teplota komory
$T_{ref}$	$^{\circ}C$	Referenční teplota
$OS$	%	Relativní překmit
$U$	V	Elektrické napětí
$U_n$	V	Napájecí elektrické napětí

## Tabulka použitých zkratk

**Tabulka 2:** Použité zkratky

Označení	Význam
ADC	Analogově digitální převodník
DC	Stejnoseměrná obvodová veličina
EPS	Expandovaný polystyren
GND	Potenciálová zem
CH	Kanál ADC
I2C	Interně integrovaný obvod
LCD	Displej z tekutých krystalů



M3	Metrický závist s vnějším průměrem 3 mm
M4	Metrický závist s vnějším průměrem 4 mm
NTC	Negativní teplotní koeficient
PWM	Pulsně šířková modulace
RS-232	Sériová linka
S&H	Vzorkovací obvod
SCL	Hodinový signál I2C
SDA	Datový signál I2C
TEC	Termoelektrický chladič
TFT	Tenkvrstvý tranzistor
USART	Univerzální synchronní a asynchronní sériové rozhraní
USB	Univerzální sériová sběrnice





# Část I

## Úvodní část



# Kapitola 1

## Úvod

Práce je zaměřena na problematiku teplotních komor malých objemů s možností regulace vnitřní teploty. Tyto komory nacházejí své využití například v biologii, elektrotechnice či chemii. Téma jsem si zvolil kvůli jeho komplexnosti, jelikož propojuje obory jako fyzika, elektrotechnika či řízení systémů a zahrnuje i návrh konstrukce zařízení. Na práci se mi zároveň líbí, že jejím výstupem je kompletní samostatně navržený výrobek a nikoli jen například jeho dílčí segment.

Teoretická část je zaměřena na shrnutí základních principů týkajících se Peltierových článků a jejich využití při teplotní regulaci. Jsou zde popsány některé z komerčně dostupných a průmyslově vyráběných klimatických komor, ale také komory se speciálním využitím publikované v odborných člancích.

V praktické části je podrobně popsán návrh modelu teplotního systému s parametry konstruované komory. Dále je tento úsek zaměřen na popis návrhu elektronického řešení komory, je zde uveden postup při návrhu regulátoru či rozepsáno softwarového řešení. Součástí této části je i návrh konstrukce zařízení.

Na závěr jsou zdokumentována provedená měření pro zhodnocení dosažených parametrů zkonstruované komory. Jsou zde porovnána naměřená data s daty získanými při simulaci s využitím navrženého modelu. Dále je zde zdokumentována výsledná podoba teplotní komory, provedena ekonomická rozvaha a zařízení je porovnáno s komerčně dostupnými komorami podobného typu.





## Část II

### Teoretická část



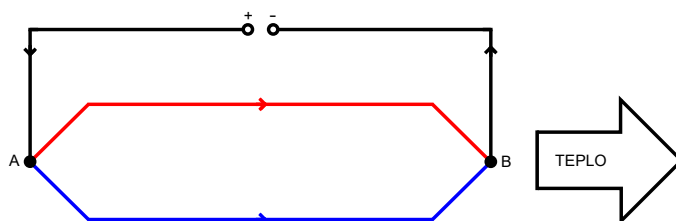


## Kapitola 2

### Rešerše

#### 2.1 Peltierův jev

Peltierův jev [1], [2], [3] je termoelektrický jev, jenž v roce 1834 objevil francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier. Jeho princip je možné nejlépe popsat s využitím ilustrativního obrázku 2.1.



**Obrázek 2.1:** Znárodnění Peltierova jevu (převzato z [1] a upraveno v Inkscape)

Na obrázku je znázorněn uzavřený elektrický obvod se stejnosměrným zdrojem napětí. Obvod je složený ze dvou různých kovů (resp. polokovů), jejichž spojení je označeno písmeny A a B. Vlivem napětí připojeného zdroje dle Ohmova zákona obvodem prochází stejnosměrný proud, který způsobí vznik gradientu teploty mezi oběma spoji A a B. Jeden ze spojů se tedy začne ohřívat a druhý ochlazovat. Směr tohoto gradientu je pak určen směrem procházejícího proudu.

Z hlediska chování elektronů je jev vysvětlitelný pomocí nerovnováhy jejich počtu mezi oběma spoji, která je zapříčiněna procházejícím proudem. Nerovnováha počtu elektronů způsobí vznik termoelektrického napětí, jež je úměrné rozdílu teplot obou spojů. Teplota při tom narůstá u spoje s vyšším kontaktním napětím a teplo je jím odevzdáváno do okolí. Naopak teplota spoje s nižším kontaktním napětím klesá a teplo je jím z okolí odebíráno. Tepelné toky pro odběr  $q_c$  a odevzdávání  $q_h$  jsou si pak velikostně rovny a platí vztah

$$q_c = q_h = \beta \cdot I. \quad (2.1)$$

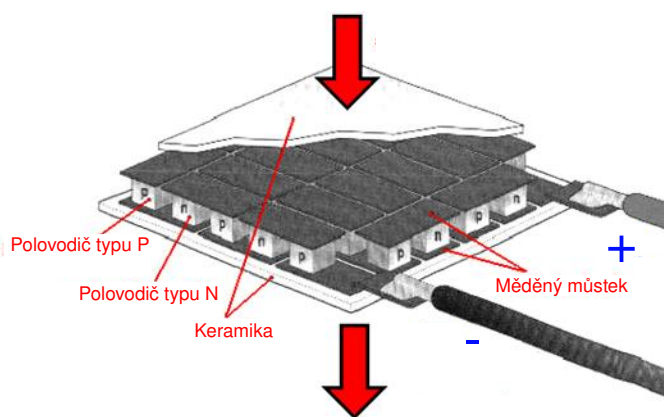
Peltierův jev je využíván především ke konstrukci Peltierových článků, které nacházejí využití v řadě aplikacích s teplotní regulací.

Příklady odvětví využívajících Peltierova jevu:

- Extrakce vody z ovzduší.
- Syntéza DNA.
- Vyrovnávání vlivu slunečního záření na ohřev povrchu kosmických lodí.
- Testovací Peltierovy komory.

## 2.2 Peltierův článek

Peltierův článek je složen z dvojice tělísek, vyrobené z polovodiče typu P a N a propojené spojovacím můstkem. V praxi jsou pak nejčastěji využívanou dvojicí polovodičů pro jejich konstrukci bismut-telluridy, kdy jsou spoje realizovány propojením slitiny bismutu, telluru a antimonu jakožto polovodiče typu P a bismutu, telluru a selenu jakožto polovodiče typu N. Hlavními výhodami těchto materiálů jsou nízký měrný elektrický odpor a malý součinitel tepelné vodivosti. Spojovací můstek je pak vyráběn z mědi, která zajišťuje malý měrný elektrický odpor. Nevýhodou mědi však může být její difúze do polovodičového materiálu zhoršující vlastnosti článku. Zásadním problémem při výrobě Peltierových článků jsou pak přechodové odpory mezi polovodičovými tělísky a spojovacím můstkem, jejichž hodnota musí být výrobní technologií zajištěna co možná nejnižší. Samotná elektronická součástka nazývaná termobaterie, modul či zjednodušeně také článek na obrázku 2.2, je pak vytvořena sériovým spojením vyššího počtu popsaných článků. Z pravidla bývá opatřena izolačním keramickým obalem. Peltierův modul si pro použití v teplotní regulaci s sebou nese množství výhod i nevýhod.



**Obrázek 2.2:** Peltierův modul (převzato z [1] a upraveno v Inkscape)

Výhody:

- Tichý provoz (nejsou zapotřebí žádné pohyblivé části).
- Malé rozměry.
- Okamžitý efekt chlazení či ohřevu a snadná regulace výkonu.
- Využití na mikroskopické úrovni, kde jiné metody teplotní regulace selhávají.

Nevýhody:

- Nízká účinnost v porovnání s jinými typy chlazení.
- Vysoká spotřeba elektrické energie.
- Vyšší cena při potřebě většího výkonu modulu.
- Nebezpečí přehřátí.

V některých aplikacích je možné nalézt také kaskádní spojení několika Peltierových modulů za sebou [4]. Může tak být docíleno vyšší účinnosti při chlazení.

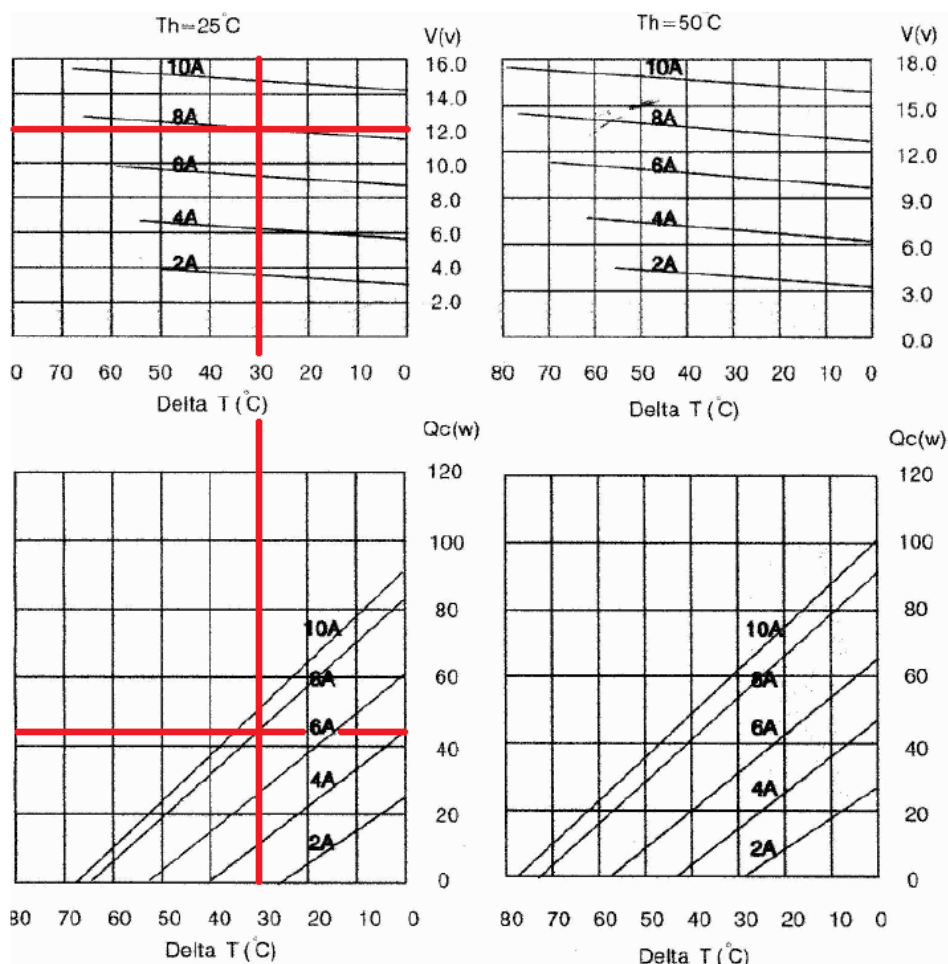
Pro vhodnou volbu ze široké škály Peltierových modulů s označením TEC, které jsou konstruovány jakožto tepelná čerpadla, je kromě veličin v tabulce 2.1 důležitá také orientace v charakteristikách uváděných v datasheet. Ty jsou většinou uváděny pro dvě různé teploty horké strany modulu (z pravidla  $T_h = 25\text{ °C}$  a  $T_h = 50\text{ °C}$ ) a je z nich možné odečíst chladicí výkon při dané hodnotě vstupního napětí.

**Tabulka 2.1:** Základní parametry Peltierova modulu TEC1-12710

Teplota horké strany [°C]	25	50
Maximální výkon [W]	85	96
Maximální rozdíl teplot obou stran [°C]	66	75
Maximální proud [A]	10,5	10,5
Maximální napětí [V]	15,2	17,4
Odpor článku [Ω]	1,08	1,24

Na obrázku 2.3 jsou znázorněny charakteristiky pro Peltierův modul TEC1-12710 se 127 PN přechody. Zakreslenými červenými čarami je naznačen postup pro odečítání veličin v pracovním bodě, ve kterém je článek provozován, při teplotě horké strany  $T_h = 25\text{ °C}$ . Pokud bude tedy třeba, aby modul odebíral teplo s výkonem přibližně 45 W, a rozdíl teplot horké a chladné strany bude udržován na 30 °C, musí článkem protékat proud 8 A a článek být tedy napájen 12 V. Pro udržení teploty horké strany na 25 °C z ní při tom nestačí odvádět pouze výkon 45 W, ale je nutno pro návrh chladiče také započítat ztrátový výkon tekoucího proudu 96 W. Pro provoz článku v tomto pracovním bodě tedy musí chladič horké strany být schopen

odvádět teplo s výkonem alespoň 141 W. Chlazení Peltierova článku je nutno nepodcenit, jelikož při překročení maximální hraniční teploty horké strany hrozí jeho nevratné poškození.



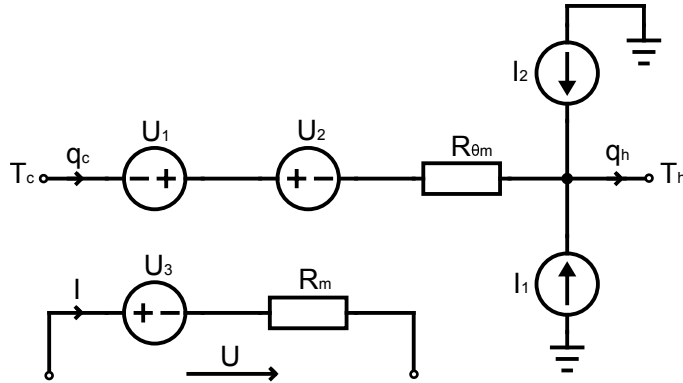
**Obrázek 2.3:** Charakteristiky Peltierova modulu TEC1-12710 (převzato z [5] a upraveno v Inkscape)

## 2.3 Model Peltierova článku

Pro odhad parametrů Peltierova článku a posouzení vhodnosti využití konkrétního typu v dané aplikaci je důležité mít možnost simulace chování článku a celé tepelné soustavy. V simulaci však musí být využit právě model Peltierova článku [6].

Pro model je důležitá především závislost průběhu výstupních veličin na veličinách vstupních, která musí být ve shodě s reálně naměřenými daty. V případě Peltierova článku je jako nastavitelnou vstupní veličinu vhodné označit napětí na jeho svorkách. Výstupními veličinami je pak možno označit teploty horké a chladné strany článku a tepelné toky těmito stranami proudící.

Schéma jednoho ze současně používaných modelů je znázorněno na obrázku 2.4.



**Obrázek 2.4:** Schéma modelu Peltierova článku (převzato z [6] a upraveno v Circuit Diagram a Inkscape)

Parametry modelu Peltierova článku mohou být vyjádřeny jako

$$U_1 = I\alpha T_c R_{\theta m}, \quad (2.2)$$

$$U_2 = I^2 R_{\theta m} \frac{R_m}{2}, \quad (2.3)$$

$$U_3 = \alpha \Delta T, \quad (2.4)$$

$$I_1 = I\alpha \Delta T, \quad (2.5)$$

$$I_2 = I^2 R_m, \quad (2.6)$$

$$R = \frac{U_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{T_h - \Delta T_{max}}{T_h}, \quad (2.7)$$

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} U_{max}} \cdot \frac{2T_h}{T_h - \Delta T_{max}}, \quad (2.8)$$

$$\alpha = \frac{U_{max}}{T_h}. \quad (2.9)$$

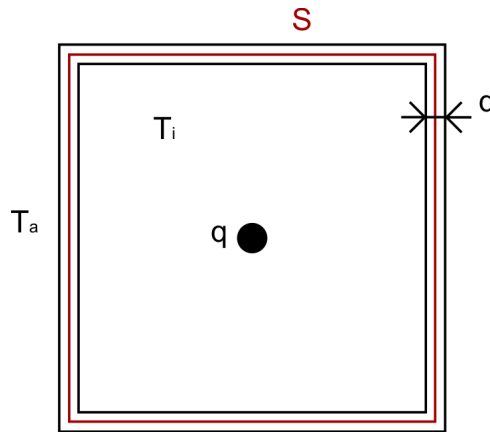
## 2.4 Teorie modelování tepelných systémů

Cílem modelování systému je napodobit chování reálného systému v čase v závislosti na změně některých jeho parametrů. Jak chování tak měněné parametry jsou pak popsány fyzikálními veličinami se vzájemnou závislostí v podobě diferenciálních rovnic. Měněné veličiny soustavy jsou nazývány vstupy a pozorované veličiny z nich odvozené výstupy systému. Výsledné modely mohou posloužit při návrhu reálného systému, pozorování chování, testování, či návrhu jeho řízení.

V případě tepelných systémů [7], [8] bývají jako vstupní veličiny uvažovány tepelný tok či entropie. Výstupní pozorovanou veličinou pak bývá teplota. Užíváno je několik přístupů k tvorbě modelu tepelných systémů, z nichž nejznámější jsou postupy s pomocí pseudovazebních grafů, vazebních grafů

či analogie s elektrickými obvody. Právě poslednímu ze zmíněných přístupů bude věnována zbylá část sekce.

Metoda využívající analogie s elektrickými obvody bude představena na příkladu znázorněném na obrázku 2.5.

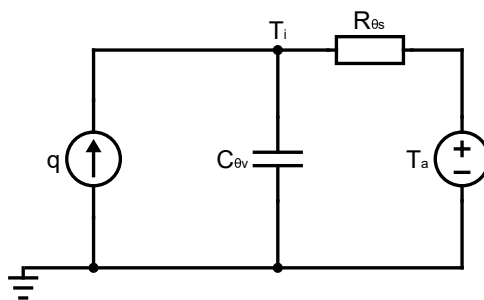


**Obrázek 2.5:** Schéma izolované komory (vytvořeno v Inkscape)

Cílem bude namodelovat průběh teploty uvnitř izolované komory a postup řešení pak bude následující. V první řadě je třeba problém zjednodušit a zakreslit v podobě elektrického obvodu na obrázku 2.6, přičemž tepelné odpory budou zakresleny jako rezistory, tepelné kapacity jako kondenzátory, zdroje tepelného toku jako zdroje proudu a zdroje teploty jako zdroje napětí. Vztahy pro výpočet hodnot tepelných odporů a kapacit jsou

$$C_\theta = c \cdot m, \quad (2.10)$$

$$R_\theta = \frac{d}{\lambda S}. \quad (2.11)$$



**Obrázek 2.6:** Schéma náhradního elektrického obvodu (vytvořeno v Circuit Diagram a Inkscape)

Ze získaného elektrického obvodu, ve kterém byly kvůli svému nízkému vlivu zanedbány tepelný odpor vzduchu a tepelná kapacita stěny, je možné odvodit diferenciální rovnice popisující dynamiku systému. K odvození mohou posloužit například Kirchhoffovy zákony. V zadaném příkladu pouze jedna

výsledná diferenciální rovnice má podobu

$$q = C_{\theta v} \frac{\delta T_i}{\delta t} + \frac{T_i - T_a}{R_{\theta s}}. \quad (2.12)$$

Takto získanou rovnicí je nakonec možné již snadno upravit do tvaru pro její implementaci do příslušného simulačního programu.

## ■ 2.5 Peltierovy komory

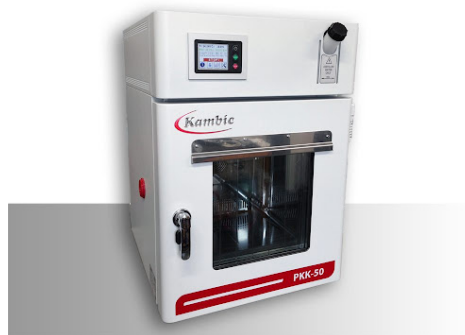
V následující části jsou popsány některé ze současně využívaných Peltierových komor. Konkrétně se jedná o tři průmyslově vyráběné klimatické komory a dvě komory se speciálním využitím publikované v odborných článcích.

### ■ 2.5.1 Peltierova komora PKK-50 od společnosti Kambič

Peltierova klimatická komora PKK-50 [9] na obrázku 2.7 je zařízení s vnitřním objemem 57 l, které umožňuje PID regulaci vnitřní teploty v rozsahu od 8 °C do 55 °C. Současně s regulací teploty je možno regulovat i relativní vlhkost vzduchu od 10 % do 98 %. Komora dosahuje hmotnosti 36 kg a příkonu 500 W.

Součástí výbavy komory je dotykový displej s uživatelským rozhraním pro řízení komory, zobrazení měřených údajů včetně grafů a dalšího pokročilého nastavení týkajícího se například nastavení komunikace přes RS-232, USB či ethernetové porty. Komora je vybavena lehce přístupnou nádržkou na vodu, alarmem pro otevření dvířek či pozorovacím kontrolním okénkem. Dále může nabídnout stabilní, tichou a energeticky nenáročnou regulaci teploty bez přítomnosti vibrací.

Komora nachází využití především při materiálovém a zátěžovém testování či environmentálních simulacích. Dále ji je možno díky své tichosti a dlouhodobě nižšímu odběru využít například pro chov hmyzu či plazů.



**Obrázek 2.7:** Peltierova komora PKK-50 od společnosti Kambič (převzato z [9])

### ■ 2.5.2 Peltierova komora HPPeco od společnosti Memmert

Klimatická komora HPPeco [10] na obrázku 2.8 v nejmenší variantě s vnitřním objemem 108 l umožňuje regulovat vnitřní teplotu v rozsahu od 0 °C do 70 °C a relativní vlhkost vzduchu od 10 % do 90 %. Hmotnost komory je pak 77 kg. Komora pracuje v tichém a energeticky úsporném režimu s příkonem 420 W.

Pro zobrazení měřených hodnot komory slouží dva TFT barevné displeje. Samotné měření teploty je realizováno dvěma teplotními senzory Pt100 ve čtyřvodičovém zapojení. Dále je komora vybavena například snadno přístupnou nádobou na vodu, časovačem, který je schopen běžet v rozmezí od 1 minuty do 99 dní, a nastavitelným vnitřním osvětlením. K zařízení je nabízen také software AtmoCONTROL, který umožňuje nahrání regulačních programů přes USB či ethernet.

Výrobce udává využití komory především pro stabilitní a zátěžové testy v kosmetickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu.



**Obrázek 2.8:** Peltierova komora HPPeco od společnosti Memmert (převzato z [10])

### ■ 2.5.3 Peltierova komora KBF115 od společnosti BINDER

Peltierova klimatická komora KBF115 [11] na obrázku 2.9 s vnitřním objemem 102 l umožňuje vnitřní teplotní regulaci v rozsahu od 0 °C do 70 °C. Regulace relativní vlhkosti vzduchu je pak možná v rozmezí od 10 % do 80 %. Hmotnost komory je 129 kg. Komora pracuje v tichém a uváděném energeticky úsporném režimu s příkonem 2000 W.

Zařízení je vybaveno dotykovým displejem pro zobrazení a nastavení regulovaných veličin. Pro komunikaci s počítačem slouží ethernetové rozhraní. Dále je komora vybavena například vizuálním a zvukovým alarmem pro kontrolu teploty a teplotní regulací dvířek. Zařízení je schopno ukládat naměřená data, která je možné poté získat přes USB. Komora není vybavena osvětlením,



jejím benefitem však může být nerezová ocel, ze které je vyrobena.

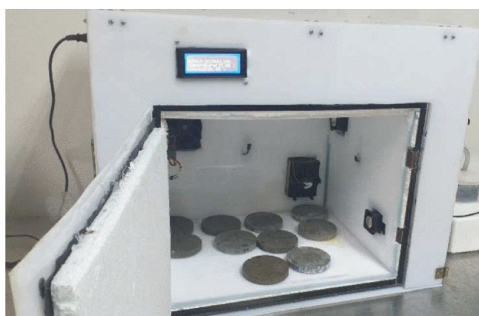


**Obrázek 2.9:** Peltierova komora KBF115 od společnosti BINDER (převzato z [11])

#### ■ 2.5.4 Peltierova komora pro testování bioprocusů

V biotechnologii jsou pro experimenty s biologickými materiály, obzvláště pro pozorování vlivu různých klimatických změn na jejich vlastnosti, vyžadována zařízení s unikátními specifikacemi. Takové vybavení je velmi nákladné a jeho průmyslová výroba náročná na životní prostředí. Motivací projektu se tak stalo vytvořit levné a jednoduché zařízení pro spolehlivou simulaci různých klimatických podmínek, které bude sloužit k testování procesů v biomateriálech [12] na obrázku 2.10.

Ve výsledku byla navržena a zkonstruována klimatická komora s ohřevem a chlazením realizovaným čtyřmi Peltierovými moduly a s regulací relativní vlhkosti vzduchu ultrasonickými zvlhčovači. Chlazení horké strany Peltierových článků je provedeno aktivními chladiči opatřenými ventilátory s rychlostmi otáčení regulovanými PWM modulací prostřednictvím H-můstku. Peltierovy moduly jsou spínány přes několik relé. Celá kontrola zařízením je implementována na vývojové desce Arduino Mega. Ovládání a monitorování zařízení je navrženo pomocí softwaru LabView s tím, že je komora opatřena i LCD pro zobrazení důležitých hodnot. Celkově je možné klimatickou komoru provozovat ve třech různých konfiguracích a to nastavením režimu subtropického sucha, polosuchého chladu či deštného pralesa.

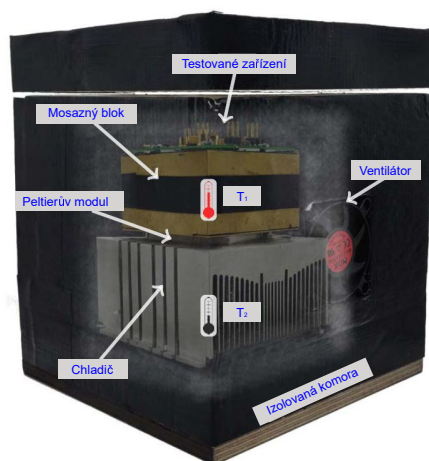


**Obrázek 2.10:** Peltierova komora pro testování bioprocusů (převzato z [12])

### 2.5.5 Peltierova komora pro kalorimetrické měření ztrátového výkonu

Peltierovy komory nacházejí své využití i při měření a testování elektronických součástek. Příkladem takového zařízení může být Peltierova komora pro kalorimetrické měření ztrátového výkonu při elektronickém spínání [13] na obrázku 2.11. Peltierovy články jsou v zařízení využity konkrétně k ohřevu či ochlazení chladiče, pro nastavení počáteční teploty měření.

Cyklus měření je pak možné popsat následovně. Teplota vnitřního chladiče je nastavena na předem určenou teplotu. Do izolované komory je dále umístěno elektronické zařízení s neznámým ztrátovým výkonem. Ztrátový výkon zařízení vyvolá ohřev vnitřního chladiče. Průběh teploty chladiče v čase je zaznamenán a je z něj určen ztrátový výkon elektronického zařízení. Nakonec je teplota vnitřního chladiče opět nastavena na předem určenou hodnotu a cyklus se opakuje.



**Obrázek 2.11:** Peltierova komora pro kalorimetrické měření ztrátového výkonu při elektronickém spínání (převzato z [13] a upraveno v Inkscape)



## Část III

### Praktická část



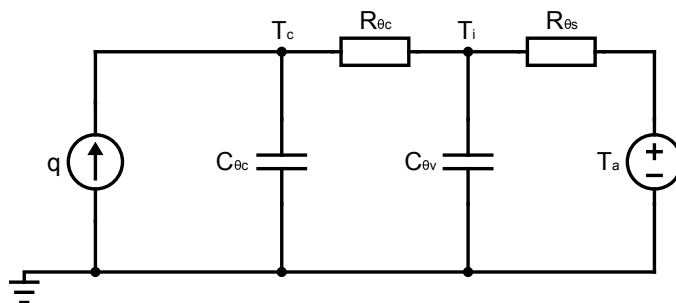
## Kapitola 3

### Modelování a simulace

Před samotnou tvorbou konstrukce teplotní komory je vhodné vytvořit její model. Díky modelu lze získat lepší představu o vývoji teploty uvnitř komory pro různé parametry zařízení, jako je například tloušťka a druh izolace, vnitřní objem komory či typ Peltierových článků. Simulace pak může ušetřit čas a především finanční prostředky při realizaci, jelikož je možné parametry komory odladit, aby zařízení splňovalo požadované vlastnosti.

#### 3.1 Diferenciální rovnice modelu systému

Při tvorbě modelu teplotní komory je možné využít postup uvedený v sekci 2.4. Nejprve je tedy nutné systém zjednodušit a zakreslit jako elektrický obvod, který je znázorněn na obrázku 3.1.



**Obrázek 3.1:** Schéma náhradního elektrického obvodu pro teplotní komoru (vytvořeno v Circuit Diagram a Inkscape)

Při návrhu náhradního elektrického obvodu byly podobně jako v případě obvodu na obrázku 2.6 zanedbány tepelný odpor vzduchu a tepelná kapacita stěny. Z elektrického obvodu je možné získat soustavu diferenciálních rovnic, která poslouží k popisu celého systému. Soustava má v daném případě dvě diferenciální rovnice, které mají tvar

$$q = C_{\theta c} \frac{\delta T_c}{\delta t} + \frac{T_c - T_i}{R_{\theta c}}, \quad (3.1)$$

$$\frac{T_c - T_i}{R_{\theta c}} = C_{\theta v} \frac{\delta T_i}{\delta t} + \frac{T_i - T_a}{R_{\theta s}}. \quad (3.2)$$

Dále je třeba vyjádřit tepelný tok  $q$  přiváděný do systému jako funkci napětí na svorkách Peltierova článku. Za tímto účelem je možné využít poznatky ze sekce 2.3 o modelu Peltierova článku. Vyjádřený tepelný tok má pro chlazení a ohřev se dvěma Peltierovými články tvar

$$\begin{aligned} q = q_c &= -2 \frac{T_c + U_1 - U_2 - T_h}{R_{\theta m}} = \\ &= 2 \frac{T_h - T_c}{R_{\theta m}} - 2I\alpha T_c + I^2 R_m, \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} q = q_h &= 2 \frac{T_c + U_1 - U_2 - T_h}{R_{\theta m}} + 2I^2 R_m + 2I\alpha \Delta T = \\ &= 2 \frac{T_c - T_h}{R_{\theta m}} + 2I\alpha T_h + I^2 R_m, \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$I = \frac{U - \alpha \Delta T}{R_m}. \quad (3.5)$$

Při pozorování vyjádřených toků je možné si povšimnout proměnných veličiny  $T_h$  pro případ chlazení a  $T_c$  pro případ ohřevu. Tyto proměnné veličiny znázorňují postupně teploty horké a chladné strany článku. Obě teploty se odvíjejí od účinnosti a výkonu chladiče Peltierova článku a jejich výpočet je velmi komplikovaný. Proto jsou tyto veličiny vzaty jako parametry podobně jako teplota vnějšího okolí. Po vyjádření tepelných výkonů je pro usnadnění vhodnější rozdělit model na dvě části, první pro simulaci chlazení a druhou pro simulaci ohřevu.

### 3.2 Nelineární stavový model systému

Dosažením vyjádřených tepelných toků a úpravou soustavy rovnic je možné získat nelineární stavový model systému, který má pro chlazení podobu

$$\begin{aligned} \dot{T}_c &= -\frac{T_c}{R_{\theta c} C_{\theta c}} + \frac{T_i}{R_{\theta c} C_{\theta c}} + 2 \frac{\Delta T}{C_{\theta c} R_{\theta m}} - \\ &\quad - 2 \frac{U - \alpha \Delta T}{C_{\theta c} R_m} \alpha T_c + \frac{(U - \alpha \Delta T)^2}{C_{\theta c} R_m}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\dot{T}_i = \frac{T_c}{R_{\theta c} C_{\theta v}} - \frac{T_i}{R_{\theta s} C_{\theta v}} - \frac{T_i}{R_{\theta c} C_{\theta v}} + \frac{T_a}{R_{\theta s} C_{\theta v}}, \quad (3.7)$$

kde teploty  $T_c$  a  $T_i$  jsou veličiny stavové a napětí  $U$  je veličina vstupní. Pro ohřev má stavový model podobu

$$\begin{aligned} \dot{T}_h &= -\frac{T_h}{R_{\theta c} C_{\theta c}} + \frac{T_i}{R_{\theta c} C_{\theta c}} - 2 \frac{\Delta T}{C_{\theta c} R_{\theta m}} + \\ &\quad + 2 \frac{U - \alpha \Delta T}{C_{\theta c} R_m} \alpha T_h + \frac{(U - \alpha \Delta T)^2}{C_{\theta c} R_m}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

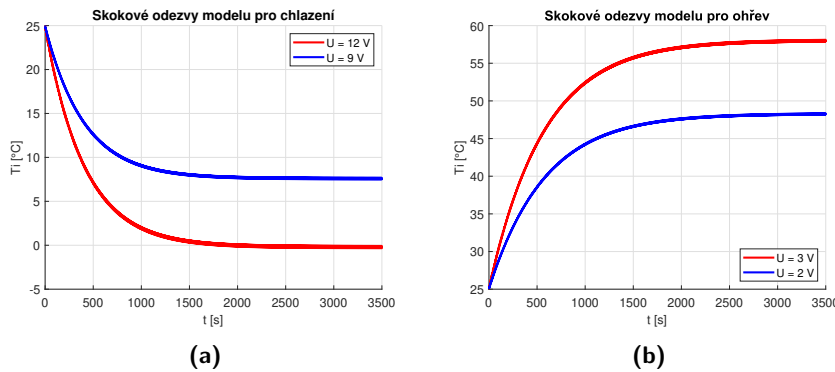
$$\dot{T}_i = \frac{T_h}{R_{\theta c} C_{\theta v}} - \frac{T_i}{R_{\theta s} C_{\theta v}} - \frac{T_i}{R_{\theta c} C_{\theta v}} + \frac{T_a}{R_{\theta s} C_{\theta v}}, \quad (3.9)$$

kde teploty  $T_h$  a  $T_i$  jsou veličiny stavové a napětí  $U$  je veličina vstupní. Takto vytvořený stavový model doplněný o saturace, jako je například omezení proudu Peltierových článků, lze implementovat do libovolného simulačního programu. V této práci byl jako simulační nástroj vybrán program Simulink. Schémata modelu systému pro chlazení a ohřev jsou k nalezení v přílohách práce na obrázku A.1. Sestavený model a simulační soubory modelu jsou k nalezení v elektronických přílohách práce.

Pro konkrétní verzi modelu byly hodnoty parametrů nejprve vypočteny podle předpokládaných rozměrů a vlastností navrhované teplotní komory. Pro výpočet teplotních odporů a kapacit byly použity vztahy 2.10 a 2.11. Po zkonstruování celého zařízení byly nakonec hodnoty některých parametrů modelu mírně pozměněny s ohledem na naměřené teplotní průběhy.

### 3.3 Skokové odezvy modelu systému

S navrženým modelem systému teplotní komory je možné simulovat skokovou odezvu vnitřní teploty v závislosti na nastaveném napětí na svorkách Peltierových článků. Takto získané odezvy na obrázku 3.2 pak mohou být porovnány se skutečnými odezvami zařízení. Ze získaných odezev je navíc patrné, že navrhovaná teplotní komora by měla být schopna regulovat teplotu v zadaném rozsahu od 5 °C do 45 °C s určitou rezervou.



**Obrázek 3.2:** Skokové odezvy modelu teplotní komory pro chlazení (a) a ohřev (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvořeno v MATLAB)

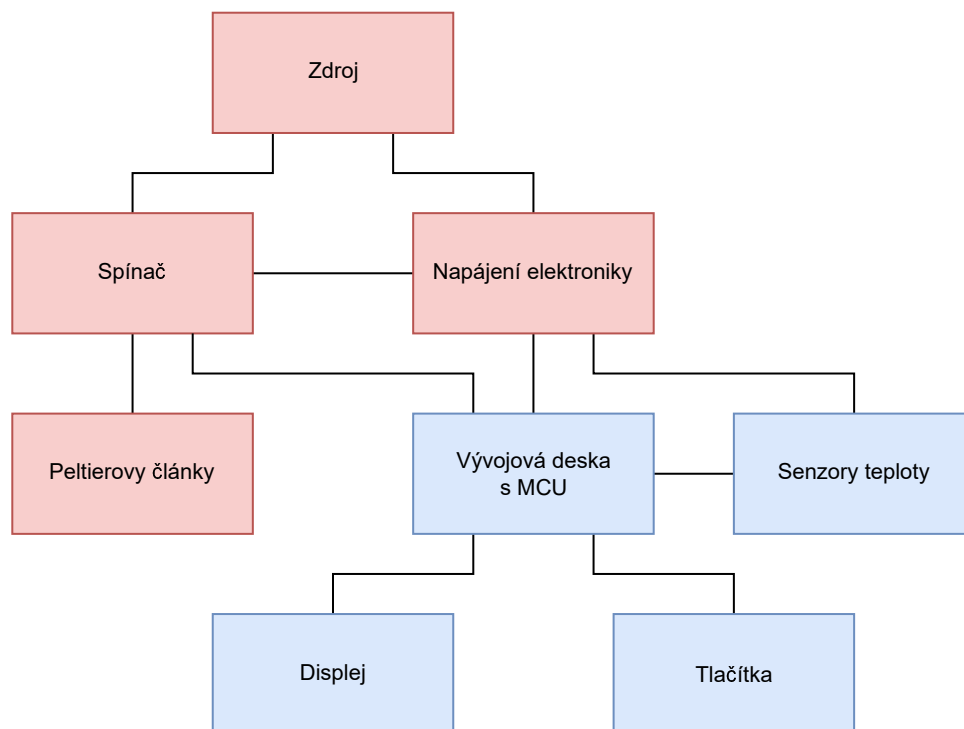




## Kapitola 4

### Elektronická část

Veškerá elektronika zařízení lze rozdělit na dvě základní části. Výkonovou část a řídicí část. Ty se pak skládají z elektronických komponent. Diagram propojení jednotlivých komponent je znázorněn na obrázku 4.1. Červeně jsou vyznačeny komponenty části výkonové a modře části řídicí. V přílohách práce jsou k nalezení fotografie výsledného zapojení na obrázcích B.1 a B.2.



Obrázek 4.1: Diagram zapojení elektroniky (vytvořeno v Diagrams.net)

#### 4.1 Výkonová část

Výkonová část se skládá především ze zdroje napětí, spínače Peltierových článků a Peltierových článků samotných. Dále je zde možno zařadit napájení elektroniky spolu s jeho rozvodem.

### 4.1.1 Zdroj

Pro napájení zařízení byl zvolen průmyslový spínaný zdroj 12 V [14] na obrázku 4.2 s maximální hodnotou proudu 25 A o výkonu 300 W. Tento typ zdroje byl vybrán především s ohledem na zvolené Peltierovy články TEC1-12710HTS, z nichž by každý při vstupním napětí 12 V měl mít dle sekce 2.2 výkonový odběr 96 W. Oba články pak v krajním případě odebírají dohromady 192 W výkonu a zbylých 108 W zdroje je k dispozici výkonově nenáročné řídicí elektronice. Pro zařízení je rezerva ve výkonu zdroje vhodná také kvůli jeho nižšímu zahřívání. Vyšší teploty uvnitř krytu s elektronikou by totiž mohly ovlivnit vývoj vnitřní teploty komory.



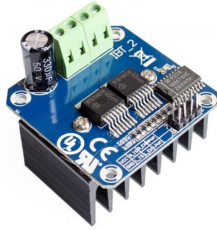
**Obrázek 4.2:** Spínaný zdroj (převzato z [14])

Zdroj je napájen ze síťového napětí přivedeného napájecím kabelem na EURO vidlici umístěnou na zadním panelu zařízení. Odtud je vstupní napětí přes tlačítkový spínač na předním panelu zařízení přivedeno na vstupní svorky zdroje.

### 4.1.2 Spínač

Spínání Peltierových článků je realizováno pomocí H-můstku. Ten umožňuje řízení napětí přiváděného na svorky Peltierových článků spínáním čtyř tranzistorů s využitím PWM modulace a zároveň snadnou změnu režimu Peltierových článků změnou polarity napětí.

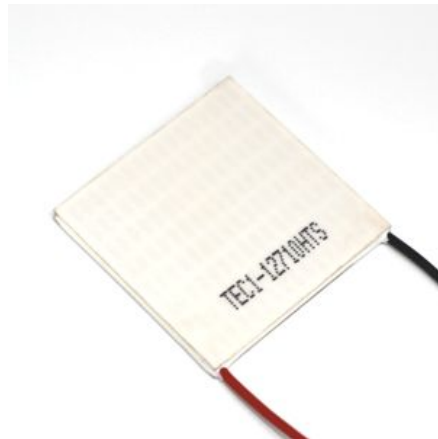
Typově byl zvolen H-můstek na obrázku 4.3 s dvěma polovičními můstky BTS7960B [15]. Hlavním kritériem výběru bylo jeho maximální proudové zatížení 43 A, které s pohodlnou rezervou postačí pro předpokládaný mezní proud odebíraný Peltierovými články 16 A.



Obrázek 4.3: H-můstek (převzato z [15])

### 4.1.3 Peltierovy články

Výběr Peltierových článků byl ovlivněn experimenty s modelem komory a zároveň studiem dosažených výsledků typově podobných zařízení [16], [17], [18], [19]. Nakonec byl zvolen již částečně zmiňovaný typ TEC1-12710HTS na obrázku 4.4. Kromě parametrů uvedených v sekci 2.2 tento typ modulu s dodatečným označením HTS disponuje silikonovou izolací, která zajišťuje voděodolnost článku. Voděodolnost je pro danou aplikaci článku výhodná, jelikož při nižších teplotách dochází ke kondenzaci vodních par ve vzduchu a ta by mohla článek bez silikonového obalu poškodit. Další nadstavbovou vlastností vybraného modulu je pak vyšší maximální teplota jeho horké strany, která je ze 138 °C původního modelu navýšena na 225 °C. Ta může snižovat opotřebování článku a v některých případech při nastavování a experimentech se zařízením článek zachránit před zničením.



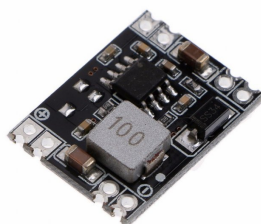
Obrázek 4.4: Peltierův článek TEC1-127HTS (převzato z [20])

Problémem spojeným s výběrem Peltierových článků je i výběr vhodné kabeláže. Zatížení vodiče proudem udává veličina proudová hustota [21], při čemž pro měď je maximální proudová hustota při dlouhodobém zatížení  $4 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Pro maximální předpokládaný proud 8 A na jeden termočlánek byl zvolen měděný vodič o průměru 1,5 mm a průřezu přibližně  $1,77 \text{ mm}^2$ . Vodič tedy bude maximálně zatížen  $4,52 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ , nikoli však dlouhodobě,

a proto by zvolený průřez vodiče měl být dostačující.

#### 4.1.4 Napájení řídicí elektroniky

Pro napájení elektroniky byl zvolen step-down DC měnič [22] na obrázku 4.5 s výstupním napětím 5 V a maximálním výstupním proudem 1,8 A bez nutnosti chladiče. Napájena je z něj především vývojová deska s mikrokontrolérem s maximálním vstupním proudem 500 mA při napájení 5 V. Odběr zbylých napájených částí jako LCD, H-můstek a zapojení pro měření teploty je naprosto zanedbatelný a zvolený měnič je dostačující.



Obrázek 4.5: Step down DC měnič (převzato z [22])

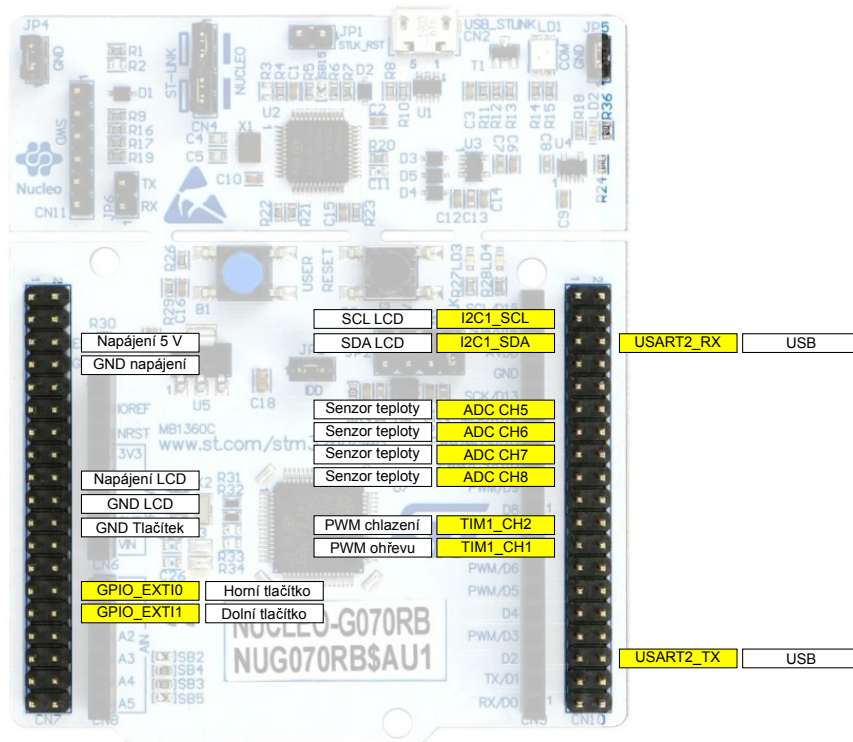
Pro lepší rozvod napětí do všech částí byla potřebná napětí přivedena na desku univerzálního plošného spoje. Na ní byly napájeny piny pro rozvod napájení 5 V a také tři pinové konektory pro rozvod napájení ventilátorů 12 V.

## 4.2 Řídicí část

Řídicí část je složena z mikrokontroléru na vývojové desce s nahraným programem a jeho periférií. Perifériemi jsou pak myšleny především snímače teploty, displej pro zobrazení důležitých hodnot a tlačítka umístěná na předním panelu zařízení sloužící k nastavení požadované teploty.

### 4.2.1 Mikrokontrolér

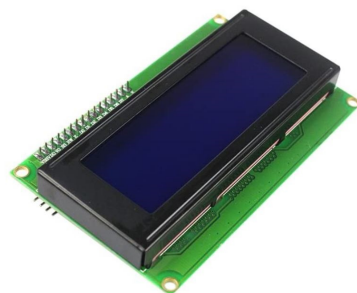
Mikrokontrolér zvolený pro řízení teplotní komory je STM32G070RB [23] umístěný na vývojové desce STM32 NUCLEO-G070RB. Nároky na vývojovou desku a mikrokontrolér pak nebyly nikterak vysoké a ve výsledku byly zapotřebí I2C komunikace, USART komunikace, ADC se čtyřmi kanály, dva časovače, z nichž jeden má možnost dvou kanálů a dva digitální vstupy. Všechny požadované vlastnosti zvolený mikrokontrolér s rezervou splňuje. Dalšími kritérii při výběru pak byla osobní znalost programování mikrokontroléru, jeho snadná dostupnost, cena a pohodlné uchycení do krytu elektroniky zařízení. Na obrázku 4.6 je možno vidět využití jednotlivých pinů vývojové desky s mikrokontrolérem. Napájecí napětí mikrokontroléru bylo zvoleno 5 V.



**Obrázek 4.6:** Využití jednotlivých pinů vývojové desky s mikrokontrolérem (převzato z [24] a upraveno v Inkscape)

## 4.2.2 Displej

Pro zobrazení důležitých teplot při chodu zařízení byl zvolen LCD. Konkrétním zvoleným typem displeje byl jednobarevný LCD2004 [25] na obrázku 4.7 se čtyřmi řádky a 20 znaky na řádek. Pro snížení počtu signálů a tedy i vodičů k ovládní je zvolený typ LCD opatřen I2C převodníkem HD44780, který zajistí jeho ovládní pouze pomocí dvou datových signálů a vodičů. Kritérii při výběru displeje byly jeho velikost, cena, dostupnost a snadná obsluha, která je zajištěna právě zmíněným převodníkem.



Obrázek 4.7: LCD (převzato z [26])

### ■ 4.2.3 Tlačítka

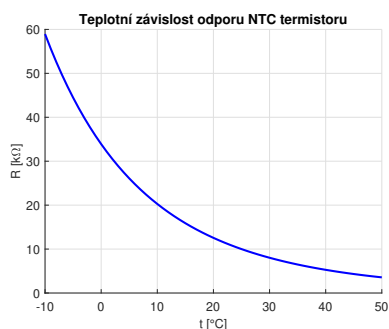
Pro nastavení teploty uvnitř teplotní komory jsou využívána dvě tlačítka umístěná na předním panelu zařízení. Horní tlačítko slouží k teplotnímu navýšení a dolní ke snížení. Stiskem obou tlačítek současně je pak možno resetovat mikrokontrolér v případě neobvyklého chování. Vzhledem k možnostem mikrokontroléru a jeho pull-up a pull-down rezistorů, nebyl třeba k zapojení tlačítek žádný pomocný obvod. Teplotu je možno nastavovat po celých stupních sestupnou hranou signálu na digitálních vstupech mikrokontroléru, která je generována stiskem tlačítek.

### ■ 4.2.4 Senzory teploty

Jakožto teplotní senzory byly pro zařízení zvoleny NTC termistory [27], u nichž je teplotní závislost odporu na obrázku 4.8 možné vyjádřit jako

$$R_T = R_{T_0} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (4.1)$$

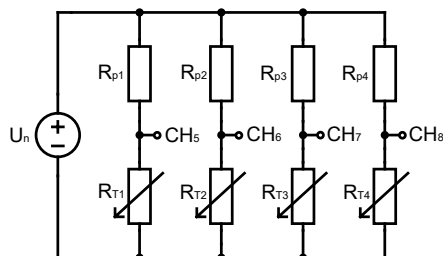
a hodnota odporu s teplotou tedy nelineárně klesá. Oproti známým odporovým sensorům Pt100 či Pt1000 jsou jejich hlavními výhodami cena a vysoká citlivost. Nevýhodami jsou pak nelineární závislost teploty na odporu a nižší rozsah měřených teplot. Obecně nižší teplotní rozsah NTC termistorů pak pro danou aplikaci není problémem, jelikož běžně zvládají měření teploty v rozsahu od  $-50\text{ °C}$  do  $150\text{ °C}$ . Důležitými parametry při výběru NTC termistorů jsou jejich jmenovitá hodnota odporu při jmenovité teplotě  $25\text{ °C}$  a teplotní koeficient.



**Obrázek 4.8:** Teplotní závislost odporu NTC termistoru (vytvořeno v MATLAB)

Konkrétně byly zvoleny čtyři NTC termistory s jmenovitou hodnotou odporu  $10\text{ k}\Omega$  při teplotě  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a změřeným teplotním koeficientem přibližně 3777. Díky vyšší citlivosti senzorů bylo zvoleno pro svou jednoduchost pouze dvouvodičové zapojení s předřazeným odporem napájené napětím  $5\text{ V}$ . Byl tak vytvořen napěťový dělič, kde je měřen úbytek napětí na termistoru, který lze snadno přepočítat na hodnotu odporu termistoru a ten pak na výslednou změřenou teplotu. Jelikož je pro měření úbytku napětí využít dvanáctibitový ADC mikrokontroléru, který je schopen převodu napětí v rozsahu od  $0\text{ V}$  do  $3,3\text{ V}$ , bylo třeba zvolit takovou hodnotu předřadného odporu, aby bylo možné měřit teplotu v zadaném rozsahu zařízení. Problematická je především dolní mez měřené teploty, jelikož při klesající teplotě narůstá hodnota odporu NTC termistoru a s ní i měřený napěťový úbytek. Ten pak pro správnost měření nesmí překročit hodnotu  $3,3\text{ V}$ . Hodnota předřadného odporu byla tedy nakonec zvolena  $27\text{ k}\Omega$ , pro níž je možné měřit teploty přibližně od  $-7,9\text{ }^\circ\text{C}$ .

Pro všechny termistory je schéma zapojení znázorněno na obrázku 4.9. Dle schématu byly součástky napájeny na desku univerzálního plošného spoje, kde je možné senzory teploty, napájení a kanály ADC mikrokontroléru jednoduše připojit na piny plošného spoje. Snímání odporu termistorů je pak realizováno čtyřmi kanály dvanáctibitového převodníku mikrokontroléru. Samotné termistory jsou pro měření umístěny na vnějším chlazení v blízkosti Peltierových článků, uvnitř a vně teplotní komory. Kalibrace teplotního měření byla provedena s využitím digitálního teploměru GTH 175/MO.



**Obrázek 4.9:** Schéma obvodu měření teploty (vytvořeno v Circuit Diagram a Inkscape)

Zajímavým problémem při převodu hodnot ADC je vhodné odporové přizpůsobení měřícího zapojení [28]. Převodníku totiž u mikrokontroléru předchází S&H obvod tvořený spínačem a kondenzátorem, který je pro všechny kanály společný. Při vysokém výstupním odporu měřícího zapojení pak v čase převodu nemusí dojít k dostatečnému nabití či vybití kondenzátoru S&H a měření tak mohou být ovlivňována napříč jednotlivými kanály ADC. Pro přesné měření je tedy doporučováno dodržet podmínku

$$t_c = f_{adc} R_{in} C_s \ln 2^{n+1}, \quad (4.2)$$

při čemž hodnota frekvence převodníku je 64 MHz, jeho převod je dvanácti-bitový, vstupní odpor S&H s jistotou nepřesáhne 27 k $\Omega$  a pro zvolený typ mikrokontroléru má kondenzátor S&H obvodu hodnotu 5 pF.



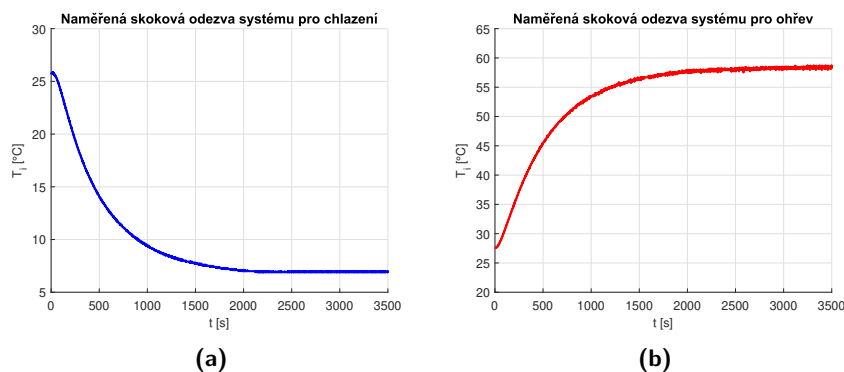
# Kapitola 5

## Regulace

Pro návrh regulátoru byl zvolen postup, kdy byl nejprve identifikován systém teplotní komory. Ze znalosti problematiky získané sestavením nelineárního modelu byl systém rozdělen do dvou částí a identifikace byla provedena samostatně pro ohřev a pro chlazení. Regulátor byl ve výsledku navržen pro obě identifikované části.

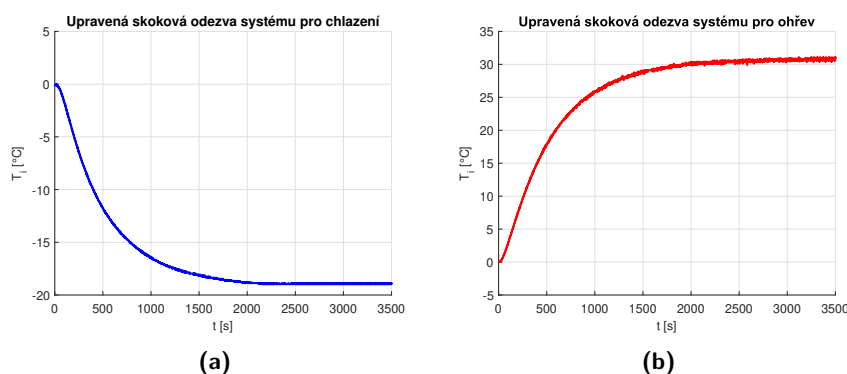
### 5.1 Identifikace systému

Pro identifikaci bylo nejprve nutno naměřit skokové odezvy vnitřní teploty komory, kdy bylo zvoleno vstupní napětí 9 V pro chlazení a 3 V pro ohřev. Ty jsou zobrazeny na obrázku 5.1. V průběhu měření byla teplota okolí přibližně 25 °C. Vyčítání hodnot bylo uskutečněno přes sériovou komunikaci z mikrokontroléru do počítače každou sekundu.



**Obrázek 5.1:** Naměřené skokové odezvy vnitřní teploty komory pro chlazení vstupním napětím 9 V (a) a pro ohřev vstupním napětím 3 V (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvořeno v MATLAB)

Odezvy byly pro snadnější identifikaci posunuty do počátku odečtením počáteční teploty komory. Upravené odezvy jsou znázorněny na obrázku 5.2 .



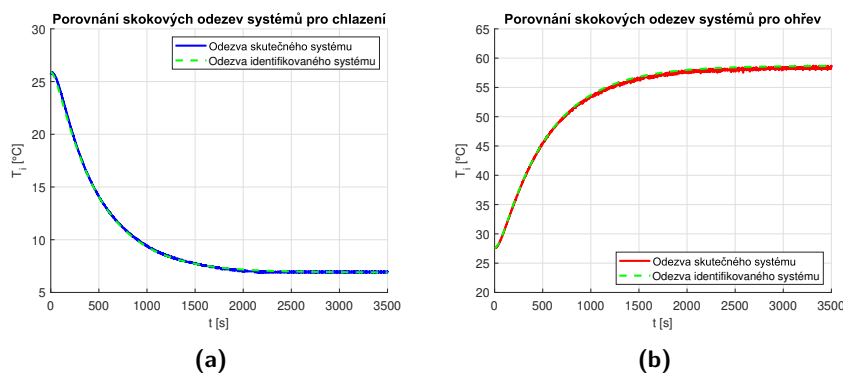
**Obrázek 5.2:** Upravené skokové odezvy vnitřní teploty komory pro chlazení (a) a ohřev (b) (vytvoreno v MATLAB)

Identifikace byla provedena v případě chlazení i ohřevu pro systém druhého řádu a byla k ní využita Strejcova metoda [29]. Výsledné přenosy identifikovaných lineárních systémů byly pro chlazení a ohřev vyčísleny jako

$$G_{ic} = \frac{-2,108}{22380s^2 + 510,2s + 1}, \quad (5.1)$$

$$G_{ih} = \frac{10,37}{27930s^2 + 569,9s + 1}. \quad (5.2)$$

Dále byla pro identifikované přenosy systémů odsimulována skoková odezva a pro kontrolu porovnána s odezvy naměřenými na obrázku 5.3.



**Obrázek 5.3:** Porovnání skokových odezav skutečného a identifikovaného systému pro chlazení (a) a ohřev (b) (vytvoreno v MATLAB)

## 5.2 Návrh regulátoru

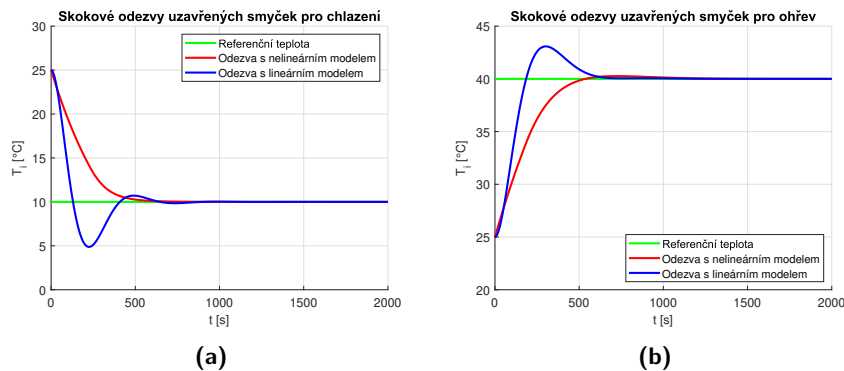
Pro takto identifikované systémy byly navrženy regulátory samostatně pro ohřev a pro chlazení. Zvolený typ regulátoru pro oba režimy byl regulátor PI následně převedený na diskretní verzi PS Tustinovou metodou s časem vzorkování 100 ms, což je předpokládaný vzorkovací čas mikrokontroléru.

Návrh probíhal metodou grafického přemístování pólů uzavřené regulační smyčky a pozorováním skokové odezvy. Hodnoty proporcionální a sumační složky diskretních PS regulátorů pro chlazení a ohřev pak byly vyčísleny na

$$K_{pc} = -3, K_{sc} = -0,02, \quad (5.3)$$

$$K_{ph} = 0,5, K_{sh} = 0,002. \quad (5.4)$$

Na závěr byly porovnány navržené odezvy uzavřených regulačních smyček s modely obou identifikovaných systémů s odezvami uzavřených regulačních smyček s dříve navrženými nelineárními modely na obrázku 5.4. Ke smyčkám s nelineárními modely systému byla přidána zároveň nelinearita v podobě saturace akčního zásahu regulátoru, který je pro chlazení omezen 12 V a pro ohřev 3 V. S ohledem na saturaci byl zároveň aplikován anti-windup, který při nasycení omezí integrační složku regulátoru. U odezev regulačních smyček s nelineárními modely je možné pozorovat znatelný pokles překmitu průběhu regulované teploty. Tato vlastnost nelineárního modelu byla při návrhu regulátoru zohledněna. Odezva regulační smyčky s modelem lineárního systému byla tedy při návrhu zvolena s větším a jindy možná nevyhovujícím překmitem. Pro chlazení byla referenční teplota nastavena na 10 °C a pro ohřev na 40 °C. Počáteční teplota a teplota okolí byla v obou případech nastavena na 25 °C.



**Obrázek 5.4:** Skokové odezvy uzavřených regulačních smyček pro chlazení (a) a ohřev (b) (vytvořeno v MATLAB)

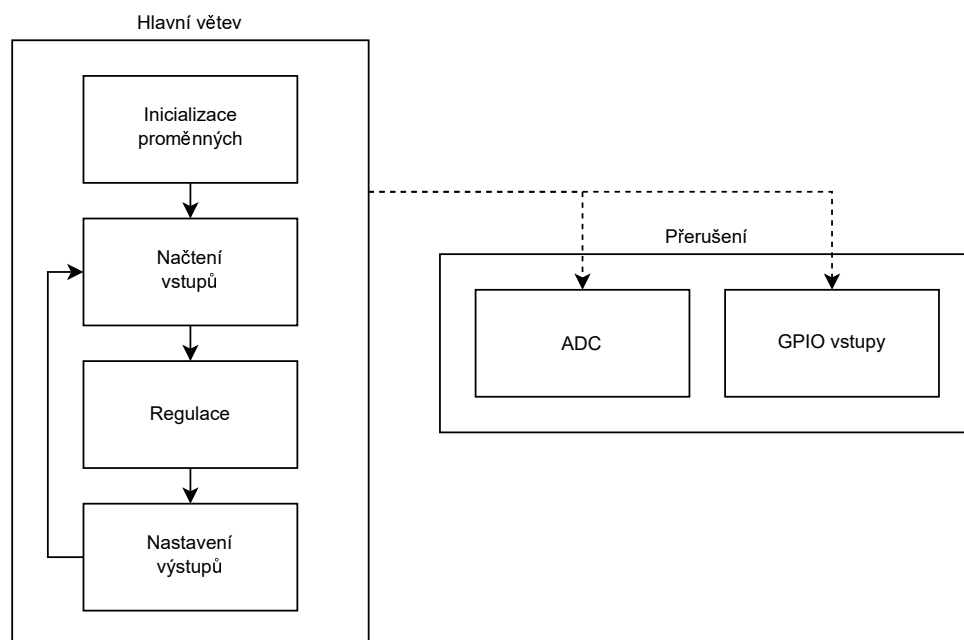
Takto navržené regulátory byly implementovány do zařízení. Ke změně režimů zařízení a tedy i k přepnutí mezi regulátory dochází v závislosti na porovnání nastavené teploty s teplotou okolí.



## Kapitola 6

### Softwarové řešení

Řídicí program mikrokontroléru se skládá z hlavní větve programu a dvou přerušení. V hlavní větvi programu jsou nejprve na počátku deklarovány a inicializovány důležité proměnné. Dále je program uzavřen v nekonečné smyčce, kde jsou postupně načteny naměřené teploty, vypočten a aplikován akční zásah regulátoru a nastaveny výstupy v podobě odpovídajícího zobrazení na LCD. Délka doby cyklu programové smyčky je přibližně 100 ms. Přerušení se pak týká zejména AD převodu a digitálních vstupů mikrokontroléru, signálů z tlačítek. Části programu spolu s návaznostmi jsou znázorněny na obrázku 6.1. K naprogramování mikrokontroléru bylo využito vývojové prostředí STM32 CubeIDE. Softwarový projekt je k nalezení v elektronických přílohách práce.



Obrázek 6.1: Softwarový diagram (vytvořeno v Diagrams.net)

## 6.1 Hlavní větev programu

### 6.1.1 Inicializace

Hlavní větev programu začíná inicializací důležitých globálních i lokálních proměnných v programu. Spolu s nimi jsou inicializovány i využívané funkce mikrokontroléru, jako jsou časovače, ADC a podobně.

### 6.1.2 Načtení vstupů

Po inicializaci přechází program do nekonečné smyčky, kde je první částí načtení vstupů. Tím se rozumí zejména načtení a přepočten naměřených hodnot jednotlivých kanálů ADC na teploty. Je tak pro každý kanál zprůměrováno 20 naměřených hodnot, čímž je filtrováno rušení při měření, průměr je následně nejprve přepočten na odpor NTC termistoru a poté na snímanou teplotu. Dále je do čtení vstupů zahrnuta i detekce stisku obou tlačítek současně, kdy dochází k resetu mikrokontroléru, a detekce změny nastavované teploty, kdy je přepínáno mezi použitými regulátory vnitřní teploty.

### 6.1.3 Regulace

Po načtení vstupů je implementována regulace vnitřní teploty komory. Nejprve je spočtena regulační odchylka jakožto rozdíl nastavené a vnitřní teploty komory. Odchylka je přičtena k sumě odchylek regulátoru a pomocí ní a sumy odchylek vypočten akční zásah. Ten je v případě saturačních úrovní oříznut a zároveň je aktivován anti-windup, kdy je od sumy odchylek odečtena poslední změřená regulační odchylka. Po výpočtu a úpravě akčního zásahu regulátoru je akční zásah přepočten na střídu signálu PWM modulace, při čemž je generován zvlášť signál pro chlazení a ohřev.

### 6.1.4 Nastavení výstupů

Konečnou částí cyklu smyčky programu je nastavení výstupů, tedy zobrazení důležitých hodnot na LCD. Ke komunikaci s LCD a jeho I2C převodníkem byla využita knihovna dostupná z [30], která byla předem prostudována a mírně upravena dle potřeby. Výsledné zobrazení je možno vidět na obrázku 6.2. K aktualizaci zobrazení naměřených teplot dochází každou sekundu a k aktualizaci zobrazení nastavené hodnoty teploty pak v okamžiku její změny.



Obrázek 6.2: Zobrazení na LCD

## ■ 6.2 Přerušení

### ■ 6.2.1 ADC

ADC pracuje v režimu přerušení, ke kterému dochází každých 10 ms přečtením registru časovače. Při obsluze přerušení jsou pak načteny hodnoty z každého ze čtyř používaných kanálů převodníku a uloženy do bufferu. Buffer uložených hodnot pak slouží k filtraci průměrováním naměřených dat a k přepočtu na výsledné teploty. V bufferu je uloženo vždy posledních 20 naměřených hodnot pro každý kanál převodníku.

### ■ 6.2.2 GPIO vstupy

GPIO vstupy, na něž jsou napojena tlačítka pro nastavení teploty, pracují v režimu externího přerušení, ke kterému dochází ihned po stisku tlačítka. Standardně je úroveň signálu na GPIO vstupech nastavena na hodnotu logická jedna, po stisku tlačítka nastává přechod do úrovně logická nula a po uvolnění tlačítka opět přechod do úrovně logická jedna. Přerušení je tedy nastaveno na sestupnou hranu vstupního signálu a v jeho obsluze dochází k rozpoznání zdroje přerušení a k případnému navýšení či snížení nastavované teploty. Nastavovaná teplota je omezena v požadovaném rozsahu od 5 °C do 45 °C a její nastavení je možné po celých stupních.





# Kapitola 7

## Konstrukce

Navržená konstrukce zařízení lze rozdělit na dvě základní části. První částí je tepelně izolovaná komora, která zahrnuje vnější konstrukci, vnitřní konstrukci a konstrukci vnitřního a vnějšího chlazení. Druhou částí je pak kryt elektroniky umístěný vespod zařízení. V něm je umístěna většina elektronických komponent pro řízení komory a jeho součástí je i zadní a přední panel pro uchycení prvků ke kontrole zařízení. Technické výkresy konstrukce jsou uvedeny v přílohách práce na obrázcích A.2 a A.3. Fotografie výsledné realizace konstrukce pak v přílohách na obrázcích B.4 a B.5.

### 7.1 Tepelně izolovaná komora

#### 7.1.1 Vnější konstrukce

K sestavení vnější konstrukce izolované komory byla materiálově využita dřevovláknitá (sololitová) deska, která byla nařezána na šest dílů. Jednotlivé díly byly kromě víka vzájemně propojeny pomocí spojovacích úhelníků do tvaru kvádrů s vyčnívajícimi stěnami vespod konstrukce, kde byl ponechán dostatečný prostor pro zasunutí krytu s řídicí elektronikou. Na každé z propojovaných hran tak byly předem vyvrtány právě dva otvory pro uchycení spojů. Propojením vznikla již stabilní část celkové konstrukce, do jejíž zadní stěny bylo však třeba vyřezat dva čtvercové otvory pro Peltierovy články a vnitřní chlazení. Na závěr byla vnější konstrukce pro zlepšení vizuální stránky zařízení nalakována matně černou barvou.

Z tepelných vlastností vnější konstrukce je důležitý zejména součinitel tepelné vodivosti dřevovláknité desky, jehož hodnota je přibližně  $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Soupis součástí potřebných pro její sestavení je uveden v tabulce 7.1.

**Tabulka 7.1:** Součásti vnější konstrukce tepelné komory

Typ	Počet	Popis
Sololitová deska 5x300x255 mm	2	Přední a zadní část konstrukce
Sololitová deska 5x300x230 mm	2	Víko a spodní část konstrukce
Sololitová deska 5x300x370 mm	2	Stěny konstrukce
Spojovací úhelník 20x20x15 mm	16	Pozinkovaný, oblý
Šroub M4x10 mm	32	Se záпустnou hlavou
Matice M4	32	Nízká
Barva ve spreji 400 ml	-	Matná černá

### 7.1.2 Vnitřní konstrukce

Vnitřní konstrukce je tvořena zejména izolací a vnitřním chlazením. Jako izolace byl zvolen polystyren EPS 100 především kvůli své ceně a dobrým izolačním vlastnostem s koeficientem tepelné vodivosti  $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tloušťka izolace pak byla i s využitím sestaveného modelu navržena na 60 mm a stěny vnitřní konstrukce tak byly realizovány vždy ze dvou polystyrenových desek o tloušťce 30 mm. V místech spojů vnější konstrukce bylo třeba z desek vyřezat části polystyrenu pro jejich snadnější umístění. Polystyrenové desky byly zároveň po hranách oblepeny elektrikařskou lepicí páskou, aby bylo sníženo jejich opotřebávání. Podobně jako u vnější konstrukce byly v zadní části vnitřní konstrukce vyřezány dva čtvercové otvory pro Peltierovy články a vnitřní chlazení. Uchycení izolačních desek na víko vnější konstrukce zařízení bylo vyřešeno pomocí hliníkové destičky připevněné dvěma šrouby protáhlými skrz izolační desky k víku vnější konstrukce. Funkci matic pak plní madlo vně komory pro usnadnění otevírání a zavírání zařízení. Ostatní desky izolace jsou do komory pouze natlačeny. Absencí lepení je tak výrazně usnadněna případná demontáž zařízení.

Po vložení izolačních desek bylo do komory upevněno vnitřní chlazení, složené ze tří hliníkových desek, dvou hliníkových L profilů a dvou hliníkových tyčí čtvercového profilu. Všechny části chlazení jsou pak spojeny a mezi společné plochy je rozetřena teplovodivá pasta. Celé chlazení je připevněno k vnější konstrukci dvěma šrouby protáhlými skrz izolaci. Izolací byly zároveň protaženy hliníkové tyče pro propojení s později upevněnými Peltierovými články. Pro zajištění homogenního rozdělení teploty v komoře byl uvnitř komory upevněn malý ventilátor, který zároveň rozhání vzduch a usnadňuje přenos tepla mezi chladičem a vzduchem. Na ventilátor byla nakonec připevněna i ventilátorová mřížka pro zvýšení bezpečnosti zařízení.

Navržené rozměry vnitřní části komory jsou 135x180x100 mm a po odečtení objemu 0,16 l zabraného chladičem s ventilátorem je využitelný vnitřní objem komory přibližně 2,27 l. Soupis součástí potřebných pro sestavení vnitřní konstrukce komory je uveden v tabulce 7.2.

**Tabulka 7.2:** Součásti vnitřní konstrukce tepelné komory

Typ	Počet	Popis
Polystyrenová deska 30x300x195 mm	4	Přední a zadní část izolace
Polystyrenová deska 30x100x195 mm	4	Stěny izolace
Polystyrenová deska 30x300x220 mm	2	Spodní část izolace
Polystyrenová deska 30x180x100 mm	2	Víko izolace
Hliníková deska 1x200x125 mm	1	Zadní část chladiče
Hliníková deska 1x100x125 mm	2	Boční část chladiče
Hliníková deska 1x155x95 mm	1	Uchycení izolace na víko
Hliníkový L profil 20x20x125 mm	2	Spoj chladiče
Hliníková tyč 40x40x65 mm	2	Hranatá
Šroub M4x70 mm	4	S půlkulovou hlavou
Šroub M3x5 mm	8	S půlkulovou hlavou
Šroub M3x35 mm	4	Se zápusťnou hlavou
Matice M4	2	Nízká
Matice M3	12	Nízká
Madlo	1	-
Teplovodivá pasta	-	ARCTIC MX-4
Elektrikářská páska 19 mm	1	Bílá
Ventilátor 80x80 mm	1	ARCTIC P8 na 12 V
Ventilátorová mřížka 80x80 mm	2	Kovová

### 7.1.3 Vnější chlazení

Vnější chlazení se skládá ze dvou samostatných chladících celků, z nichž každý zaopatřuje chlazení pro jeden Peltierův článek. Obě části jsou pak zkonstruovány z hliníkového profilu a upevněného ventilátoru. Jedná se o vlastní návrh chlazení a bylo třeba jej nadimenzovat tak, aby především zvládlo odvézt teplo produkované horkou stranou Peltierova článku při chlazení teplotní komory. Za předpokladu, že zvolený profil hliníkové části chladiče je schopen odvést tepelný výkon 10 W na 10 mm své výšky, typ Peltierova článku je zvolen TEC1-12710HTS a napájení má maximální výstupní napětí 12 V, byla výška jedné hliníkové části s využitím poznatků ze sekce 2.2 vyčíslena na 200 mm. Ventilátor upevněný na hliníkový profil pak odvod tepla ještě zlepší a celkové chlazení by proto mělo být v dané konfiguraci dostatečné. Vlastní konstrukce vnějšího chlazení umožňuje jeho pohodlné upevnění pomocí vrutů na vnější konstrukci. Mezi vnější chladiče a vyčnívající hliníkové tyče vnitřního chlazení jsou natlačeny Peltierovy články s oběma plochami potřebnými teplovodivou pastou. Na oba ventilátory byla nakonec připevněna ventilátorová mřížka pro zvýšení bezpečnosti zařízení. Seznam součástí vnějšího chlazení udává tabulka 7.3.

**Tabulka 7.3:** Součásti vnějšího chlazení tepelné komory

Typ	Počet	Popis
Hliníkový chladič 37x120x200 mm	2	S označením 3M
Šroub M4x70 mm	8	S půlkulovou hlavou
Vrut 4x20 mm	4	S půlkulovou hlavou
Maticе M4	8	Nízká
Teplovodivá pasta	-	ARCTIC MX-4
Ventilátor 120x120 mm	2	ARCTIC P12 na 12 V
Ventilátorová mřížka 120x120 mm	2	Kovová

## 7.2 Kryt elektroniky

Kryt elektronických komponent byl navržen pro umístění vespod zařízení. Konstrukčně je sestaven podobným způsobem jako vnější konstrukce tepelné komory. Dřevovláknitá deska byla nařezána na tři díly, které byly navzájem sešroubovány. Pro zpevnění konstrukce byly využity čtvercové dřevěné tyče, které zároveň posloužily k uchycení vruty k vnější konstrukci zařízení. Do předního a zadního panelu zařízení byly dále vyřezány otvory pro přichycení tlačítek, displeje, konektorů či pro průchod kabelů. Ve spodní části krytu pak byly vyvrtány dirky pro uchycení elektronických komponent a připevněny přístrojové nožičky. Výsledná konstrukce byla opět z vnější strany nalakována matnou černou barvou. Seznam součástí krytu elektroniky udává tabulka 7.4.

**Tabulka 7.4:** Součásti krytu elektroniky

Typ	Počet	Popis
Sololitová deska 5x300x100 mm	2	Přední a zadní panel
Sololitová deska 5x300x230 mm	1	Spodní část krytu
Spojovací úhelník 20x20x15 mm	4	Pozinkovaný, oblý
Šroub M3x5 mm	9	Se zápusťnou hlavou
Šroub M3x10 mm	12	Se zápusťnou hlavou
Šroub M3x16 mm	4	Se zápusťnou hlavou
Šroub M4x10 mm	4	Se zápusťnou hlavou
Šroub M4x16 mm	4	Se zápusťnou hlavou
Vrut 4x16 mm	8	Se zápusťnou hlavou
Vrut 4x25 mm	4	Se zápusťnou hlavou
Maticе M3 mm	13	Nízká
Maticе M4 mm	8	Nízká
Distanční sloupek M3x10 mm	9	Pro dva šrouby
Distanční sloupek M3x10 mm	4	Pro šroub a matici
Dřevěná tyč 12x12x100 mm	4	Hranatá
Dřevěná tyč 12x12x196 mm	2	Hranatá
Přístrojová nožička	4	Pryžové



## **Část IV**

### **Diskuzní část**



# Kapitola 8

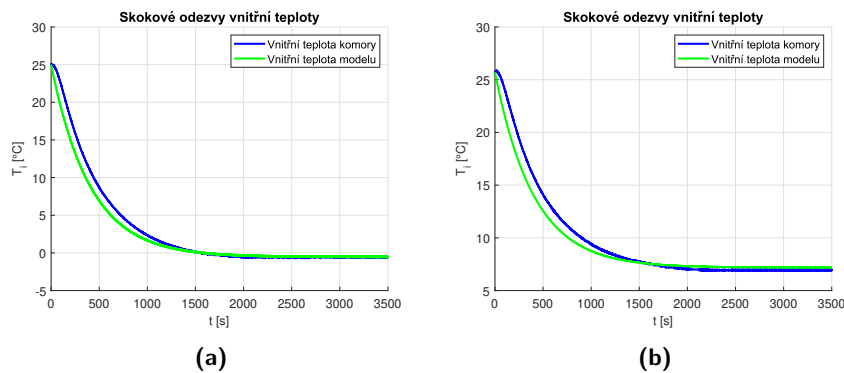
## Dosažené výsledky

### 8.1 Měření teplotních vlastností komory

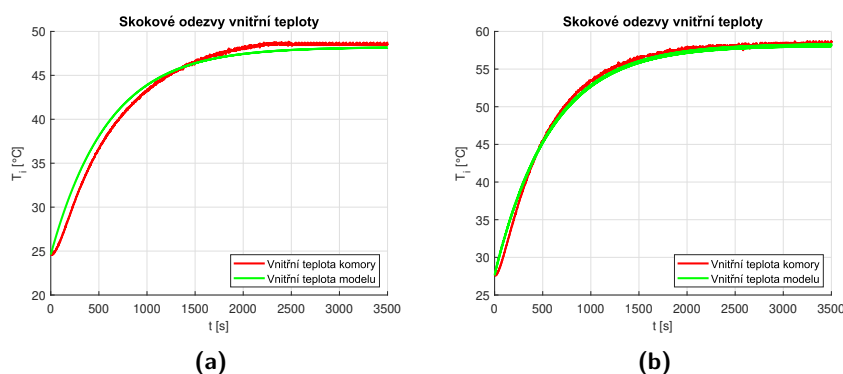
Teplotní vlastnosti komory byly měřeny a zhodnoceny provedením několika experimentů. Jednalo se především o měření skokových odezev vnitřní teploty komory, měření přesnosti regulace vnitřní teploty, měření hystereze vnitřní teploty a vliv teploty okolí na regulaci vnitřní teploty. Některé naměřené hodnoty pak byly porovnány s hodnotami získanými simulací s využitím sestaveného modelu. Vnitřní teplota byla měřena NTC teplotními senzory zařízení. Hodnoty z nich pak byly vyčítány přes sériovou komunikaci z mikrokontroléru do počítače každou sekundu.

#### 8.1.1 Skokové odezvy vnitřní teploty

Skokové odezvy vnitřní teploty byly naměřeny a porovnány s odezvami modelu pro čtyři různé hodnoty vstupního napětí. Dvě hodnoty napětí byly zvoleny pro chlazení na obrázku 8.1 a dvě pro ohřev na obrázku 8.2. V průběhu měření byla teplota okolí přibližně 25 °C.



**Obrázek 8.1:** Skokové odezvy vnitřní teploty pro chlazení napětími 12 V (a) a 9 V (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvoreno v MATLAB)

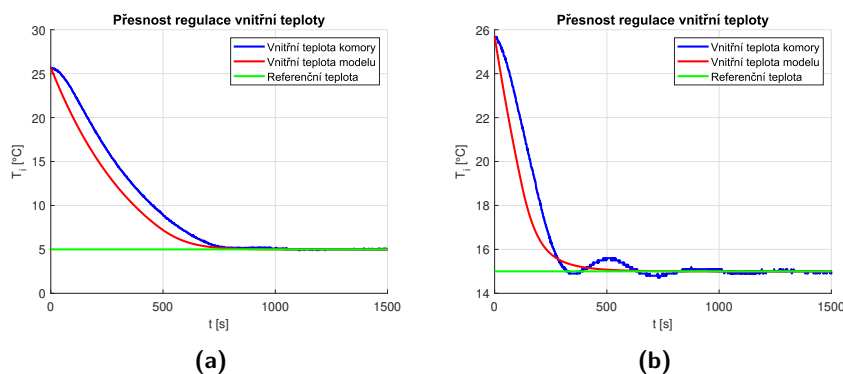


**Obrázek 8.2:** Skokové odezvy vnitřní teploty pro ohřev napětími 2 V (a) a 3 V (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvoreno v MATLAB)

Z naměřených výsledků je patrná velmi dobrá shoda vývoje vnitřní teploty skutečné teplotní komory s modelem. Drobné odchylky jsou způsobeny odlišnostmi výsledných hodnot tepelných veličin od skutečnosti či nepřesnostmi modelu Peltierova článku. Obecně je při modelování tepelných systémů vhodnější důležité veličiny zjišťovat měřením nežli výpočtem, jelikož teoretické vztahy pro jejich výpočet jsou v reálných neideálních podmínkách nepřesné. Často však mohou posloužit alespoň k přibližnému odhadu. Dále je z naměřených průběhů možné pozorovat, že zařízení je schopno dle předpokladů regulace teploty v rozsahu od 5 °C do 45 °C vždy s určitou rezervou, což zlepšuje vlastnosti řízení vnitřní teploty.

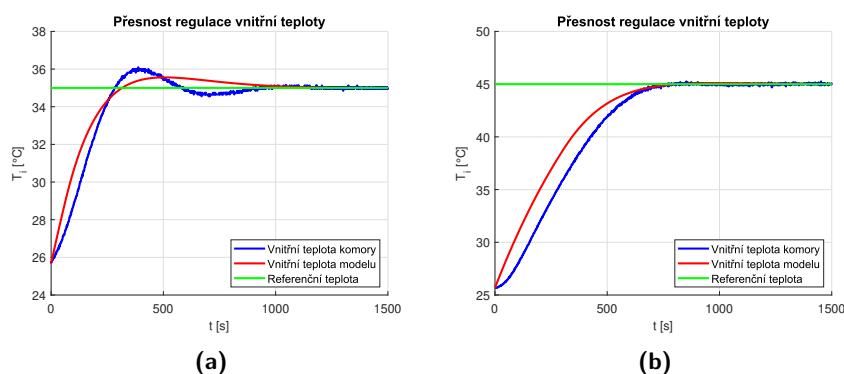
### 8.1.2 Přesnost regulace vnitřní teploty

Měření přesnosti regulace vnitřní teploty bylo provedeno celkem pro čtveřici nastavených referenčních teplot. Nastavené teploty byly zvoleny dvě pro chlazení na obrázku 8.3 a dvě pro ohřev na obrázku 8.4. Pro srovnání byla provedena obdobná simulace i s vytvořeným modelem. V průběhu měření byla teplota okolí přibližně 25 °C.



**Obrázek 8.3:** Přesnost regulace vnitřní teploty pro chlazení s referenčními teplotami 5 °C (a) a 15 °C (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvoreno v MATLAB)





**Obrázek 8.4:** Přesnost regulace vnitřní teploty pro ohřev s referenčními teplotami 35 °C (a) a 45 °C (b) při teplotě okolí 25 °C (vytvoreno v MATLAB)

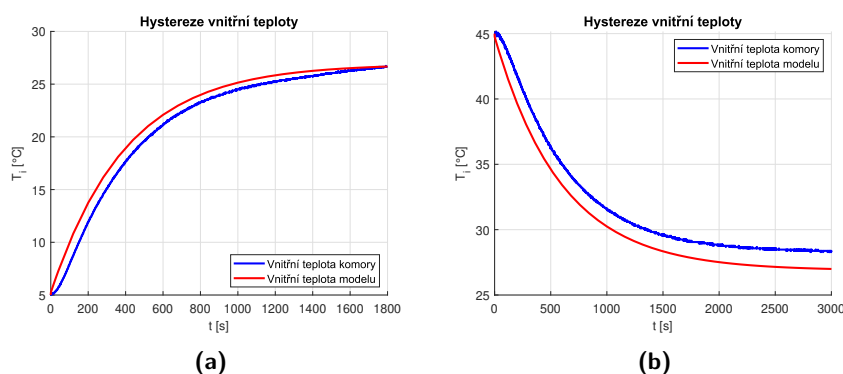
Pro naměřené průběhy vnitřní teploty reálného zařízení je možno pozorovat velmi přesnou regulaci s vynulováním regulační odchylky, což je způsobeno využitím sumační složky navrženého PS regulátoru. Výsledné doby ustálení s přesností na 2 % skoku regulační odchylky a případné relativní velikosti překmitu jsou zaznamenány v tabulce 8.1. V případě průběhů modelu je patrná opět velmi dobrá shoda s průběhy reálného zařízení.

**Tabulka 8.1:** Doby ustálení a relativní překmity

$T_{ref}$ [°C]	$t_s$ [s]	OS [%]
5	731	0,5
15	736	2,8
35	851	11,8
45	739	1,4

### 8.1.3 Hystereze vnitřní teploty

Hysterezi vnitřní teploty se rozumí její časový průběh po vyřazení chlazení či ohřevu. Měření na obrázku 8.5 bylo provedeno pro dvojici teplot, z nichž jedna byla vybrána pro chlazení a druhá pro ohřev. V průběhu měření byla teplota okolí přibližně 27 °C.

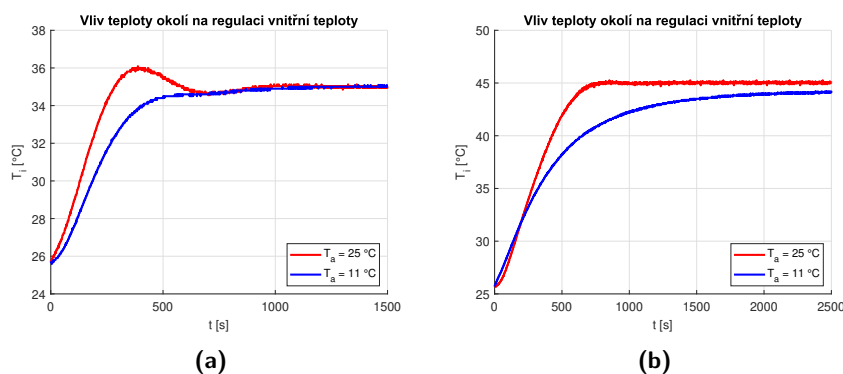


**Obrázek 8.5:** Hystereze vnitřní teploty pro počáteční teploty 5 °C (a) a 45 °C (b) při teplotě okolí 27 °C (vytvoreno v MATLAB)

Vývoj vnitřní teploty komory v obou měřených případech není nikterak překvapivý a teplota se postupně exponenciálně přibližuje teplotě okolí. Zajímavé je pozorování pozdější fáze měření hystereze pro ohřev, kdy vnitřní teplota komory klesá velmi pomalu a k ustálení na teplotu okolí dochází v porovnání s hysterezí pro chlazení za mnohem delší dobu. Ze získaných průběhů je viditelná opět téměř dokonalá shoda s průběhy sestrojeného modelu.

#### 8.1.4 Vliv teploty okolí na regulaci vnitřní teploty

Závislost vnitřní regulované teploty na teplotě okolí na obrázku 8.6 byla změřena celkem pro dvě teploty okolí a pro dvojici referenčních teplot. Pouze dvě teploty okolí byly zvoleny kvůli náročnosti měření, kdy je velmi obtížné okolní teplotu ovlivnit. S ohledem na charakter hodnot okolních teplot pak byly referenční teploty zvoleny pouze pro ohřev, kde je vliv vnější teploty lépe pozorovatelný.



**Obrázek 8.6:** Vliv teploty okolí na regulaci vnitřní teploty pro ohřev s referenčními teplotami 35 °C (a) a 45 °C (b) (vytvoreno v MATLAB)

Z naměřených dat je patrné výrazné ovlivnění průběhů regulace vnitřní teploty teplotou okolní. V případě regulace s referenční teplotou 35 °C nižší okolní teplota napomáhá regulaci a naprosto vyruší překmit s tím, že doba ustálení zůstává přibližně zachována. Při regulaci s referenční teplotou 45 °C

je situace opačná a nízká vnější teplota regulaci znemožňuje, jelikož zařízení není schopno dosáhnout teploty 45 °C. Tuto špatnou vlastnost zařízení by bylo možné snadno napravit navýšením saturační úrovně napětí pro ohřev. To je nastaveno na hodnotu 3 V především kvůli ochraně Peltierových článků před přehříváním.

## 8.2 Ekonomická rozvaha

Ekonomická rozvaha je provedena formou součtu nákladů za všechny díly zařízení. Ten je pro přehlednost proveden samostatně pro elektronickou část a část mechanickou. Ceny za díly obou částí jsou zaznamenány v tabulkách 8.2 a 8.3.

**Tabulka 8.2:** Ceny elektronických součástí

Typ	Počet	Cena vč. DPH [Kč]
Peltierův článek TEC1-12710HTS	2	480
Spínaný zdroj 12 V na 300 W	1	457
Vývojová deska STM32 NUCLEO-G070RB	1	396
LCD2004 s převodníkem I2C	1	208
H-můstek BTS7960B	1	196
Ventilátor ARCTIC P12 120 mm	2	250
Ventilátor ARCTIC P8 80 mm	1	103
Tlačítkový spínač 230 V	1	60
Síťový EURO kabel	1	59
NTC termistor 10 kΩ	4	52
Step down DC měnič 5 V	1	38
Tlačítko	2	32
Napájecí EURO vidlice	1	19
Vodiče, konektory a izolace	-	150
Celkem	-	2500

**Tabulka 8.3:** Ceny mechanických součástí

Typ	Počet	Cena vč. DPH [Kč]
Hliníkový chladič 37x120x200 mm	2	405
Černá barva ve spreji 400 ml	2	238
Teplovodivá pasta ARCTIC MX-4 8 g	1	171
Hliníková tyč 40x40x65 mm	2	140
Sololitová deska 5x1000x1000 mm	1	135
Hliníková deska 1x200x125 mm	3	100
Polystyrenová deska 30x1000x500 mm	2	84
Distanční sloupek 10 mm	13	65

Kovové madlo	1	59
Ventilátorová mřížka 120x120 mm	2	54
Dřevěná tyč 12x12x1000 mm	1	25
Přístrojová nožička	4	20
Elektrikářská lepící páska 19 mm	1	19
Ventilátorová mřížka 80x80 mm	1	17
Hliníkový L profil 20x20x125 mm	2	7
Šrouby, matice a vruty	-	140
Celkem	-	1679

Celkový součet nákladů za sestavení zařízení činí 4179 Kč. Do ekonomické rozvahy byly zahrnuty pouze ceny za díly využité k sestavení výsledného zařízení. Částka tedy nezahrnuje cenu dílů použitých při experimentech s návrhem podoby zařízení, cenu dopravy pořizovaných dílů či cenu za řezy hliníkových částí. Zároveň lze předpokládat, že celková částka za zařízení by v případě výroby většího množství kusů výrazně klesla, jelikož každý z dílů byl pořizován v malém či dokonce jednotkovém množství.

### 8.3 Porovnání s dostupnými teplotními komorami

Při porovnání sestaveného zařízení s některými z komerčně dostupných Peltierových teplotních komor popsanych v sekci 2.5 dosahuje zkonstruovaná komora horších teplotních vlastností. Ty jsou pozorovatelné zejména na nižším rozsahu vnitřní regulované teploty či horší kvalitě izolace. Zařízení také dosahuje násobně nižšího vnitřního objemu a není schopno regulace vlhkosti vzduchu. Zároveň oproti komerčně dostupným komorám není vybaveno žádnými chytrými funkcemi například v podobě ukládání naměřených dat, jejich vyčítáním, bezdrátovou komunikací nebo řídicí aplikací na PC. Jeho přednostmi mohou být nižší hmotnost 7,5 kg, menší celková velikost, nižší výkonový odběr a zejména výrazně nižší pořizovací cena.

V současné podobě je zkonstruovaná teplotní komora v komerčním sektoru schopna pouze nízké konkurence. Přesto však může najít uplatnění v široké škále aplikací především při nízkoobjemovém testování například v elektrotechnice a biologii. Odstraněním některých z výše zmíněných nedostatků je možné využitelnost zařízení výrazně zlepšit.



**Část V**

**Závěrečná část**



## Kapitola 9

### Závěr

V rámci práce bylo hlavním cílem navržení a sestavení teplotní komory s Peltierovými články se zadanými vlastnostmi a parametry. Tohoto cíle bylo dosaženo rozdělením problému do několika dílčích částí.

V teoretické části byly dohledány a sepsány poznatky týkající se problematiky chlazení a ohřevu pomocí Peltierových článků a modelování tepelných systémů. Dále se tato část věnuje současnému řešení konstrukce teplotních komor s Peltierovými články.

Na poznatky teoretické části navazuje část praktická, kdy byl nejprve navržen model konstruovaného zařízení pro simulaci vnitřní teploty a lepší představu o jeho celkové funkci. Následovaly návrh elektronického řešení a výběr vhodných komponent, návrh regulátoru řízení vnitřní teploty komory, návrh softwarového řešení řídicího programu a jeho implementace do zvoleného mikrokontroléru a návrh mechanické konstrukce celého zařízení.

Diskuzní část se věnuje zhodnocení dosažených vlastností a parametrů sestavené teplotní komory. Provedená měření pro vyhodnocení jejích teplotních parametrů dokládají splnění požadků kladených na zařízení s využitelným objemem 2,27 l a o hmotnosti 7,5 kg. Z výsledků experimentů zároveň vyplývá velmi dobrá shoda naměřených dat s daty sestaveného modelu. Celková částka za výrobu teplotní komory byla vyčíslena na 4179 Kč. Sestavená komora může jen velmi obtížně konkurovat současným komerčně dostupným zařízením podobného typu a byla doporučena vylepšení, na kterých je možno dále pracovat a využitelnost zařízení zlepšovat. Přes veškeré nedostatky je však zařízení možné spolehlivě využívat zejména pro nízkoobjemové testování například v elektrotechnice a biologii. V rámci práce bylo dosaženo veškerých určených cílů a je ji proto možno označit za úspěšnou.





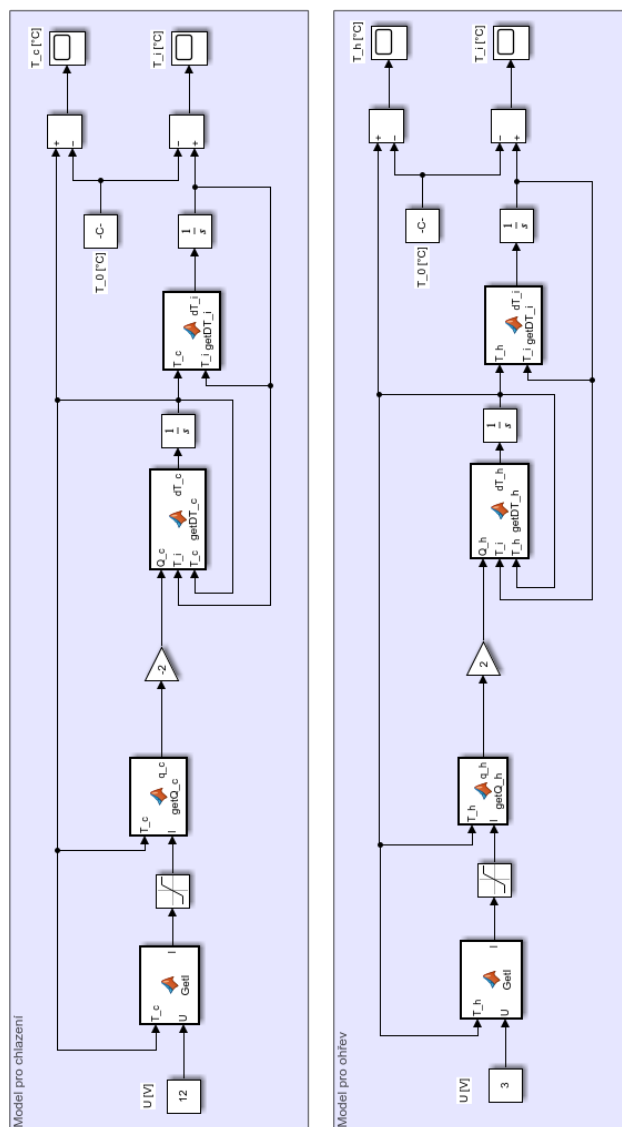


## Přílohy

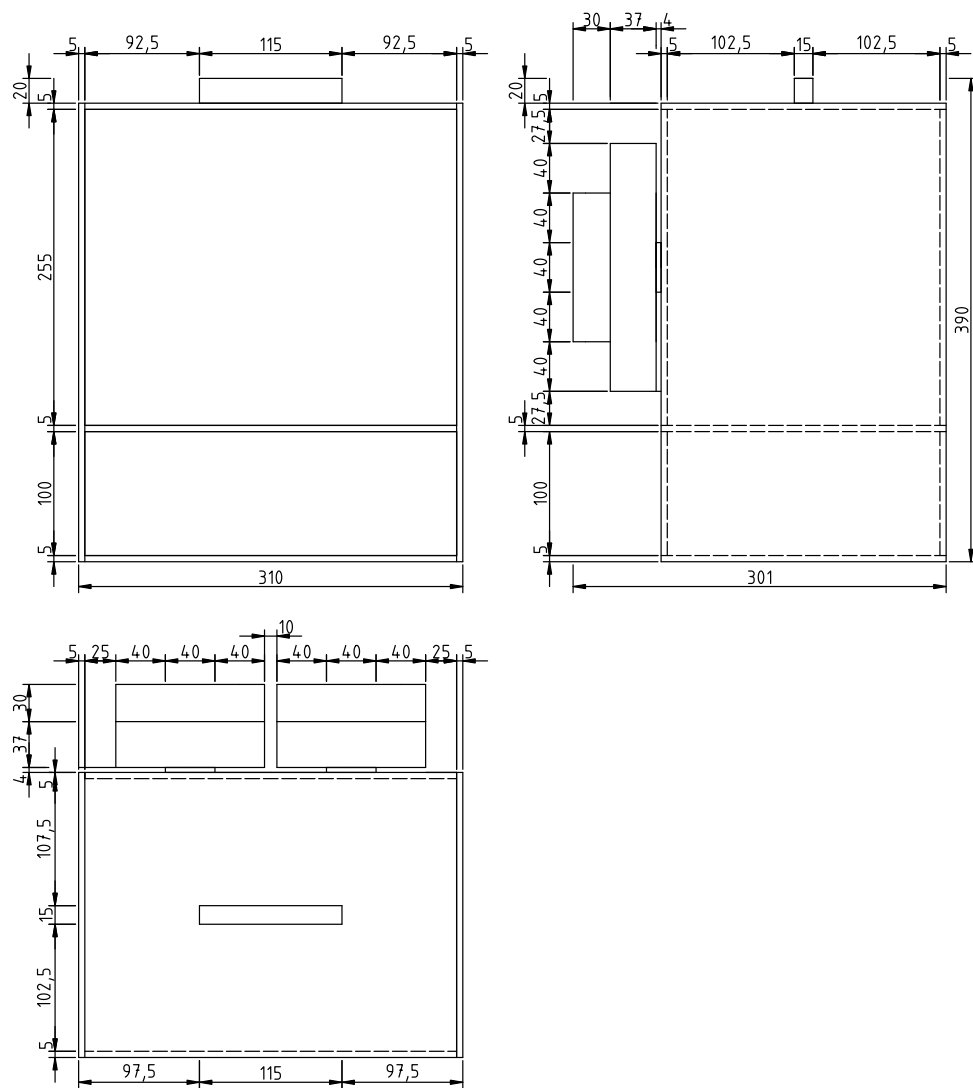


# Příloha A

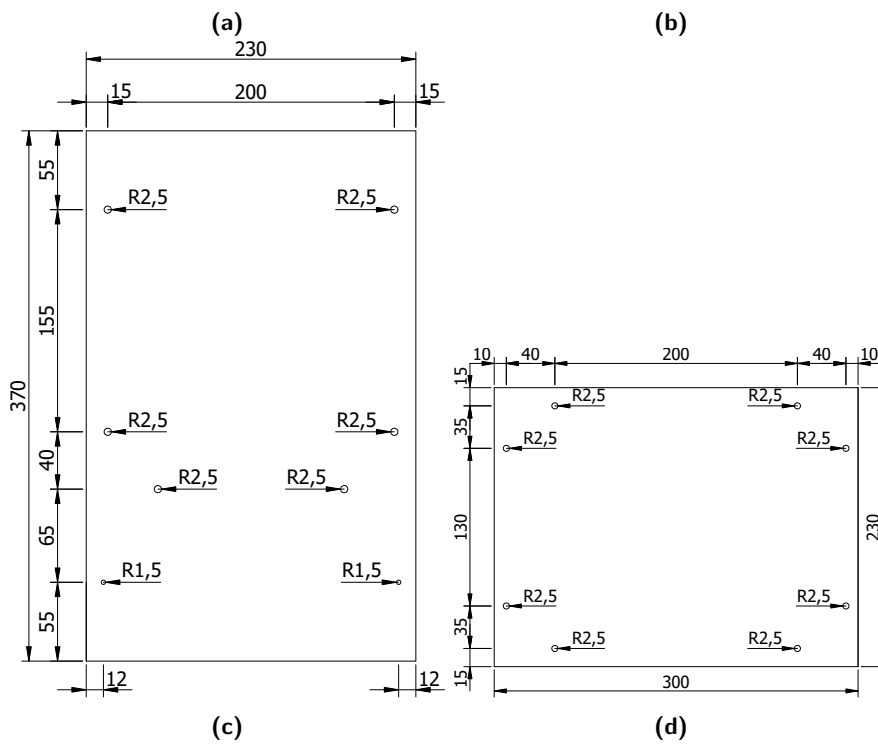
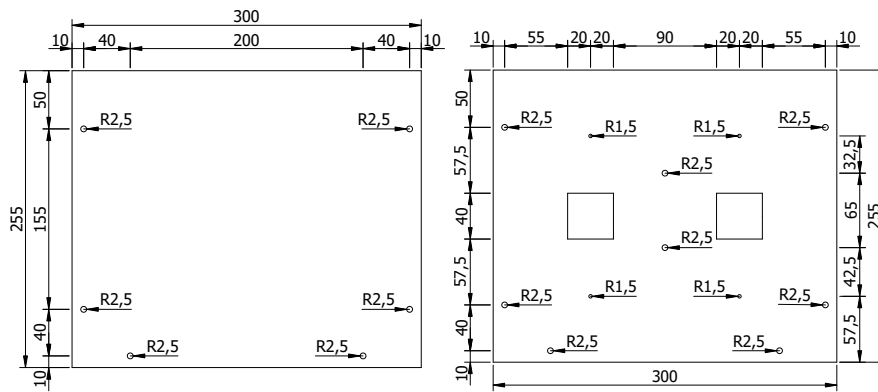
## Schémata a nákresy

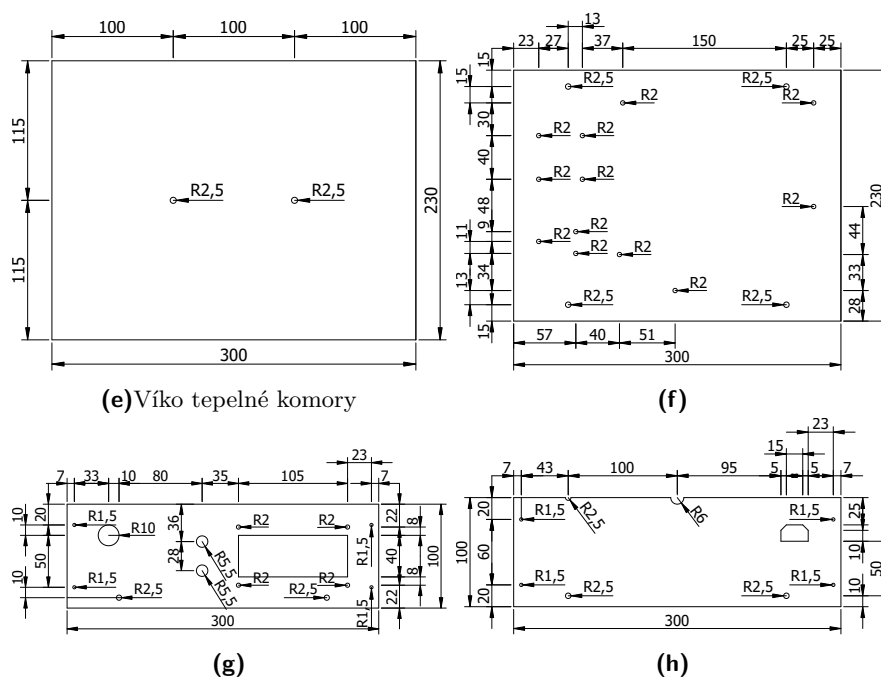


Obrázek A.1: Schémata modelu pro chlazení a ohřev (vytvořeno v Simulink)



**Obrázek A.2:** Celkový nákres konstrukce (vytvořeno v QCAD)

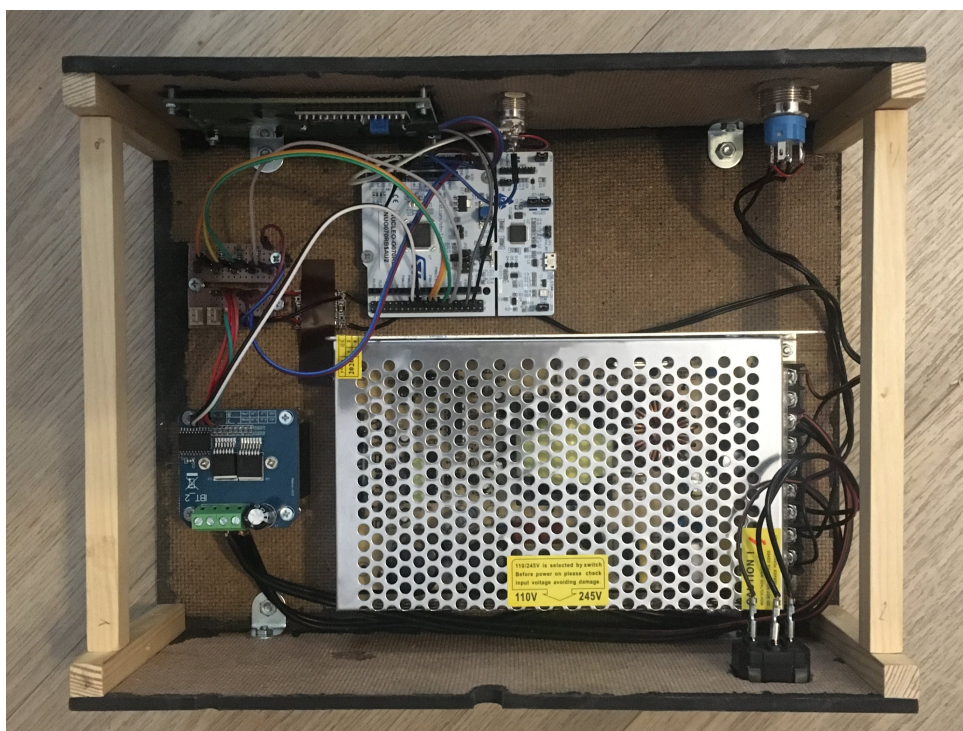




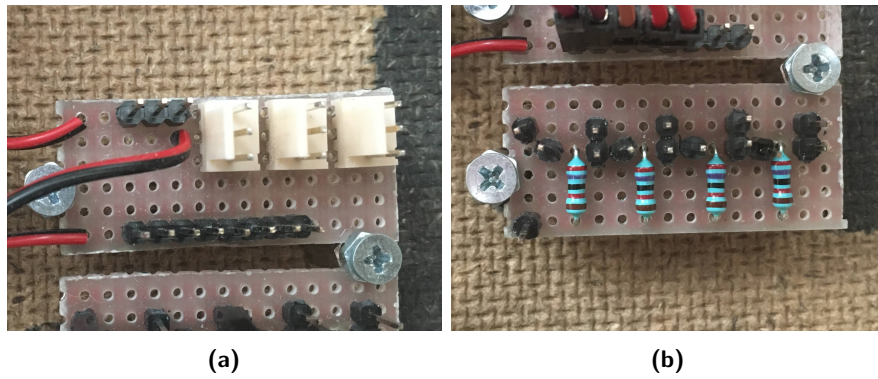
**Obrázek A.3:** Nákresy přední části tepelné komory (a), zadní části tepelné komory (b), boční části tepelné komory (c), spodní části tepelné komory (d), víka tepelné komory (e), spodní části krytu elektroniky (f), předního panelu krytu elektroniky (g) a zadního panelu krytu elektroniky (h) (vytvořeno v QCAD)

## Příloha B

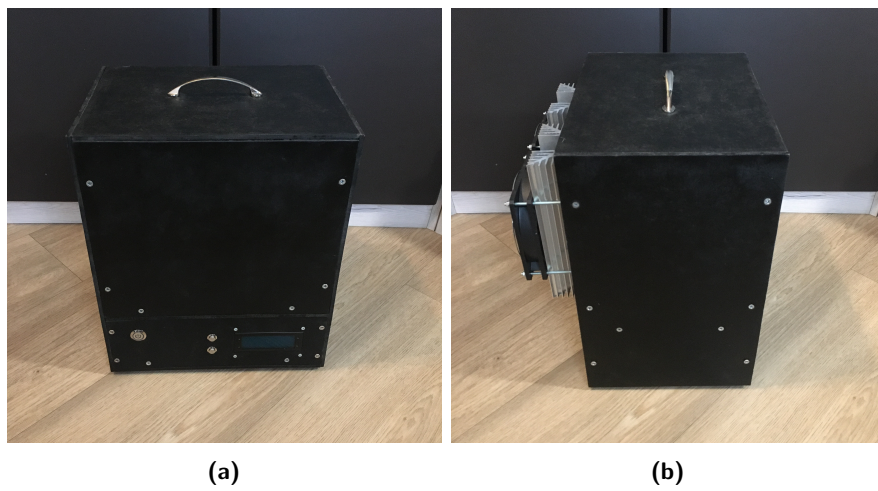
### Fotografie



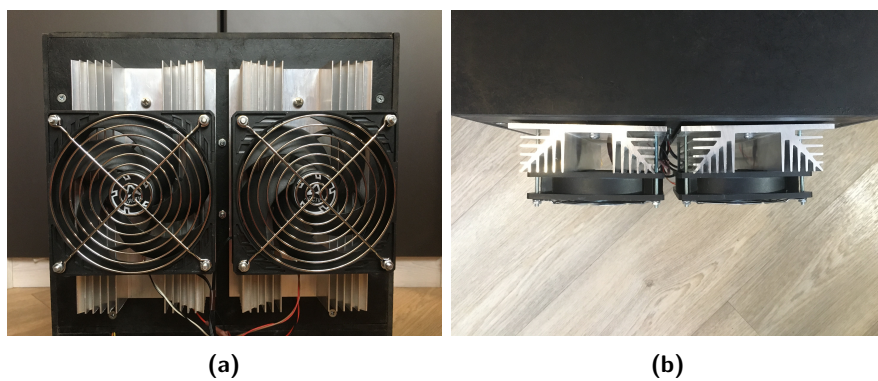
Obrázek B.1: Výsledné zapojení elektroniky



**Obrázek B.2:** Rozvod napájení (a) a obvod měření teploty (b) na deskách univerzálních plošných spojů



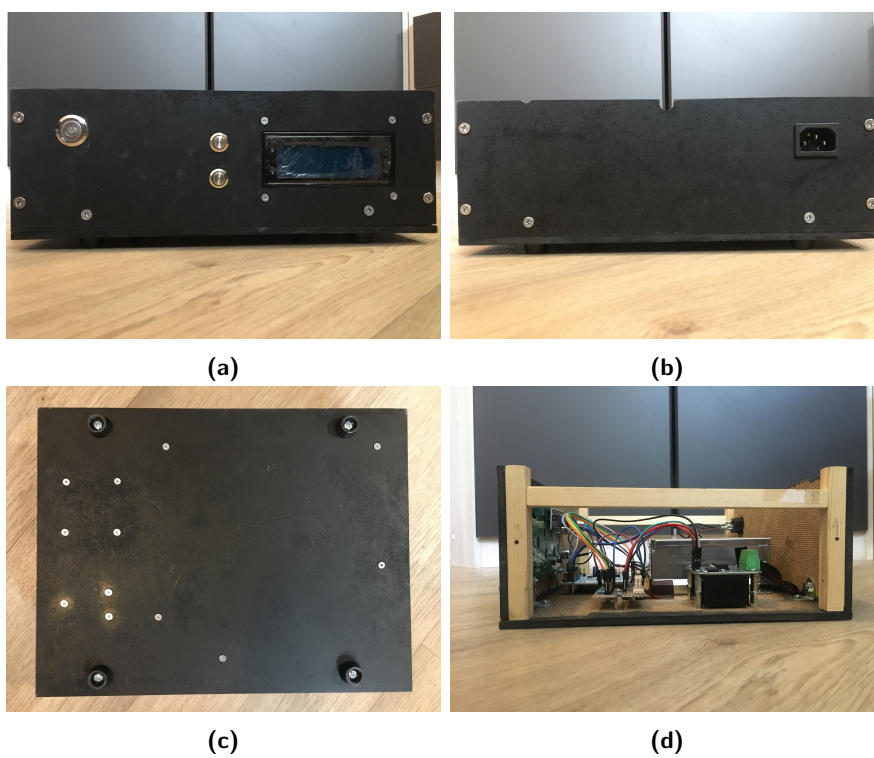
**Obrázek B.3:** Přední (a) a boční (b) část výsledné podoby zařízení







**Obrázek B.4:** Vnější chlazení zepředu (a), vnější chlazení shora (b), vnitřní chlazení s izolací (c) a víko (d) tepelné komory



**Obrázek B.5:** Přední panel (a), zadní panel (b), spodní (c) a boční (d) část krytu elektroniky





## Příloha C

### Seznam elektronických příloh

- Sestavený model, simulační soubory a naměřená data.
- Softwarový projekt pro vývojové prostředí STM32CubeIDE.



## Příloha D

### Literatura

- [1] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>.
- [2] P. E. RICHMOND. The Peltier effect. Physics Education. IOP Publishing, 1966, 1(3), 145-153, [cit. 2022-04-15]. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/1/3/301>.
- [3] Peltier Effect Theory. Instrumentation Tools [online]. 2021 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/peltier-effect-theory/>.
- [4] A. CHILINGAROV. Operation of two stacked Peltier elements. Journal of Instrumentation. IOP Publishing, 2013, 8(10), 1-10, [cit. 2022-04-15]. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/10/t10001>.
- [5] Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd, Thermoelectric Cooler TEC1-12710. Rev 2.03.
- [6] Alaoui Chakib. Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation. Chakib Alaoui International Journal of Engineering. 2011, (5), 114-121, [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.741.5453&rep=rep1&type=pdf>.
- [7] BROWN, Forbes T. Engineering system dynamics: a unified graph-centered approach. 2nd ed. Boca Raton: CRC, c2007. ISBN 978-0-8493-9648-9.
- [8] Thermofluid systems. KARNOPP, Dean, Donald MARGOLIS a Ronald C. ROSENBERG. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems. 5th ed. Hoboken: Wiley, c2012, s. 548–600. ISBN 978-0-470-88908-4.
- [9] Kambic d.o.o., Kambic PKK-50 User Manual, 2019.
- [10] Memmert, Operating manual HPPeco IPPecoplus, 3 2021.



- [22] LáskaKit, Mini SMD step-down měnič 5V, 2022. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/mini-smd-step-down-menic-5v/?gclid=Cj0KCQjw6J-SBhCrARIsAH0yMZhaFWomMzA7r0i82VRdsRauYjUdtzYAYd6rgvBk\\_W39McI1eW8sbU8aAqNMEALw\\_wcB](https://www.laskakit.cz/mini-smd-step-down-menic-5v/?gclid=Cj0KCQjw6J-SBhCrARIsAH0yMZhaFWomMzA7r0i82VRdsRauYjUdtzYAYd6rgvBk_W39McI1eW8sbU8aAqNMEALw_wcB).
- [23] STMicroelectronics, STM32G070CB/KB/RB, 2020. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g070cb.pdf>.
- [24] BOTLAND, STM32 NUCLEO-G070RB s MCU STM32G070RB, podporuje připojení Arduino a ST morpho, 2022. [cit. 2022-04-15]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://botland.cz/stm32-nucleo/20043-stm32-nucleo-g070rb-s-mcu-stm32g070rb-podporuje-pripojeni-arduino-a-st-morpho-5904422352226.html>.
- [25] LáskaKit, 20x4 LCD displej 2004 modrý + I2C převodník, 2022. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/20x4-lcd-displej-2004-modry-i2c-prevodnik>.
- [26] Drátek.cz, LCD2004 Displej modrý 20x4 znaků HD44780, 2022. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/986-display-modry-20x4-znaku-hd44780.html>.
- [27] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. Vývoj HW: Profesionální elektronika [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>.
- [28] STMicroelectronics, How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers, 2022. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf).
- [29] ŠEBEK, Michael. Příklady k přednášce 5 - Identifikace. České vysoké učení technické v Praze, Technická 1902/2, 166 27 Praha 6 - Dejvice, 2020.
- [30] LCD 20X4 using I2C with STM32. Controllerstech [online]. 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://controllerstech.com/lcd-20x4-using-i2c-with-stm32/>.