



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Elektronicky řízená teplotní komora s Peltierovými články

Bakalářská práce

**Jan Tumpach**

Vedoucí: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
Obor: Elektronika a komunikace  
Květen 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tumpach**

Jméno: **Jan**

Osobní číslo: **503239**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kontrolérem řízená teplotní komora s Peltierovými články**

Název bakalářské práce anglicky:

**Controller-controlled Temperature Chamber with Peltier Cells**

Pokyny pro vypracování:

1. Shrňte poznatky o využití Peltierových elementů pro realizaci malé testovací teplotní komory.
2. Navrhněte a realizujte teplotní komoru s objemem cca 2 dm<sup>3</sup> s Peltierovými elementy (pro zvýšení účinnosti lze použít více Peltierových elementů a popř. jejich chlazení ventilátory). Navrhněte řídicí elektroniku přístroje (využití např. kontroléru ESP32) pro zobrazení teploty použijte displej, pro měření teploty vhodný teplotní senzor, ovládání tlačítka nebo dotykovým displejem.
3. Zjistěte základní parametry realizované komory, tj. především závislost vnitřní teploty na vnější teplotě, minimální dosažitelná teplota při vnější teplotě + 30 C, hysterezi udržování vnitřní teploty systému, rychlost dosažení požadované teploty a přesnost regulace teploty.

Seznam doporučené literatury:

1. KUBINA, Pavel. Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. Automa: časopis pro automatizační techniku. 2005.  
[https://automa.cz/cz/casopis-clanky/regulace-teploty-pomoci-peltierovych-termoelektricky-modulu-2005\\_11\\_30765\\_720/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/regulace-teploty-pomoci-peltierovych-termoelektricky-modulu-2005_11_30765_720/)
2. MIRMANTO, M. et al. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. ISSN 22150986.  
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006>

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: **17.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

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

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
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 a přítelkyni za nekonečnou podporu, kterou mi poskytli během vypracování práce. Také bych chtěl poděkovat vedoucímu práce za cenné rady.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze, 26. května 2023

## Abstrakt

Tato bakalářská práce zahrnuje návrh a realizaci tepelné komory, ovládací elektroniky, včetně navrhnuté řídicí desky pro mikrokontrolér *ESP32*. Práce byla vypracována jako lehká a cenová konkurence k draze dostupným tepelným komorám s Peltierovými články. V práci je důvodně popsán výběr jednotlivých komponentů, které byly použity. Po realizaci byly změněny mezní hodnoty teplot, kterých je možno dosáhnout, rychlost a přesnost regulace či uchovávání teploty v čase. Z naměřených hodnot byla zjištěna nedostatečná vnější izolace komory, čímž byly ovlivněny výsledky.

**Klíčová slova:** tepelná komora, Peltierův článek, regulace teploty, mikrokontrolér, měření teploty

## Abstract

This bachelor's thesis includes design and implementation of thermal chamber, control electronics, including a designed control board for microcontroller *ESP32*. The chamber was developed as a brief and cheap alternative to commercially available thermal chambers using Peltier elements. The thesis reasonably describes a selection of used components. After implementation, temperature limit values, speed and accuracy of regulation or retention of temperature, were measured. Insufficient external insulation of the chamber was determined based on the measured values, which influenced the final results.

**Keywords:** temperature chamber, Peltier cells, temperature control, microcontroller, temperature measurement

# Obsah

<b>Zadání práce</b>	<b>ii</b>	2.11 Komerční tepelné komory . . . . .	15
<b>Seznam zkratk</b>	<b>xiii</b>	2.12 Tepelná komora od firmy Withnell Sensors . . . . .	16
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	Parametry komory . . . . .	16
<b>Část I</b> <b>Teoretická část</b>		2.13 Tepelná komora od firmy Memmert . . . . .	17
<b>2 Teoretický úvod</b>	<b>4</b>	Typ HPP110eco . . . . .	18
2.1 Termoelektrický jev . . . . .	4	<b>Část II</b> <b>Praktická část</b>	
2.2 Seebecův jev . . . . .	5	<b>3 Elektronické komponenty</b>	<b>22</b>
2.3 Thomsonův jev . . . . .	6	3.1 Mikrokontrolér . . . . .	23
2.4 Peltierův článek . . . . .	7	3.2 Napájení mikrokontroléru . . . . .	23
2.5 Parametry článků . . . . .	8	3.3 Displej . . . . .	24
2.6 Výkonová bilance . . . . .	9	3.4 Napájecí zdroj . . . . .	25
2.7 Tepelné testování . . . . .	11	3.5 H-můstek . . . . .	25
2.8 Typy tepelného testování . . . . .	12	3.6 Peltierovy články . . . . .	26
2.9 Druhy tepelných testů . . . . .	12	3.7 Senzor teploty <i>DHT22</i> . . . . .	27
2.10 Řízení teploty pomocí Peltierových článků . . . . .	13	3.8 Slot na SD kartu . . . . .	28
		3.9 Ostatní . . . . .	28

<b>4 Mechanické komponenty</b>	<b>29</b>	<b>Výsledky práce</b>	
4.1 Chladicí kaskáda .....	29	<b>7 Dosažené hodnoty</b>	<b>43</b>
4.2 Box .....	30	7.1 Původní záměr .....	43
4.3 Desky plošného spoje.....	31	7.2 Předpoklad .....	44
Debouncing tlačítek .....	32	7.3 Nejnižší a nejvyšší dosažená teplota .....	44
<b>5 Softwarová část</b>	<b>36</b>	7.4 Uchovávání teploty v čase a rychlost dosažení teploty.....	45
5.1 Inicializace proměnných .....	37	7.5 Reakce na skokové připojení napájení .....	46
5.2 Sekce <i>Setup</i> .....	37	7.6 Regulace teploty.....	47
5.3 Sekce <i>Loop</i> .....	37	7.6.1 Ruční nastavení.....	48
5.4 Přerušení .....	37	7.6.2 PID regulátor .....	49
5.4.1 Tlačítka .....	38		
5.4.2 Časovač s alarmem .....	38	<b>Část IV</b>	
5.4.3 Odpočet času.....	38	<b>Závěr</b>	
5.5 Uživatelské menu .....	38	<b>8 Závěr</b>	<b>53</b>
<b>6 Ekonomická rozvaha</b>	<b>39</b>	<b>Bibliografie</b>	<b>55</b>
		<b>Přílohy</b>	
<b>Část III</b>		<b>A Fotografie</b>	<b>60</b>

## Obrázky

2.1 Možné zapojení měření Seebeckova jevu (převzato z [2]). . . . .	5	3.1 Blokové schéma zapojení elektroniky (vytvořeno v <i>ASPOSE</i> ). 22	
2.2 Příklad Thomsonova jevu [4]. . . . .	6	3.2 Rozložení a využití pinů mikrokontroléru ESP32 DevKitC (upraveno, převzato z [16]). . . . .	23
2.3 Peltierův článek typu TEC1-127140S [5] (vlevo) a příklad vnitřního zapojení Peltierova článku [4] (vpravo). . . . .	7	3.3 Step-down modul pro napájení elektroniky 5V (převzato z [17]). . . . .	24
2.4 Chladicí kapacita v kontrastu s aplikovaným proudem a teplotní rozdíl v Peltierově prvku [8]. . . . .	11	3.4 Zvolený LCD displej 4x20 znaků (převzato z [18]). . . . .	24
2.5 Modul s Peltierovým systémem se zpětnovazební smyčkou pro regulaci teploty (převzato z [10], přeloženo). . . . .	13	3.5 Napájecí zdroj 250 W (převzato z [19]). . . . .	25
2.6 Řízení Peltierova systému se stálou teplotou (převzato z [10], přeloženo). . . . .	14	3.6 H-můstek použitý pro řízení nahřívání a chlazení (převzato z [20]). . . . .	26
2.7 Příklad spínání při hysterezi systému (převzato z [11]). . . . .	14	3.7 Vybraný Peltierův článek (převzato z [21]) . . . . .	26
2.8 Příklad regulace PI (vlevo) a PID(vpravo) regulátoru (převzato z [11]). . . . .	15	3.8 Grafy zobrazující výkon a zatížení článku s vyznačeným pracovním bodem (převzato z [22], upraveno v Microsoft Photos). . . . .	27
2.9 Vnitřní zapojení integrovaného obvodu MAX1968 Evaluation Kit (převzato z [12]). . . . .	16	3.9 Použitý senzor <i>DHT22</i> (převzato z [23]). . . . .	27
2.10 Porovnání spotřeby energie Memmert chlazeného inkubátoru IPpeco s pokročilou Peltierova technologií se srovnatelnými spotřebiči dostupnými na trhu [8]. . . . .	18	3.10 Modul pro Micro SD kartu (převzato z [24], vlevo) a příklad výpisu na SD kartu (vpravo). . . . .	28
		4.1 Vizualizace vytvořené tepelné kaskády (vytvořeno v programu Adobe Express). . . . .	30

4.2 Navrhnutá deska plošného spoje (vytvořeno v Kicad [25]). . . . .	31	7.2 Snímky zachycené termokamerou na povrchu článku (vlevo), následně na vnitřním chladiči (uprostřed) a nejteplejší bod na vnějším chladiči (vpravo) při hřání. . . . .	45
4.3 Zapojení pro spínání Peltierových článků na DPS (vytvořeno v KiCad [25]). . . . .	32	7.3 Graf postupného oteplování komory bez připojeného napájení. . . . .	46
4.4 Navrhnutá DPS pro ovládací tlačítka (vytvořeno v Kicad [25]). . . . .	32	7.4 Graf postupné ochlazování komory bez připojeného napájení. . . . .	46
4.5 Ukázka, jak může vypadat debouncing tlačítka [26]. . . . .	33	7.5 Graf závislosti teploty na čase po připojení napájení pro nahřívání. . . . .	47
4.6 Příklad jednoduchého zapojení pro eliminaci debouncingu tlačítka (převzato z [28]). . . . .	34	7.6 Graf závislosti teploty na čase po připojení napájení pro chlazení. . . . .	47
4.7 Příklady debouncingu a zašumění stisku tlačítka. . . . .	35	7.7 Graf závislosti teploty na čase při oteplování na cílovou teplotu 30 °C. . . . .	48
4.8 Stisk tlačítka po ošetření pouze kondenzátorem. . . . .	35	7.8 Graf závislosti teploty na čase při chlazení na cílovou teplotu 19 °C. . . . .	49
4.9 Stisk tlačítka po ošetření kondenzátorem a pull-up rezistorem. . . . .	35	7.9 Graf závislosti teploty na čase při chlazení pro cílovou teplotu 19 °C. . . . .	50
5.1 Vývojový diagram zobrazující běh programu (vytvořeno v programu Draw.io). . . . .	36	7.10 Ukázka regulace pomocí PID pro cílovou teplotu 30 °C. . . . .	50
7.1 Snímky zachycené termokamerou na povrchu článku (vlevo), následně na vnitřním chladiči (uprostřed) a nejteplejší bod na vnějším chladiči (vpravo) při chlazení. . . . .	44	A.1 Pohled z boku . . . . .	60
		A.2 Pohled shora při zavřené komoře . . . . .	61
		A.3 Pohled shora při otevřené komoře . . . . .	61
		A.4 Výsledné zapojení ovládací elektroniky . . . . .	62



A.5 Pohled na čela komory . . . . . 63

## Tabulky

2.1 Tabulka Seebeckových koeficientů  
pro známé materiály (převzato z [3]). 6

2.2 Tabulka nejistot pro měření teploty  
v jednom bodě komory a mezi dvěma  
body komory [13]. . . . . 17

6.1 Ekonomická rozvaha (seřazeno  
sestupně podle ceny za kus  
s DPH[Kč]) . . . . . 40



## Seznam zkratk

- AC** Alternating Current. 25
- AD** Analogově Digitální. 23
- DA** Digitálně Analogový. 23
- DC** Direct Current - Stejnoseměrný proud. 15, 23, 43
- DPS** Deska Plošného Spoje. viii, 12, 31, 32
- GPIO** General-purpose input/output. 23
- IPC** Institute for Printed Circuits. 11
- LAN** Local Area Network. 18
- LCD** Liquid Crystal Display. vii, 24, 31, 37, 40, 53
- PID** Proporciálně Integračně Derivační. vii, viii, 15, 16, 18, 49, 50
- PWM** Pulse Width Modulation. 13, 23
- SPI** Serial Peripheral Interface - Sériové Periferní Rozhraní. 15, 23, 28, 37
- TFT** Thin Film Transistor. 18
- UART** Universal asynchronous receiver-transmitter. 23
- USB** Universal Serial Bus. 18, 36



# Kapitola 1

## Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu tepelné komory s použitím Peltierových článků. Tepelné komory jsou běžnou součástí průmyslu, kde se využívají v mnoha odvětvích jako zdravotnictví, armáda a elektrotechnika. Tepelné komory jsou používány pro testování vlastností produktů vzhledem k teplotě, ve které se nacházejí. Nejčastější poznatek z testu je výdrž produktu či jeho chování při vystavení jistým teplotám. Dále se velmi přesné tepelné komory používají pro kalibraci měřicích přístrojů.

Součástí práce je realizace tepelné komory a návrh plošného spoje, který slouží jako řídicí deska ovládaná mikrokontrolérem. Řídicí deskou bude ovládáno množství dodávaného výkonu, spínání ventilátorů, displej, bzučák, SD karta a vytvořený tlačítkový modul.

Motivace k vytvoření této práce byla sestavit konkurenční tepelnou komoru ke stávajícímu trhu. Běžně dostupné komerční komory využívající Peltierovu technologii jsou drahé, a ne zdaleka vždy mají ekvivalentní parametry.



# Část I

## Teoretická část

## Kapitola 2

### Teoretický úvod

V této kapitole jsou popsány základní jevy související s tématem bakalářské práce. Dále je provedena rešerše aktuálně dostupných tepelných komor a porovnání jejich parametrů.

#### 2.1 Termoelektrický jev

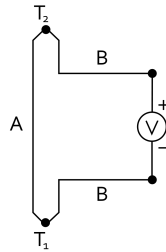
Termoelektrický jev nebo jak je také nazýván Seebeckův je podle [1], schopnost materiálu generace elektrického napětí při teplotním rozdílu, a tím zajišťovat přeměnu tepelné energie na elektrickou. Pokud mají dvě strany termoelektrického zařízení rozdílnou teplotu, generuje napětí. Naopak, pokud přivedeme na takové zařízení elektrické napětí, donutíme teplo ke konverzi z jedné strany na druhou, tedy nosiče náboje přecházejí z teplé strany ke studené.

Termoelektrický jev je výchozí pro další jevy, kterými jsou: Peltierův a Thomsonův. Dále s termoelektrickým jevem souvisí ohřev Joulovým teplem, kdy se teplo generuje při průchodu elektrického proudu vodičem. Peltier-Seebeckův a Thomsonův jev jsou jevy vratné na rozdíl od ohřevu Joulovým teplem, který je dle zákonů termodynamiky nevratný.

## 2.2 Seebeckův jev

"Tento jev byl poprvé náhodně objeven v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci kovové tyčky, pokud mezi těmito konci existuje teplotní gradient  $\Delta T$  [2]".

Seebeckův jev je v podstatě vznik napětí, za teplotního rozdílu mezi dvěma kovy nebo polovodiči. Pokud spojení tvoří uzavřenou smyčku, začne proudit proud. Takto vzniklé napětí je v řádu mikrovoltů na stupeň Celsia [ $\mu V/^\circ C$ ].



**Obrázek 2.1:** Možné zapojení měření Seebeckova jevu (převzato z [2]).

V zapojení zobrazené na obrázku 2.1 by se dalo měřené napětí vypočítat jako:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT [V], \quad (2.1)$$

kde  $U$  [V] je elektrické napětí,  $T_1$  a  $T_2$  [K] jsou teploty spojů a  $S_A$  s  $S_B$  [ $\mu V/K$ ] jsou takzvané Seebeckovy koeficienty. Tyto koeficienty jsou nelineární a závisí například na spojovaných materiálech, či jejich teplotě. Pokud můžeme v určitém rozsahu teplot prohlásit tyto koeficienty za konstantní, dá se předcházející rovnice zjednodušit na

$$U = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) = S_{AB} \cdot (T_2 - T_1) [V], \quad (2.2)$$

kde  $S_{AB}$  je relativní Seebeckův koeficient.

Následující tabulka (tab. 2.1) uvádí přibližné <sup>1</sup> hodnoty Seebeckova koeficientu pro běžné materiály.

<sup>1</sup>Hodnoty jsou pouze přibližné, protože hodnota koeficientu závisí na složení materiálu a jeho struktuře. Nemohou být tedy zcela přesné.

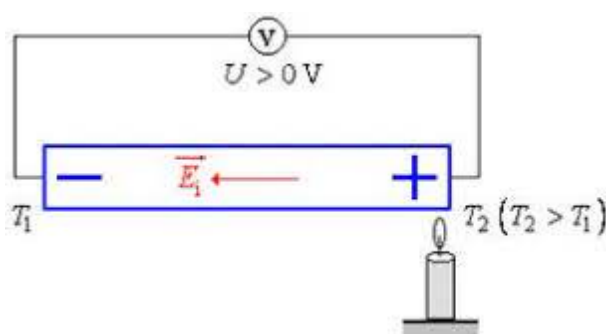
**Tabulka 2.1:** Tabulka Seebeckových koeficientů pro známé materiály (převzato z [3]).

Materiál	Seebeckův koeficient vztažený k platině [ $\mu V/K$ ]
Selenium	900
Silikon	440
Germanium	330
Zlato, stříbro, měď	6,5
Tantalum	4,5
Uhlík	3
Platina	0
Sodík	-2
Nikl	-15

## 2.3 Thomsonův jev

Pokud bychom, dle [4], zahřívali kovovou tyč s určitou délkou  $l$  na jednom konci, na tyči vznikne teplotní rozdíl a mezi konci vznikne malé termoelektrické napětí  $U$ .

I takto by se dal popsat vratný a obtížně měřitelný jev, který objevil a experimentálně potvrdil Wiliam Thomson v roce 1851. Jev je velice podobný Seebeckovu jevu, který je popsán v kapitole 2.2 s tím rozdílem, že aby vznikl Seebeckův jev, je potřeba zahřívát/chladit oba kovy, resp. jejich spoj, kdežto u Thomsonova jevu zahříváme pouze jeden kov. I proto je takto vzniklé termoelektrické napětí velmi malé.

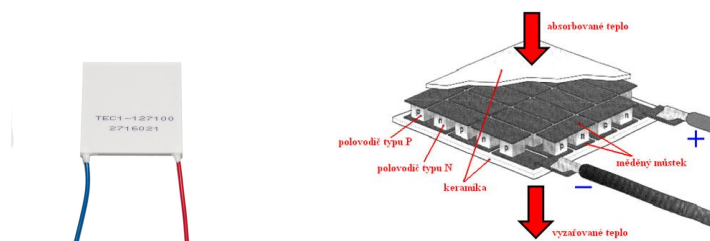
**Obrázek 2.2:** Příklad Thomsonova jevu [4].



## 2.4 Peltierův článek

Peltierův článek je součástka, která funguje na základě Peltierova jevu. Když prochází proud dvěma spojenými rozdílnými kovy, jejich konce se budou ohřívat, resp. ochlazovat na druhé straně. Článek tedy na jedné straně odebírá teplo a na straně druhé ho zase odevzdává. Peltierovy články se hojně používají pro malé a střední chladicí výkony např. v mini nebo auto chladničkách či pro chlazení čipů např. v kamerách.

V praxi se používají sériové kombinace článků, které tvoří větší celky, tzv. termobaterie. Tyto termobaterie se nadále spojují do kaskád, které jsou společně elektricky odizolovány keramickými destičkami s dobrou tepelnou vodivostí. Obrázek součástky a princip vnitřního zapojení jsou zobrazeny na obrázku 2.3.



**Obrázek 2.3:** Peltierův článek typu TEC1-127140S [5] (vlevo) a příklad vnitřního zapojení Peltierova článku [4] (vpravo).

Peltierovy články si s sebou v při použití v teplotní regulaci nesou množství výhod i nevýhod. Implementace článku je vždy potřeba zvážit, zda je vhodný do dané situace.

Výhody:

- dosahování nízkých teplot (až  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- malé rozměry,
- okamžitá reakce chlazení/ohřevu,
- dobrá ovladatelnost,
- tichý provoz,
- dlouhá životnost.

Nevýhody:

- velký odběr proudu a s tím související nízká účinnost,
- přehřívání teplé strany článku,
- malý rozdíl teplot  $\Delta T$  [K] mezi stranami článku.

## ■ 2.5 Parametry článků

Pro popis a analýzu parametrů byl náhodně vybrán článek typu TEC1-127140S prodáváný v elektrotechnickém obchodě *GM Electronics* [5]. Parametry jsou důležité pro výběr článku vzhledem k tomu, kde bude realizován, k čemu bude používán, v jakých podmínkách bude provozován a čím bude napájen. Součástí je potřeba provozovat v intervalech jeho mezních hodnot.

### ■ Rozměr

Parametr, který udává velikost článku. Většinou se rozměry pohybují v desítkách *mm*. Tenká destička mívá výšku v jednotkách *mm*, nejčastěji 40x40 mm. Pro daný typ jsou rozměry 40x40x3,2 mm.

### ■ Počet PN přechodů

Tento parametr říká, kolik PN přechodů se v dané součástce nachází. Pro příkladný článek je to 127.

### ■ Maximální teplota

Udává maximální teplotu, která může být na teplé straně článku. Při překročení je pravděpodobné, že nastane desktrukce. Pro příkladný článek je to 90 °C.

### ■ Tepelný výkon

Tepelný výkon je maximální výkon, který článek dokáže přenést ze studené strany na tu teplou. V tomto případě je maximální tepelný výkon 138 W.

### ■ Rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou

Maximální hodnota rozdílu teplot mezi stranami článku. Pro vybraný článek je rozdíl teplot roven 75 °C.

### ■ Napájení

Tento parametr většinou udává maximální hodnoty napětí, resp. proudu, který může procházet daným článkem. Opět pro vybraný článek je maximální příložitelné napětí  $U_{max} = 16,4$  V a maximální proud  $I_{max} = 14$  A.

## ■ 2.6 Výkonová bilance

Jak bylo řečeno v kapitole 2.2, Peltierův článek a jeho termoelektrická regulace je určena Seebeckovým jevem. Také bylo ukázáno, jak se vypočítá elektrické napětí, pokud mezi spoji je rozdílná teplota. V této kapitole bude probráno jak je na tom článek se spotřebou a účinností, která může být důležitým parametrem při výběru chlazení nebo zahřívání.

Pro režim, kdy článek generuje elektrický proud na svorkách článku při přítomnosti teplotního gradientu se dá podle [6], [7] vyjádřit jako

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_m + R_e} [A], \quad (2.3)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův koeficient,  $\Delta T$  je teplotní gradient,  $R_m$  je elektrický

odpor Peltierova článku a  $R_e$  je odpor vnější zátěže. Z toho vychází, že výkon do zátěže bude roven

$$P = I^2 \cdot R_e = \frac{\alpha^2 \Delta T^2 R_e}{(R_m + R_e)^2} [W]. \quad (2.4)$$

Pokud pro maximální přenos tepla uvažujeme, že  $R_m = R_e$ , tak maximální výkon dodávaný do zátěže je dán vztahem:

$$P = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{m-max}} [W], \quad (2.5)$$

kde se výkonnost materiálů dá vyjádřit pomocí termoelektrického zásluhového čísla  $Z$  udávaného v  $[1/K]$ . Tento koeficient vyjadřuje účinnost materiálu z hlediska přeměny tepla na elektrickou energii, pokud je teplotní gradient 1 Kelvina  $[K]$  a lze vyjádřit jako:

$$ZT = \frac{\alpha\sigma}{\kappa} T. \quad (2.6)$$

V případě, kdy budeme provozovat článek v režimu, kdy je do článku dodávaná energie a článek tedy chladí nebo hřeje, můžeme vzorci vyjádřit absorbované teplo  $qa$ , emitované teplo  $qe$  a výkon použitý k provozu modulů následujícími rovnicemi. Čerpané teplo se dá vyjádřit součtem členu Peltierova jevu ( $\alpha \cdot T \cdot I$ ), členu vedení tepla ( $C/\Theta m$ ) a Joulova jevu ( $I^2 \cdot R_m$ ). Obvykle se při odvozování vynechává Thompsnův člen, protože je zanedbatelně malý.

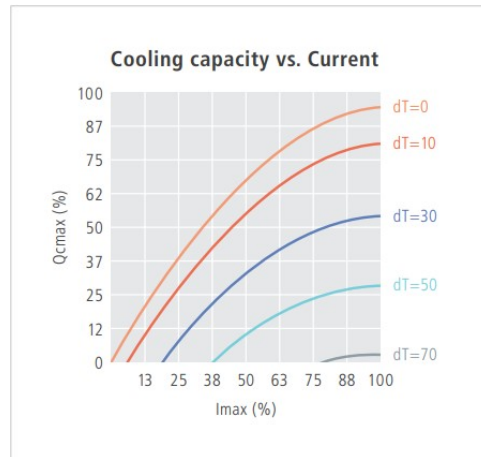
$$qa = \frac{\Delta T}{\Theta m} + \alpha \cdot T_a \cdot I - \frac{I^2 R_m}{2}. \quad (2.7)$$

$$qe = \frac{\Delta T}{\Theta m} + \alpha \cdot T_e \cdot I + \frac{I^2 R_m}{2}. \quad (2.8)$$

$$P = U \cdot I = I(\alpha \cdot \Delta T + R_m \cdot I). \quad (2.9)$$

Kde  $\Theta m$  je tepelný odpor,  $T_e$  je absolutní teplota vyzařovaného tepla.

Na obrázku 2.4 je zobrazena závislost tepelného výkonu na protékajícím proudu pro různé křivky symbolizující různé  $dT$  neboli  $\Delta T$ . Lze si povšimnout potvrzení rovnice 2.4, kdy se zvyšujícím se rozdílem teplot  $dT$  [K] se zvyšuje výkon a zároveň proud, který je potřeba do obvodu dodávat.



**Obrázek 2.4:** Chladicí kapacita v kontrastu s aplikovaným proudem a teplotní rozdíl v Peltierově prvku [8].

## 2.7 Tepelné testování

Tepelné testování (diagnostika), by mělo být zařazeno v každém výrobním postupu. Je to důležitý proces, jak k určení spolehlivosti a odolnosti testovaného objektu, tak odhalování chybných produktů. Jakmile samotná součástka či celá deska plošného spoje sjede z výrobní linky, měla by splňovat určité tepelné standardy, například IPC [9]. Je tak důležité jak pro výrobce, tak pro návrháře, aby počítali s tepelnou odolností používaných součástek a počítali tak např. i s jejich vhodným umístěním.

Při návrhu plošného spoje, je potřeba dopředu počítat s tepelným namáháním podobným jako prostředí, do kterého bude objekt nainstalován. Testy IPC zahrnují návrh i postupy při tepelném testování.

Také se dají kvalitativní testy rozlišit podle odvětví, kam dané součástky budou umístěny. Jiné požadavky jsou často například do zdravotnictví, do kosmických prostředí, extrémně teplých či studených a nebo pro armády.

## 2.8 Typy tepelného testování

Rozlišujeme různé typy tepelného testování, ale mezi základní obecné typy patří:

- Testování jednotlivých součástek před umístěním na plošný spoj nebo do obvodu. Cílem je eliminovat vadné součástky z výroby, které jsou nepřesné, nesplňují limity nebo jsou špatně konstrukčně vyrobeny.
- Testování celých obvodů nebo plošného spoje. Používá se pro testování provozních podmínek obvodu, buď tepelným šokem nebo dlouhodobým vystavením vysokým či nízkým teplotám.

## 2.9 Druhy tepelných testů

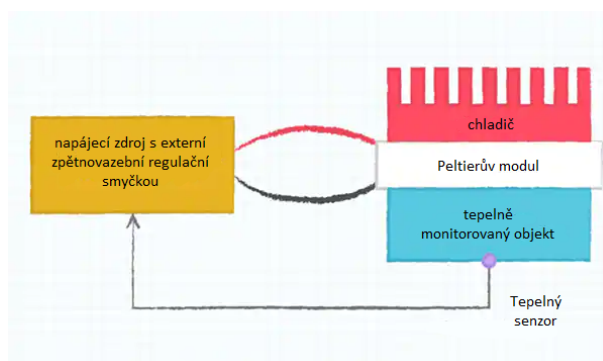
- **Tepelný šok** - testovaný subjekt je v krátkém časovém okamžiku vystaven vysoké nebo velmi nízké teplotě. Tento typ tepelného testu namáhá hlavně spojovací vodiče či kabely, tranzistorové a jiné přechody nebo pájené spoje na DPS. Ve vysokých teplotách se špatně zapájený spoj vlivem teploty může samovolně odpájet. To většinou vede k vyřazení funkčnosti součástky.
- **Tepelný cyklus** - jde o periodické kolísání teploty v určených mezích - nejlépe extrémech. Kolísání nemusí probíhat rychle. Na tento typ testu jsou citlivé vodiče a desky plošného spoje, které mohou zkřehnout.
- **Dlouhodobé vystavení určité teplotě** - nejčastější typ tepelného testování pro elektroniku. V principu může simulovat provozní podmínky daného subjektu tím, že ho vystaví stálé teplotě po delší dobu (až hodiny). Při tomto testu se testuje jak odolnost v daném prostředí, tak teplotní charakteristiky jednotlivých součástek. Speciální tepelné komory mohou sloužit právě i pro testování reálných parametrů součástky, například jako reference nebo test k příbalovému letáku součástky. V tomto případě komora zahrnuje měřicí zařízení, ideálně automatické, které samostatně po připojení provede měření. V ručně domácky vyrobených komorách je tento postup nepravděpodobný, takže by si uživatel hodnoty musel naměřit a dále zpracovat sám.

Po všech typech tepelných testů by měla následovat kontrola funkčnosti, pájených spojů a celkového vzhledu. Pokud se při kontrole opakují součástky, nebo místo na kterém byly detekovány poruchy, měla by se zvážit změna designu plošného spoje nebo výměna součástky.

Pokud se test týkal měření vlastností součástky nebo obvodu v závislosti na teplotě, zřejmě sloužil pro ověření vlastností před osazením nebo pro zkoušku výrobce, zda hodnoty odpovídají toleranci.

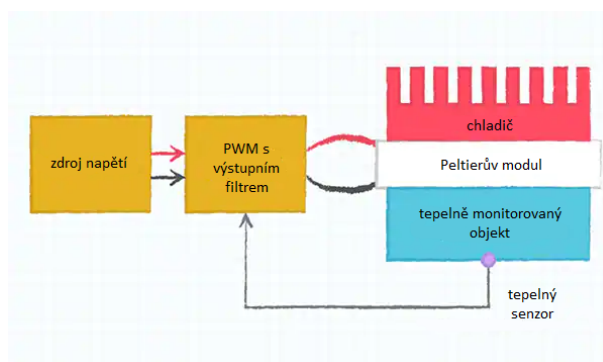
## 2.10 Řízení teploty pomocí Peltierových článků

Peltierův článek je součástka, která je napájena proudem, ideálně řízeným proudovým zdrojem. V případě neustálého provozu je možno napájet i konstantním napětím. V tomto případě lze zatěžovací proud a vstupní napětí dohledat přímo v datasheetu součástky např. z charakterizačních grafů. Dál je také možno zavést zpětnovazební smyčku, například pro změny tepelné zátěže nebo okolní teploty nebo pokud chceme udržovat stálou teplotu. Teplotní senzor může být jednoduchý termočlánek nebo polovodičový či infračervený senzor, jejichž data jsou přiváděna do zdroje, jenž ovládá výkon ve smyčce. Pokud se nedá použít ovládání napětového zdroje, je možné použít signálu PWM neboli pulzně šířkové modulace. Tato modulace využívá střídý obdélníkového signálu k řízení výkonu do zátěže. Pomocí poměru logických jedniček a nul určuje procento dodaného výkonu. Doporučuje se filtrovat PWM signál tak, aby zvlnění zůstalo pod 5 %. To minimalizuje interferenci s ostatními součástkami a zajišťuje, že modul pracuje s vysokým koeficientem výkonu.



**Obrázek 2.5:** Modul s Peltierovým systémem se zpětnovazební smyčkou pro regulaci teploty (převzato z [10], přeloženo).

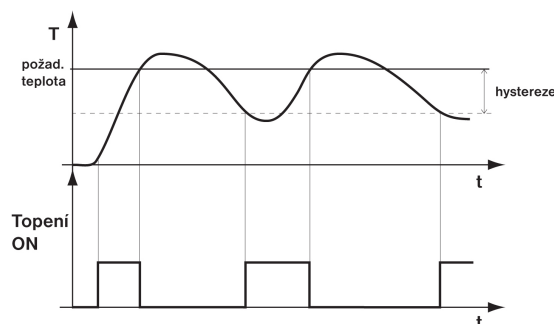
V ideálně uzavřené komoře nedochází k jakékoliv výměně prostředí s okolím, to znamená, že vnitřní prostředí nemůže být ovlivněno vnějším. To zvláště minimalizuje šanci kondenzace uvnitř komory. Kondenzace případně probíhá



**Obrázek 2.6:** Řízení Peltierova systému se stálou teplotou (převzato z [10], přeloženo).

vně komory na chladiči článku. Na chladič by měl být připojen ventilátor, který pomáhá jak k rychlé reakci Peltierova článku a částečně ovládá teplotu článku, tak optimalizuje distribuci teploty.

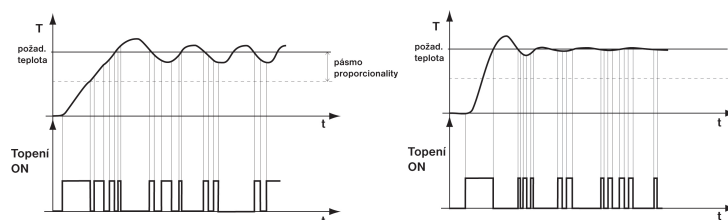
Řízení opět velice záleží na dané aplikaci. V běžných aplikacích se používá jednoduchý dvoustavový regulátor, tedy buď dodává do systému výkon a systém je zapnutý a funguje anebo nedodává výkon a systém je vypnutý. V tomto případě je pak nutné změřit a nastavit hysterezy systému. Jelikož systém může být jenom zapnutý a vypnutý, chceme, aby se zapínal a vypínal co nejvíce efektivně. Pokud nastavíme přímo hodnotu, které chceme dosáhnout podmínkou tak, že dokud systém nedosáhne teploty tak je zapnutý, tak ihned po dosažení dané teploty se vypne. Opět velice záleží na systému, ale běžně takový stav, kdy se teplota rovná nastavené netrvá dlouho. Takže teplota klesne/stoupne a systém se opět spíná, ale pouze do té chvíle kdy nedosáhne dané teploty. Hystereze vzniká také přirozeně od systému setrvačností. Proto se u systémů nastavuje hystereze, kdy se určí efektivně horní a spodní hranice spínání tak, aby korespondovala se setrvačností systému. Pokud budete naplno topit a při zadané teplotě systém přestane, setrvačností se okolí bude stále chvíli oteplovat/chladit a záleží jen na izolaci komory, jak dlouho to bude trvat.



**Obrázek 2.7:** Příklad spínání při hysterezy systému (převzato z [11]).



U náročnějších aplikací se využívá PID regulátor složený z proporciálního, integračního a derivačního regulátoru. PID regulátory jsou často používány k regulaci systémů a řadí se před regulovanou soustavu. Další možnost řízení Peltierova článku nebo termoelektrické soustavy jsou integrované obvody určené přímo k regulaci tohoto typu.

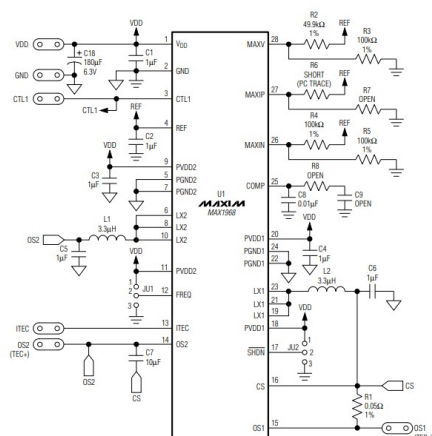


**Obrázek 2.8:** Příklad regulace PI (vlevo) a PID (vpravo) regulátoru (převzato z [11]).

Takovým příkladem je třeba integrovaný obvod *MAX1968* Evaluation Kit od firmy MAXIM [12], ač je lehce zastaralý, obsahuje mnoho užitečných integrovaných periférií jak je vidět i na obrázku 2.9. Obvod je napájen 3–5,5 V a poskytuje výstupní proud až  $\pm 3$  A. Má možnost určovat cílovou teplotu pomocí potenciometru, digitálně-analogového převodníku nebo z externího DC vstupu. Tepelná zpětná vazba z chladicího systému, kterou obstarává integrovaný teploměr se porovnává s nastaveným napětím, aby se generoval signál řízení proudu pro Peltierův systém. Pokud uživatel chce využívat vstupního signálu z digitálně-analogového převodníku, je integrovaný obvod, dodávaný ve formě kitu, připojen k počítači pomocí paralelního portu tiskárny, nebo pomocí SPI sběrnice. MAXIM pak dodává pomocný software, kterým se dá kit nastavit a ovládat. Stáří tohoto obvodu podtrhuje fakt, že minimální požadavky na operační systém jsou Windows 95.

## 2.11 Komerční tepelné komory

Na trhu lze nalézt nespočet komerčně vyráběných s mnoho volitelnými parametry a nastaveními. Moderní přístroje používají dva typy chladících/hřejících mechanismů, a to pomocí Peltierových článků a kompresorovou technologii. Nelze vyloženě říci, která technologie je lepší, protože každá aplikace má své specifické řešení a pro každou se hodí něco jiného. Rozhodování záleží na potřebných parametrech, rychlosti, teplotě, odebíraného výkonu, velikosti apod.



**Obrázek 2.9:** Vnitřní zapojení integrovaného obvodu MAX1968 Evaluation Kit (převzato z [12]).

## 2.12 Tepelná komora od firmy Withnell Sensors

Britská firma Withnell Sensors nabízí mnoho produktů spojených s teplem a vlhkostí jako například zařízení pro kalibraci a servis tepelných senzorů, různé data loggery, speciálně vybavené průmyslové lednice a mrazáky, klimatické komory a mimo jiné nabízí i komory založené na Peltierově technologii.

Firma produkuje komory s tichým chodem ve dvou variantách, kterou se liší v parametrech a velikosti. Maximální teplota však dosahuje maximálně  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pokud je potřeba, je do komory možné nainstalovat mnoho doplňků. Jejich komory jsou určené pro enviromentální testy, testy materiálů a testy stability. Výrobce uvádí, že komory s technologií *Kambic* poskytují stabilní a přesné tepelné testy, hlavně s dlouhým trváním. Teplota lze ovládat od  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , stejně jako vlhkost, která se dá měnit v rozmezí od 10 % do 98 %. Komora je řízena PID regulátorem.

Hlavním úkolem těchto komor jsou testy stability, které jsou teplotně blízké okolní teplotě. Výrobce uvádí až 90% úsporu energie při dlouhodobých testech. Komora je tak všestranná, že se v ní dokonce dají sušit i potraviny nebo hmyz.

## ■ Parametry komory

Pro popis jsem si vybral menší ze dvou uvedených komor [13]. Tato komora má použitelný objem 57 l, který se dá využít pro spoustu testů i sušení potravin. Teplotní rozsah není zas tak široký, pohybuje v okolí okolní teploty. V praxi to znamená okolní teplota +8 až 55 °C. Komora je také schopna ovládat vlhkost vnitřního prostředí a to od 10 % do 98 %. To může velmi výrazně ovlivnit podmínky testu.

Vnější rozměry komory jsou u šířky 570 mm, pro výšku 800 mm a pro hloubku 660 mm. Chytré zateplení, odhlučnění a odstínění vytváří vnitřní rozměry o šířce 400 mm, o výšce 400 mm a o hloubce 360 mm.

V následující tabulce (tab. 2.2) jsou uvedeny nejistoty teploty v případě měření v jednom určitém bodě komory a nejistota, pokud měříme teplotu ve dvou různých bodech uvnitř komory neboli fluktuální. Ty jsou zjevně vyšší, téměř až o jeden desetinný řád a nejvyšší hodnota nejistoty je až  $\pm 1,3$  °C, což v určitých případech, kdy je nutný přesný výsledek může do měření vnášet velké nepřesnosti.

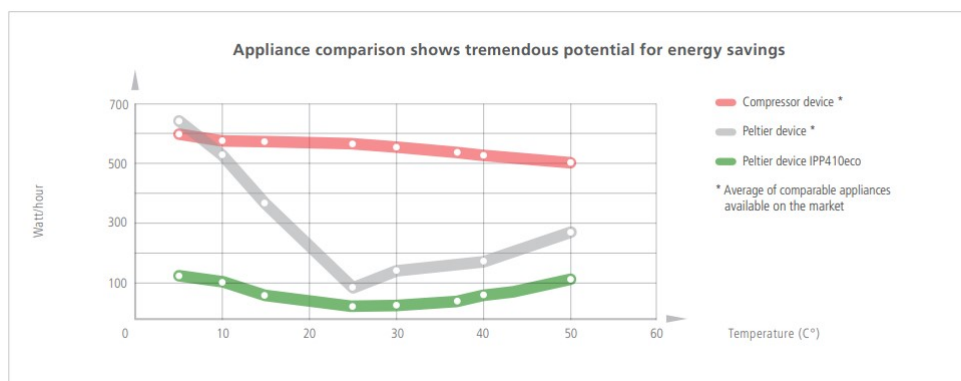
**Tabulka 2.2:** Tabulka nejistot pro měření teploty v jednom bodě komory a mezi dvěma body komory [13].

Vlhkost [%]	Teplota [°C]	Nejistota v jednom bodě [°C]	Nejistota mezi dvěma body [°C]
75	15	$\pm 0,06$	$\pm 0,25$
60	20	$\pm 0,04$	$\pm 0,25$
65	30	$\pm 0,03$	$\pm 0,48$
75	50	$\pm 0,06$	$\pm 0,58$
15	50	$\pm 0,12$	$\pm 1,3$

## ■ 2.13 Tepelná komora od firmy Memmert

Německá firma Memmert produkuje mnoho výrobků jako jsou testovací komory, pece nebo speciální inkubátory, které mají své uplatnění v mnoho oborech např. průmysl, medicína nebo potravinářství. Jejich komory využívají jimi navrženou pokročilou Peltierovu technologii *IPP410eco* [14], která má,

podle údajů firmy, až dvakrát zvýšit účinnost chladicího/hřejícího systému a ušetřila až 90 % energie ve srovnání s kompresorovým chlazením.



**Obrázek 2.10:** Porovnání spotřeby energie Memmert chlazeného inkubátoru IPPeco s pokročilou Peltierova technologií se srovnatelnými spotřebiči dostupnými na trhu [8].

Na obrázku 2.10 je možné si prohlédnout porovnání spotřeby systému v závislosti na teplotě a využití technologií. Graf využívá hodnoty z výrobků Memmert [8]. Narozdíl od kompresorového systému, který má sice téměř lineárně klesající spotřebu se zvyšující se cílovou teplotou, ale nejvyšší spotřebu, má ovládání teploty s Peltierovými články sice nelineární charakteristiku, za to se jeho charakteristika pohybuje v hodnotách až šestkrát menších výkonů než ovládání kompresorové. Dále jsou zobrazeny dva typy technologií od firmy Memmert s běžným peltierovým systémem a se systémem *eco*, který má nejplošší závislost a odebírá nejméně výkonu.

## ■ Typ HPP110eco

Tato komora nabízí mnoho nastavení teploty, vlhkosti a to i s rozlišením, pokud v komoře svítí světlo či nikoliv. Největší teplotní rozsah v nastavení bez světla a bez nastavení vlhkosti dosahuje 0 – 70 °C. Komora pracuje s přesností 0,1 °C a je měřena dvěma senzory *Pt100*. Co se týče vlhkosti, ta se dá nastavit v rozsahu od 10 % do 90 % a má odchylku přesnosti půl procenta. Zdroj vlhkosti je odebírán z externí vodní nádrže samonasávacím čerpadlem.

Komora je řízena pomocí adaptivního multifunkčního digitálního PID-mikroprocesorového regulátoru a informace jsou zobrazovány na dvou velice kvalitních TFT displejích. Nastavení programovatelných parametrů lze pomocí fyzického ovládání nebo pomocí Ethernetu, LAN a USB portu. Jako koncepci

vytápění výrobce uvádí Peltierovu technologii umístěnou na zádi komory na principu tepelného čerpadla.



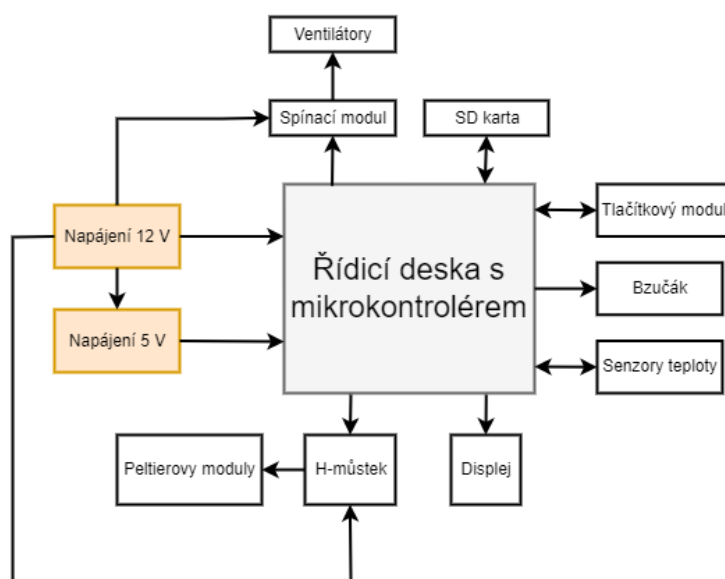
## Část II

### Praktická část

## Kapitola 3

### Elektronické komponenty

Na následujícím obrázku (obr. 3.1) je zobrazeno blokové zapojení elektronické (a části mechanické) bakalářské práce. V této kapitole jsou popsány jednotlivě použité komponenty (bloky). Jsou uvedeny jejich vlastnosti a použití.



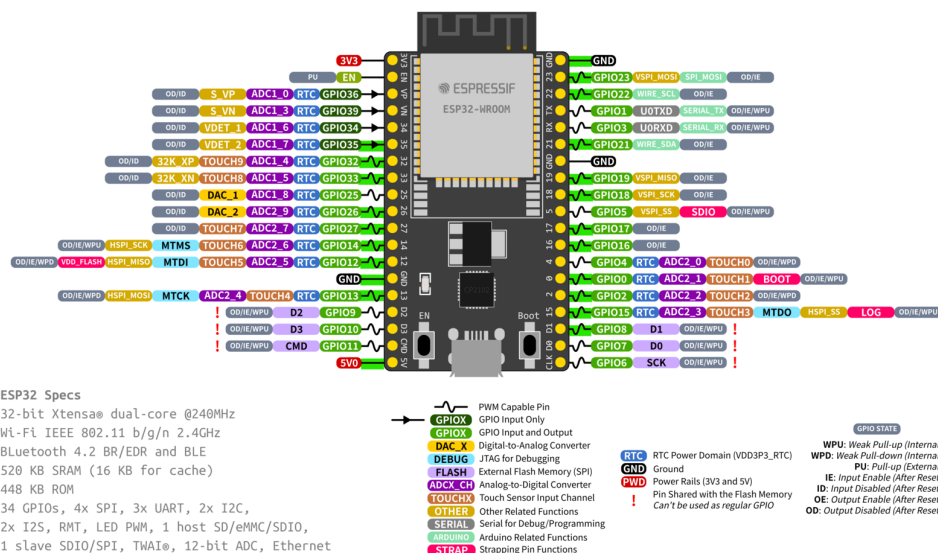
**Obrázek 3.1:** Blokové schéma zapojení elektroniky (vytvořeno v *ASPOSE*).



## 3.1 Mikrokontrolér

Jako mikrokontrolér pro řízení tepelné komory byl zvolen čip *ESP32-D0WDQ6* [15], který je součástí desky *ESP32-WROOM-32* nebo také označované jako *DevKitC*. Zvolená řídicí deska disponuje 34 vstupně-výstupními piny, dvěma 12-bitovými AD převodníky, které se dají použít na 18 kanálech, dvěma 8-bitové DA převodníky, UART komunikací, dvěma  $I^2C$  sběrnicemi, čtyřmi SPI sběrnicemi, PWM a možností časovače na každém pinu GPIO a integrovanou anténou podporující Wi-Fi (2,4-2,5 GHz) a Bluetooth komunikaci (v4.2). S touto výbavou je to velice vhodný prostředek pro řízení elektrotechnických projektů. Na obrázku 3.2 jsou zvýrazněné piny (zeleně), které byli použity v projektu.

ESP32-DevKitC

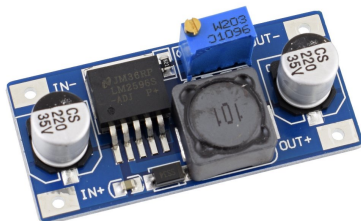


**Obrázek 3.2:** Rozložení a využití pinů mikrokontroléru ESP32 DevKitC (upraveno, převzato z [16]).

## 3.2 Napájení mikrokontroléru

Pro napájení mikrokontroléru a ostatní nevýkonové elektroniky byl zvolen step-down DC měnič [17] s variabilním výstupním napětím, které se nastavuje trimrem. Výstupní napětí lze regulovat od 3 do 33 V (samozřejmě záleží na

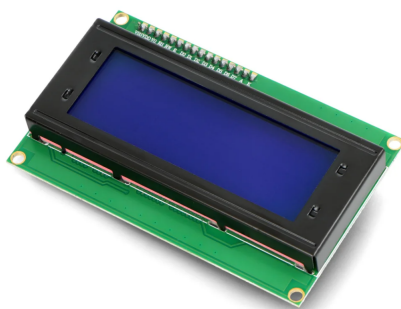
napájení modulu). Maximální odběr měniče, na obrázku 3.3, jsou 3 A, a to bez nutnosti jakkoliv měnič chladit. Hlavním odběratelem bude mikrokontrolér, který při napájení 5 V odebírá maximálně 600 mA, většinou se však odběr pohybuje okolo 500 mA. Dále jsou z měniče napájeny další periférie jako LCD, tlačítkové ovládání a senzory teploty.



**Obrázek 3.3:** Step-down modul pro napájení elektroniky 5V (převzato z [17]).

### 3.3 Displej

Jako displej pro zobrazování teplot, času a dalších informací byl zvolen jednobarevný LCD s podsvícením a regulací jasu, konkrétně varianta LCD2004 4x20, tedy se 4 řádky po 20 znacích. Pro ušetření pinů a lepší ovládání je k displeji připojen ovladač HD44780, pomocí kterého se dá displej ovládat díky dvou napájecím a dvou datovým pinům přes  $I^2C$  sběrnici na mikrokontroléru. Displej byl zvolen pro svou velikost, cenu a jednoduchou ovladatelnost a celkovou praktičnost.



**Obrázek 3.4:** Zvolený LCD displej 4x20 znaků (převzato z [18]).

## 3.4 Napájecí zdroj

Jako zdroj pro tepelnou komoru byl vybrán spínaný průmyslový zdroj od společnosti *SANPU*, který je schopen při 12 V dodávat až 20,5 A, tj. 250 W [19]. Vstupní AC napětí se může pohybovat mezi 175-240 V při frekvenci 50/60 Hz. Zdroj disponuje několika ochranami a také vlastní několik mezinárodních certifikací. Dle předpokladu by dva Peltierovy články měli odebírat každý 8 A a step-down měnič pro napájení elektroniky maximálně 3 A. Takže při 12 V by systém měl odebírat výkon 228 W. Zbylých 22 W je určeno jako rezerva a také aby se zvolený zdroj nezatěžoval na maximum, kde by se mohl zahřívat a svou teplotou např. ovlivňovat teplotu v samotné komoře.

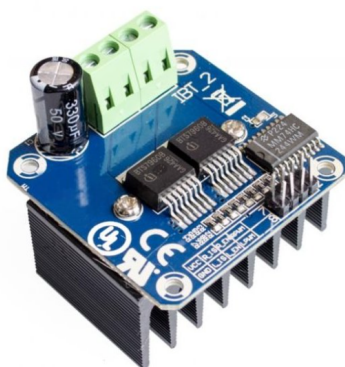


Obrázek 3.5: Napájecí zdroj 250 W (převzato z [19]).

## 3.5 H-můstek

Plošný spoj dovoluje zapojení Peltierových článků dvěma způsoby. Na plošném spoji do svorek *PEL\_VYSTUP\_1*, resp. *PEL\_VYSTUP\_2*, kde je každý článek připojen přes paralelní zapojení tranzistorů k mikrokontroléru, který ho ovládá. Toto zapojení umožňuje pouze jeden režim (buď chlazení nebo nahřívání) obou článků, nebo pokud u jednoho článku obrátíme polaritu zapojení, můžeme jedním článkem nahřívát a druhým chladit. Sice můžeme ovládat oba režimy, ale vždy bude zapojen jen jeden článek.

Druhá možnost zapojení, které je využito i ve finálním projektu je zapojení přes H-můstek typu BTS7960B, kterým lze při paralelním zapojení obou článků ovládat oba režimy. Článek byl vybrán pro svůj maximální proud až 43 A [20] a pro svou nízkou cenu.

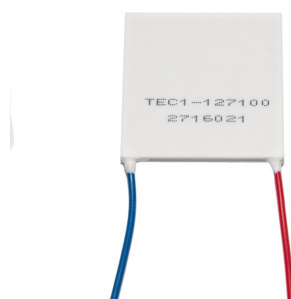


Obrázek 3.6: H-můstek použitý pro řízení nahřívání a chlazení (převzato z [20]).

### 3.6 Peltierovy články

Jako zdroj tepla a chlazení jsou v komoře použity dva Peltierovy články typu *TEC1-12710*. Tento článek disponuje 127 páry PN přechodů a má rozměry 40x40 mm. Jeho mezní hodnoty proudu a napětí dosahují  $I_{max} = 10 \text{ A}$  a  $U_{max} = 16,4 \text{ V}$  [21]. Součástka má elektrický odpor  $R = 1,4 \Omega$ , při teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  teplé strany Peltierova článku.

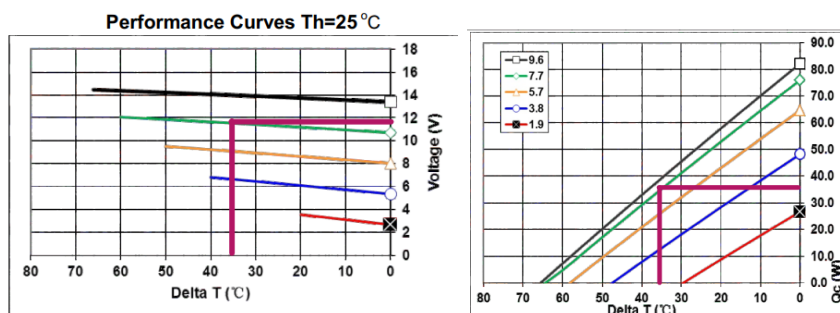
Ve skutečnosti každý z měřených článků odebírá zhruba okolo 5 A, tzn., že celkové zatížení proudem se bude pohybovat okolo 10 A. Zatížení zdroje způsobí změnu dodávaného napětí, které z předepsaných 12 V, klesne téměř na 11,5 V. Odpor článků, který byl měřen obyčejným multimetrem při pokojové teplotě se rovnal skoro dvojnásobku předepsané hodnoty, tedy cca  $2,75 \Omega$ . Což může být v pořádku, protože předepsaná hodnota je určena při teplotě teplé strany článku  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Obrázek 3.7: Vybraný Peltierův článek (převzato z [21])

## ■ Výběr článku

Tento typ článku byl vybrán pomocí grafů v příloženém datasheetu [22]. Kdy při 12 V dodávaných zdrojem a chtěné  $\Delta T$  kolem  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  je jasné, že článek bude odebírat 7,7 A a přenášet teplo o velikosti cca 35 W.



**Obrázek 3.8:** Grafy zobrazující výkon a zatížení článku s vyznačeným pracovním bodem (převzato z [22], upraveno v Microsoft Photos).

## ■ 3.7 Senzor teploty DHT22

Pro měření teploty v tepelné komoře byl vybrán integrovaný čtyř pinový senzor *DHT22*. Senzor je kromě teploty také schopen měřit vlhkost okolí. Senzor má čtyři piny, které se připojují na (1) napájení (možné od 3,3 V až do 6 V), (2) vodič pro digitální přenos dat, (3) nepřipojuje se (NC - No Connect), (4) zemnicí vodič. Pro měření teploty se používá integrovaný termistor a kapacitní senzor vlhkosti a digitální hodnoty posílá z osmi bitového čipu po signálním výstupu. Rozsah měřených hodnot je pro teplotu od  $-40$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pro vlhkost od 0 do 100 % [23]. Výrobce uvádí nejistotu naměřené teploty  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a vlhkosti  $\pm 2,0\text{ }%$ . Jeho výhody jsou velikost, malý odběr, jednoduché připojení, měří bez potřeby dalších komponentů a signál se dá přenášet až na délku 20 m. Za malou nevýhodu se dá považovat přesnost a možnost čtení hodnot každé dvě vteřiny, což je ale pro tento projekt dostačující.

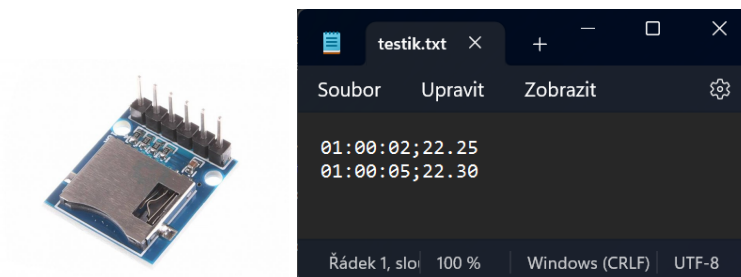


**Obrázek 3.9:** Použitý senzor *DHT22* (převzato z [23]).

## 3.8 Slot na SD kartu

Pro ukládání dat aktuální teploty a vlhkosti na SD kartu byl vybrán modul pro micro SD karty, který komunikuje s mikrokontrolérem přes integrovanou sběrnici SPI. Napájí se 3,3 V a ke komunikaci používá čtyři hlavní vodiče plynoucí z principu SPI - MISO (Master In, Slave Out), MOSI (Master Out, Slave In), SS (Slave Select) a SCLK (Clock).

Na SD kartu bude ukládána časová značka společně s naměřenou hodnotou teploty. Takto uložené hodnoty jsou určeny k dalšímu zpracování např. v programu Excel nebo Matlab, kde se z nich dá vytvořit jednoduchý graf vývoje měřených veličin. Zápis vzniká spojením časové značky, středníku (oddělovač hodnot, např. pro import do Excelu) a teploty. Příklad takového zápisu je na obrázku 3.10.



**Obrázek 3.10:** Modul pro Micro SD kartu (převzato z [24], vlevo) a příklad výpisu na SD kartu (vpravo).

## 3.9 Ostatní

Rozbor ventilátorů a návrhu desek plošných spojů je popsán v kapitole 4.

## Kapitola 4

### Mechanické komponenty

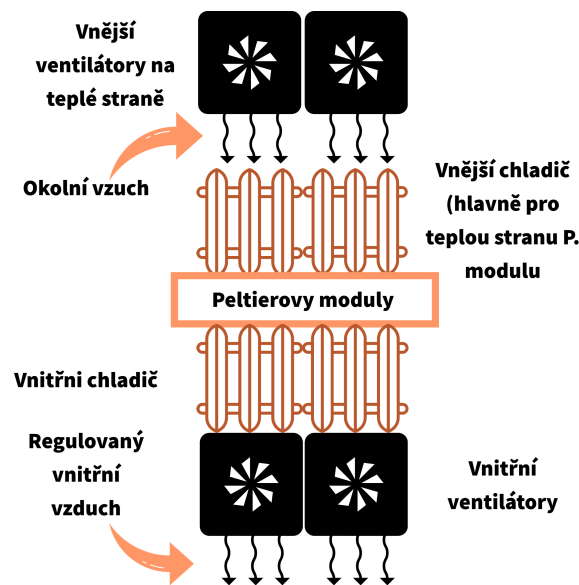
#### 4.1 Chladicí kaskáda

Pro největší chladicí a hřející výkon byla vytvořena tepelná kaskáda, která se skládá ze dvou chladičů, dvou ventilátorů a dvou Peltierových článků. Kaskáda je zkonstruována stejně jako na obrázku 4.1.

Vnější část kaskády je složena z velkého společného venkovního chladiče o rozměrech  $216 \times 100 \times 40$  cm s tepelnou vodivostí jen  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a dvou velkými ventilátory, přimontovaných přímo na žebra chladiče s průtokem vzduchu každý  $87,50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Takto je zajištěno efektivní odvětrávání okolí chladiče a modul pak může dosahovat nižších teplot.

Na tento chladič jsou připojeny právě dva Peltierovy články pomocí teplovodivé pasty s dobrou tepelnou vodivostí  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Na ně je přidělán menší chladič o rozměrech  $40 \times 40$  cm (bohužel výrobce ani prodejce neuvádějí tepelnou vodivost chladiče) s menším ventilátorem o průtoku vzduchu každý  $13,9 \text{ m}^3/\text{h}$ , který má za úkol vhnět teplo přímo do komory.

Vnitřní chladič s vnějším jsou spojeny přes víko komory každý dvěma šrouby s maticemi o velikosti  $M4$ .



**Obrázek 4.1:** Vizualizace vytvořené tepelné kaskády (vytvořeno v programu Adobe Express).

## 4.2 Box

Pro vytvoření tepelné komory byl využit 12 l chladicí box s vnějšími rozměry 40x17x29 cm. Byl vybrán hlavně pro svou cenu a jako chladicí box pro potraviny by měl mít dobrou izolaci teploty. Navíc disponuje uzavíratelným víkem.

Zhruba uprostřed chladicího boxu je vytvořena přepážka tak, aby rozdělila prostor zvláště pro elektroniku a zvláště pro samotnou komoru. Přepážka je vytvořena z 1 cm sádrokartonu, který byl zvolen pro svoje izolační vlastnosti a především, protože je mezi elektronikou a komorou, kde se mohou držet vysoké teploty, kvůli nehořlavosti. Mezery jsou zaplněny izolačním tmelem. Prostor komory je ještě ze všech svých stran obložen dvakrát 1 cm polystyrenem s tepelnou vodivostí  $0,039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , přitom spodek komory je ode dna oddělen třemi vrstvami sádrokartonu a dvěma polystyreny. Tím se ještě zvýšilo oddělení od okolí a zateplení komory. Spodní strana je též oddělena od okolí izolačním tmelem a dvěma vrstvami 1 cm polystyreny. Kraj víka, který se zasouvá na box byl oblepen černou elektrikařskou páskou, pro lepší utěsnění.

Prostor mimo samotnou komoru je určený na elektronické komponenty, hlavně napájení a řízení, jsou do boku boxu vyvrtány větrací díry. Je to

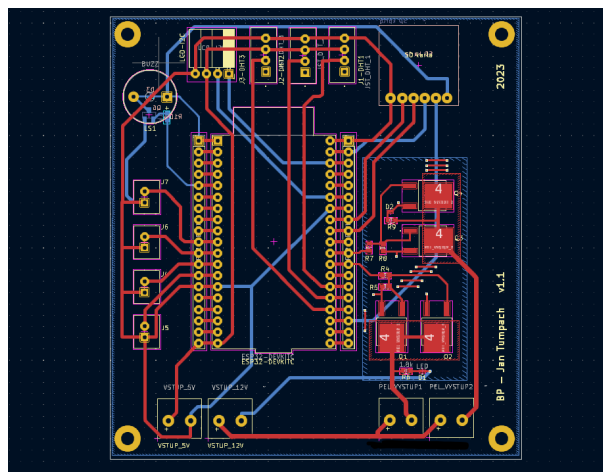


pro odvětrávání tepla, které vzniká zahříváním hlavně spínaného napěťového zdroje.

Po delší úvaze a pár zkušebních měření bylo rozhodnuto, že zdroj, který při plné zátěži vydává dost tepla se umístí ven na boční stranu komory, aby jakkoliv neovlivňoval teplotu v komoře. Všechny uvedené výsledky prezentují hodnoty naměřené s napěťovým zdrojem vně komory.

## 4.3 Desky plošného spoje

Pro ovládací elektroniku, připojení senzorů a samotných Peltierových článků byl navrhnut DPS, jehož schéma a následný layout je vidět na obrázku 4.2. DPS byl navržen tak, aby se do něj dal zasadit mikrokontrolér typu ESP32 DevKitC, který řídí přilehlé periferie. Návrh DPS probíhal v opensource programu KiCad 7.0 [25]. Do plošného spoje jsou dále pomocí JST konektorů



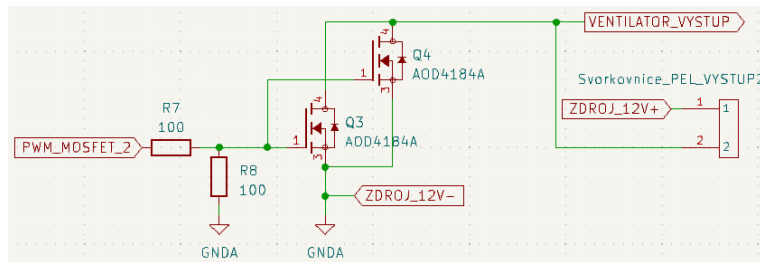
**Obrázek 4.2:** Navrhnutá deska plošného spoje (vytvořeno v Kicad [25]).

připojeny senzory teploty, napájení ventilátorů, piny pro připojení LCD displeje pře sběrnici  $I^2C$ , slot na SD kartu, bzučák, napájení 5 V pro signálové aplikace a napájení 12 V pro výkonové aplikace. Jak bylo popsáno v kapitole 3.5, do DPS se dají připojit Peltierovy články dvěma způsoby.

DPS je designován jako dvouvrstvý, má rozměry  $92 \times 100 \times 1,6$  mm (zao-krouheno na desetiny milimetru) a je vyroben z materiálu FR-4, přičemž tloušťka mědi je  $35 \mu m$ . DPS byl objednan z internetového obchodu JLCPCB, který je jedním z předních čínských dodavatelů a továren na plošné spoje. Dodavatel byl vybrán pro svou rychlost, cenu a protože v takto jednodu-

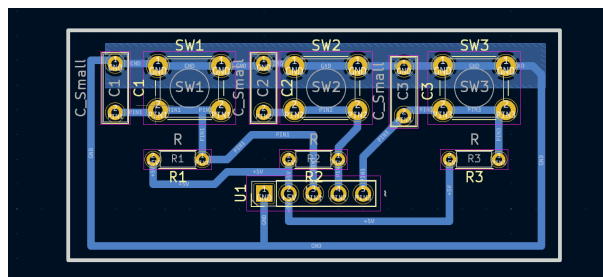
chém plošném spoji nebude poznat kvalitativní rozdíl jiného např. evropského dodavatele.

Na desce se nachází obvod pro spínání Peltierových článků. Toto zapojení je na obrázku 4.3. Je v něm použito paralelní zapojení dvou unipolárních tranzistorů *AOD4184A*. Na vstupu je napěťový dělič, kterým se spínají zmíněné tranzistory.



**Obrázek 4.3:** Zapojení pro spínání Peltierových článků na DPS (vytvořeno v KiCad [25]).

Dále pro ovládání vstupních veličin, teploty a času, byly zvoleny celkem tři tlačítka. První slouží k zvyšování zadávané hodnoty, druhé slouží ke snižování a třetí k potvrzování. Pro tato tlačítka byl opět navrhnout DPS, do kterého je i zaimplementovaná ochrana proti debouncingu.



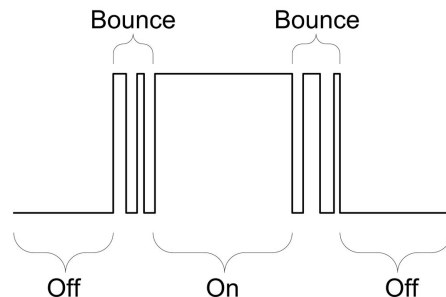
**Obrázek 4.4:** Navrhnutá DPS pro ovládací tlačítka (vytvořeno v Kicad [25]).

## ■ Debouncing tlačítek

V programu projektu jsou stisknutí tlačítek detekována pomocí softwarového přerušení, kdy se program odkloní od normálního běhu, provede obsluhu přerušení, tzn. v tomto případě změni hodnotu tlačítka na stisknuto a poté se vrátí k normálnímu běhu programu. Je tedy zřejmé, že budou velké nároky na „čistotu“ stisku bez tzv. debouncingu.

Debouncing vzniká po mechanickém stisknutí tlačítka nebo přepínače, kdy

se zkratují dva vodiče a signál stoupající na horní hranici digitálního signálu je zašuměn a mikrokontrolér to může vyhodnotit jako mnohačetné stlačení. Také se mechanickými nedokonalostmi může stát, že se tlačítko opravdu stiskne několikrát, než se ustálí na jedné hodnotě.



**Obrázek 4.5:** Ukázka, jak může vypadat debouncing tlačítka [26].

Tomuto fenoménu se dá zabránit několika způsoby:

#### 1. Softwarově

První možností je ošetřit debouncing uvnitř programu. Do části obsluhující čtení tlačítka se přidá jednoduchá část kódu (např. jako v kódu 1, [27]), která zjišťuje jak dlouho bylo tlačítko zmáčknuto. Pak vyhodnotí, zda stisk trval dostatečně dlouho a program běží dál.

```

1
2 // příklad ošetření debouncingu tlačítka
3 // převzato z https://docs.arduino.cc/built-in-examples/
4 //   digital/Debounce
5 //   preloženo, okomentováno
6
7 int buttonState; //stav tlačítka
8 int lastButtonState = LOW; //poslední stav tlačítka
9
10 unsigned long lastDebounceTime = 0; //poslední doba, kdy
11   bylo tlačítko zmáčknuto
12 unsigned long debounceDelay = 50;
13 // doba odezvy, je potřeba zvýšit, pokud je výstup zasumen
14
15 int reading = digitalRead(22); //nactení digitální hodnoty z
16   tlačítka
17
18 if (reading != lastButtonState) {
19   //pokud se nactená hodnota nerovná poslední uložené
20   //hodnotě, spustí se podmínka
21   lastDebounceTime = millis(); // vyresetuje se čas
22   //posledního stisku
23 }
24
25 if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay) {

```

```

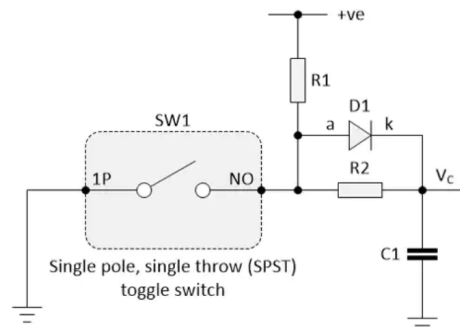
21 // pokud je nactena hodnota jakakoliv, stav tam je
    // natolik dlouho,
22 // ze prekona nastavenou odezvu
23 if (reading != buttonState) { // prehozeni stavu
    // tlacitka
24     buttonState = reading;
25 }
26 }
27
28

```

Po proběhnutí tohoto kódu si můžeme být jisti, že *buttonState*, neboli stav tlačítka je opravdu po stisku, a ne po zákmitu.

## 2. Hardwarem

Zde je opět prostor pro spoustu řešení. Jedno z nejjednodušších je RC obvod, např. jako na obrázku 4.6



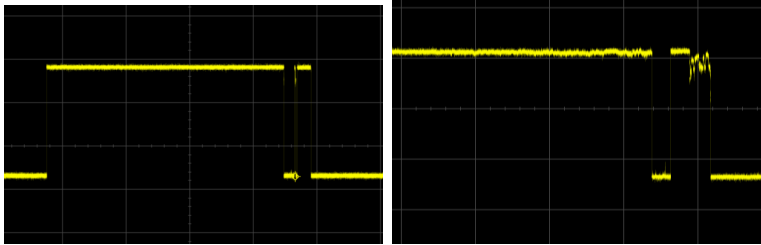
**Obrázek 4.6:** Příklad jednoduchého zapojení pro eliminaci debouncingu tlačítka (převzato z [28]).

Při takovémto zapojení se při rozpojení spínače nabije kondenzátor na napětí *+ve* přechodovým dějem 1. stupně, tedy proud se bude řídit rovnicí  $i(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ , kde  $\tau = RC$ . Takže jsme schopni upravovat dobu ustálení přechodového děje pomocí odporu *R* a kapacity kondenzátoru *C*. Do obvodu je přidána dioda *D1*, která zajišťuje, že se kondenzátor nabíjí pouze přes odpor *R1* a při stisknutí tlačítka pouze přes odpor *R2*.

Dále se za obvod z obrázku 4.6 zařazuje Schmittův klopný obvod (ideálně invertovaný, z důvodu otočené logiky), který zajišťuje překlápění pouze mezi stavy 1 - HIGH a 0 - LOW. Přechodový jev nabíjení a vybíjení kondenzátoru se totiž pohybuje po exponenciálně a přímé přivedení na pin mikrokontroléru by mohlo znamenat nepřesné hodnoty.

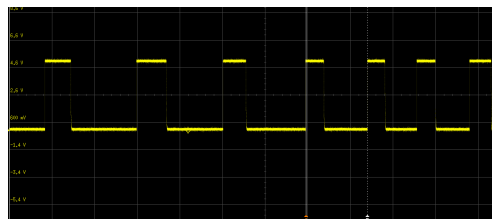
Pokročilejší metody potlačování debouncingu přepínačů a spínačů využívají většinou velice efektivní RS klopný obvod, nebo vyloženě specializované integrované obvody, např. *MAX6818EAP+T (IC SWITCH DEBOUNCER 20SSOP)*.

V rámci praktické části byly změřeny tři typy ošetření debouncingu. Všechny typy byly měřeny na osciloskopu *Rohde&Schwarz RTM3004* v IOT laboratoři na katedře radioelektroniky. Na obrázku 4.7 jsou dva příklady kmitů nebo zašumění po stisku tlačítka.



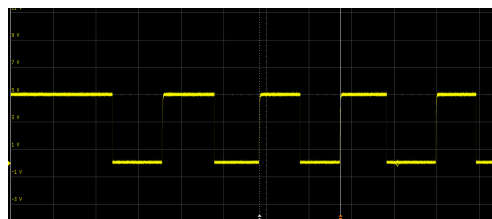
**Obrázek 4.7:** Příklady debouncingu a zašumění stisku tlačítka.

Jako druhé ošetření byl paralelně k tlačítku připojen  $100\text{ nF}$  kondenzátor, který by měl vyhladit případné záškuby. Výsledek je zobrazen na obrázku 4.8. Na průběhu je vidět, že i při rychlých stiscích nevznikají žádné záškuby ani šum, přitom nejmenší naměřené vzdálenost mezi stisky byla  $147\text{ ms}$ . A jako



**Obrázek 4.8:** Stisk tlačítka po ošetření pouze kondenzátorem.

finální ošetření bylo zvoleno připojení pull-up rezistoru  $10\text{ k}\Omega$  ke kondenzátoru a tlačítku, což sice z podstaty zapojení obrací fázi, ale v programu je to ošetřeno v přerušení, které reaguje pouze na klesající nebo vzrůstající náběžnou hranu.



**Obrázek 4.9:** Stisk tlačítka po ošetření kondenzátorem a pull-up rezistorem.

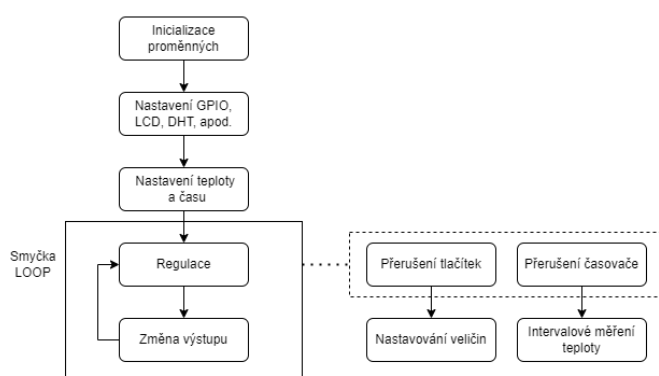
# Kapitola 5

## Softwarová část

V této kapitole budou popsány důležité části programu a jejich funkce. Program je napsán v jazyce *C++*, který je využíván např. i pro programování jednodeskového počítače Arduino. Programování je ve stylu Arduino IDE.

Program je do mikrokontroléru *ESP32* nahráván pomocí micro USB kabelu připojeného do počítače. Kód byl napsán ve vývojovém prostředí Visual Studio Code s pomocí rozšíření PlatformIO [29], pomocí kterého se obsluhuje nahrávání souborů do mikrokontroléru a zároveň se zobrazuje sériový port.

Struktura softwarové části bakalářské práce je zobrazena na obrázku 5.1



**Obrázek 5.1:** Vývojový diagram zobrazující běh programu (vytvořeno v programu Draw.io).

## ■ 5.1 Inicializace proměnných

Na začátku programu jsou načteny knihovny, které obsahují např. funkce pro obsluhu LCD displeje nebo DHT senzoru. Dále jsou vytvořeny důležité proměnné, inicializovány časovače a nastaveny parametry LCD a DHT. Knihovny nebyly nějak upravovány a všechny jsou dostupné online v Arduino seznamu knihoven. Většina je dokonce implementována rovnou a nemusí se zvlášť stahovat. Byly využity knihovny k obsluze LCD (`LiquidCrystal_I2C.h`), SD karty (`SD.h`), sběrnice SPI (`SPI.h`), senzoru teploty (`DHTesp.h`), vstupů a výstupů (`arduino.h`) a vnitřních RTC (Real Time Clock - hodiny reálného času).

## ■ 5.2 Sekce *Setup*

V sekci *Setup* se nastavují především vstupně-výstupní piny, začíná sériová komunikace, nastavují se přerušení časovačů a tlačítek. Také zde začíná komunikace s LCD, DHT senzorem a SD kartou.

## ■ 5.3 Sekce *Loop*

Sekce *Loop* neboli smyčka má hlavně návaznost na přerušení. Je to kvůli tomu, že přerušení nesmí být zbytečně dlouhé, takže dlouhé úkony jsou právě kontrolovány ve smyčce *Loop*, kde se kontroluje změna stavu dané veličiny. Takto jsou nastaveny podmínky pro stisk tlačítek a pro měření teploty pomocí alarmu časovače, který vytváří přerušení každé dvě sekundy.

## ■ 5.4 Přerušení

Přerušení je velmi důležitou částí kódu. Je to softwarový nástroj, který při daném spuštění odkloní běh normálního programu na obsluhu přerušení. Poté co krátká obsluha proběhne, přerušení vrátí běh programu zpět na místo, kde bylo předtím spuštěno přerušení. Je využíván jako řešení pro tlačítka, časovač a odpočet času. Tyto řešení jsou dále rozvedeny v dalších bodech.

### ■ 5.4.1 Tlačítka

Jako externí přerušení jsou připojeny tlačítka, jejichž obsluha přerušení čítá změnu stavu tlačítka, která je pak kontrolována v hlavní běhu programu. Tím se zajišťuje zaregistrování každého stisku.

### ■ 5.4.2 Časovač s alarmem

Dále je v *Setup* nastaven časovač, který je spuštěn na začátku programu. K němu je následně přiřazen *Alarm*, který každé dvě sekundy vybudí přerušení, které změní *bool* veličinu, díky které se v hlavní smyčce spustí podmínka. Ta zavolá funkci, která změří aktuální teplotu v komoře.

### ■ 5.4.3 Odpočet času

Jako další je implementován druhý časovač, opět s alarmem, který se spouští každých 60 s. Ten slouží pro odpočet času, který je nastavený jako čas, po který má komora udržovat danou teplotu. Aby opět přerušení netrvalo dlouho, v jeho obsluze se jen změní *bool* hodnota z *false* na *true* a v hlavní smyčce programu se jen kontroluje změna stavu. V následné podmínce se vyvolá funkce, která obnovuje displej s novým časem a aktuální teplotou.

## ■ 5.5 Uživatelské menu

Jak už bylo řečeno, cílová teplota a čas jsou nastavovány pomocí tlačítkového modulu. Jako první je na displeji dostupné menu ke zvolení teploty. Tlačítka (1) nahoru a (2) dolů je možné nastavit chtěnou teplotu. Nastavení se potvrzuje potvrzovacím tlačítkem (3). Po zvolení teploty následuje stejný postup s nastavením času. Po potvrzení zvoleného času se zobrazí nastavené hodnoty s žádostí o potvrzení. Po potvrzení začne nahřívání na cílovou teplotu, po jejímž dosažení se začne odpočítávat čas. Po celou dobu tohoto procesu je na displeji zobrazena aktuální teplota v komoře.





## Kapitola 6

### Ekonomická rozvaha

V ekonomické rozvaze (rozepsáno v tab. 6.1) jsou uvedeny všechny elektro-technické součástky a díly, které byly použity k sestavení tepelné komory. Pro nákup součástek bylo vybráno několik internetových obchodů s elektronikou jako Laskakit, Drátek, Svět součástek, TME a Výprodeje.

Celková cena za komponenty potřebné pro realizaci komory byla vyčíslena na 5035,82 Kč. V porovnání s komerčně dostupnými komorami, jejichž cena se pohybuje ve stovkách tisíců korun, je sestavená komora cenově o několik řádů levnější. Rozdílem ale mohou být dostupné funkce, přesnost regulace či rozpětí volených teplot.

**Tabulka 6.1:** Ekonomická rozvaha (seřazeno sestupně podle ceny za kus s DPH[Kč]).

Součástka	Počet	Cena/kus [Kč]	Cena celkem [Kč]
Zdroj 12 V, 20,5 A, 250 W, spínaný	1	689	689
Chladič EZK CHL40A	1	425	425
Peltierův článek TEC1-12710	2	305	610
Chladicí box 12 l	1	290	290
LCD displej 4x20 znaků	1	208	208
Mikrokontrolér ESP-WROOM-32	1	208	208
Senzor teploty <i>DHT22</i>	4	198	792
H-můstek BTS7960B 43A	1	196	196
Ventilátor velký 12 V	2	129	258
Teplovodivá páska	2	119	238
Ventilátor malý 12 V	2	89	178
I2C převodník	1	58	58
Step-down měnič 5 V	1	38	38
V7132 BLACK chladič	2	38	76
Modul pro microSD kartu	1	28	28
Hallův senzor	2	14	28
Mosfet AOD4184A	8	6,76	54,08
Svorkovnice a piny	-	-	418,14
Rezistory, tranzistory, diody	-	-	91,1
Kabely, vodiče a příslušenství	-	-	367,9
Ostatní	-	-	45,6
<b>Celkem</b>			<b>5035,82</b>



## Část III

### Výsledky práce

# Kapitola 7

## Dosažené hodnoty

V této kapitole jsou uvedena všechna měření a z nich vyplývající výsledky, jež byly změřeny po sestavení tepelné komory. Pokud není napsáno jinak, teplotní průběhy byly měřeny při okolní teplotě 21 °C. Všechny uvedené grafy byly vytvořeny v prostředí L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X pomocí balíčku *TikZ*.

### 7.1 Původní záměr

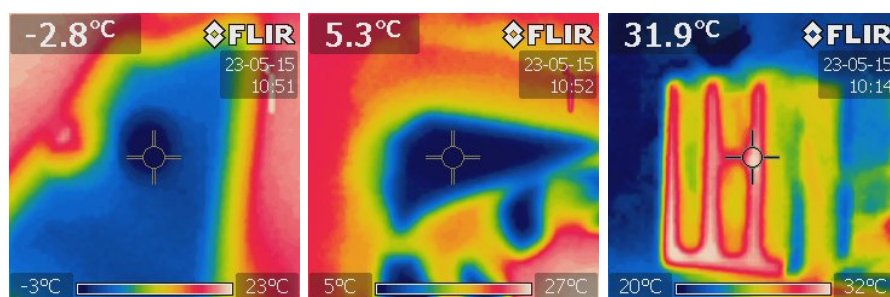
V projektu se objevilo několik překážek, které musely být překonány, buď zvolením jiné součástky nebo určitým ústupkem. Nynější Peltierovy články typu *TEC12710* neplánovaně nahradili původně zamýšlené typu *TEC12710S*, které mají téměř o pětinu menší elektrický odpor, tudíž by dle předpokladu a grafů z datasheetu odebírali větší proud, tzn. dodávali by větší tepelný výkon do komory.

Dále musel být nahrazen původní DC-DC step-down měnič, který dodává napájení 5 V do plošného spoje, ze kterého je napájen mikrokontrolér a následné moduly jako bzučák či čtečka  $\mu$ SD karet. Původně se jednalo o *Mini SMD step-down měnič 5V* [30] z internetového obchodu *laskakit.cz*. Jeho výstup po připojení na 12 V nereagoval a čip umístěný na měniči se začal přehřívat. Byl tedy pořízen lepší měnič s nastavitelným výstupem, který je popsán v kapitole 3.2.

## 7.2 Předpoklad

Napájení článků bylo navrženo tak, aby rozdíl teplot  $\Delta T$  mezi teplou a studenou stranou článku byl  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pokud bychom dle předpokladu pomocí ventilátorů a vnějšího chladiče udržovali na teplé straně článku zhruba  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pak na studené straně by se teplota článku měla rovnat zhruba nule. To se potvrdilo při měření termokamerou značky *FLIR*. Při namíření termokamery přímo na plochu článku byla naměřena nejnižší teplota  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jak je vidět na obrázku 7.1. Článek pak přenáší svou teplotu na vnitřní chladič, na kterém bylo naměřeno od  $5$  do  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  při chlazení na maximální výkon.

Z toho by se dalo usoudit, že pokud v dokonale uzavřené a odizolované komoře necháme dva chladiče vyzařovat do okolí teplotu okolo  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pak za nějakou konečnou dobu by měl nastat stav, kdy se teploty v komoře a na chladiči téměř srovnají. To se v tomto případě bohužel nepotvrdilo. Domnívám se, že důvod nedosažení nízkých teplot je špatná izolace víka, která se zahřívá díky vnějšímu chladiči. Zevnitř víka, v místě, kde je připojen chladič k Peltierovému článku, je lehce poodhalen povrch víka. Tím vzniká teplotní můstek, kdy se teplota z víka společně s chladem od vnitřního chladiče dostává do komory. To znemožňuje dosahování nízkých teplot. Zároveň to potvrzují grafy v sekci 7.4. Dle mého názoru jsou zvolené komponenty dostačující a v jiné, dostatečně izolované komoře, by nebyl problém dosáhnout nižších teplot než aktuálně naměřených.



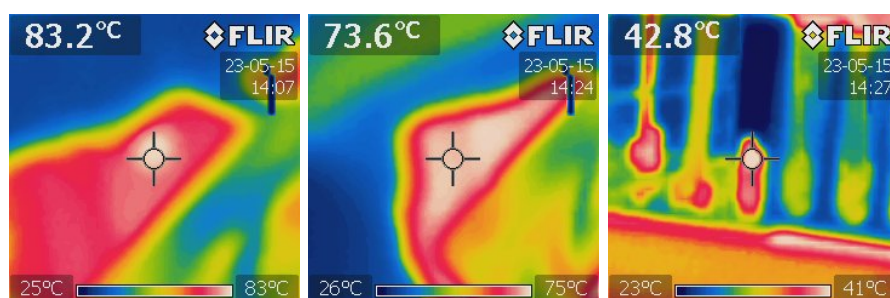
**Obrázek 7.1:** Snímky zachycené termokamerou na povrchu článku (vlevo), následně na vnitřním chladiči (uprostřed) a nejteplejší bod na vnějším chladiči (vpravo) při chlazení.

## 7.3 Nejnižší a nejvyšší dosažená teplota

Vůbec nejnižší naměřená teplota v komoře byla  $14,85\text{ }^{\circ}\text{C}$  a to při okolní teplotě  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při okolní teplotě  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla dosažena minimální teplota  $19,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

takže podobný rozdíl mezi okolní a vnitřní teplotou jako při okolní teplotě 22 °C. Rád bych se ale soustředil na nejvyšší dosaženou teplotu, kterou je 63 °C při okolní teplotě 22 °C. Ta dokonce musela být zastropována, kdy článek byl napájen třetinovým výkonem, aby na jeho teplé straně nepřesáhla teplota 90 °C. To je totiž maximální provozní teplota článku. Termokamerou byla opět hlídána teplota článku a chladiče a výsledek je zobrazen na obrázku 7.2.

Nejvyšší teplota povrchu článku se pohybovala vždy pod 85 °C, takže byla ponechána rezerva k hraniční teplotě. Také je na teplotách na povrchu článku a na vnějším chladiči vidět stále stejný teplotní rozdíl  $\Delta T$ .



**Obrázek 7.2:** Snímky zachycené termokamerou na povrchu článku (vlevo), následně na vnitřním chladiči (uprostřed) a nejteplejší bod na vnějším chladiči (vpravo) při hřání.

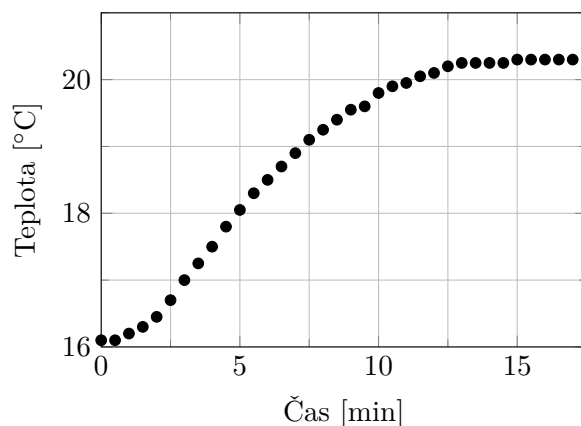
## 7.4 Uchovávání teploty v čase a rychlost dosažení teploty

O špatné izolaci svědčí i následující grafy, které zobrazují, za jak dlouhou dobu se teploty z vychlazené, resp. vyhřáté komory vyrovnají zpět na okolní teplotu.

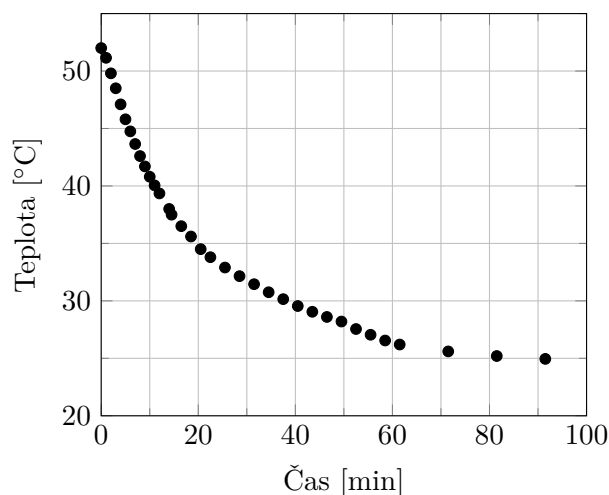
Při nachlazené komoře na 16 °C trvá okolo 16 minut, než se vrátí téměř na okolní teplotu, která v případě na obrázku 7.3 byla 21 °C.

Na obrázku 7.4 je zase vidět opačný případ, kdy z teploty 52 °C teplota klesala o dost pomaleji než v případě chlazení. Z prvních 10 uběhlých minut teplota klesla na 40,8 °C, což je o 21,5 %. Na finální měřenou hodnotu 25 °C spadla teplota za 90 minut, což je více než pětkrát delší doba než byla naměřena u nachlazené komory.

Závislost uchování vnitřní teploty na čase

**Obrázek 7.3:** Graf postupného oteplování komory bez připojeného napájení.

Závislost uchování vnitřní teploty na čase

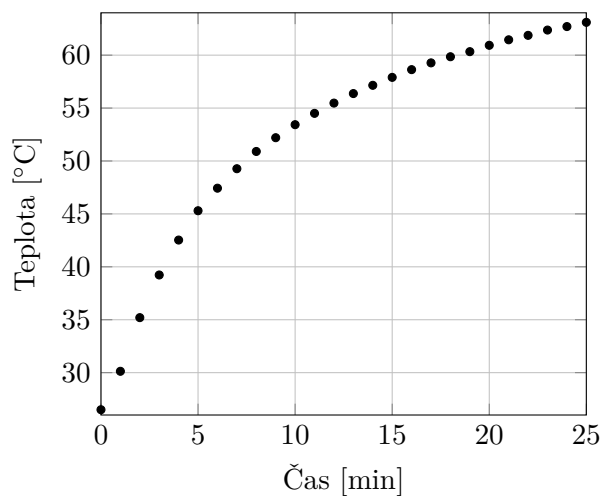
**Obrázek 7.4:** Graf postupné ochlazování komory bez připojeného napájení.

## 7.5 Reakce na skokové připojení napájení

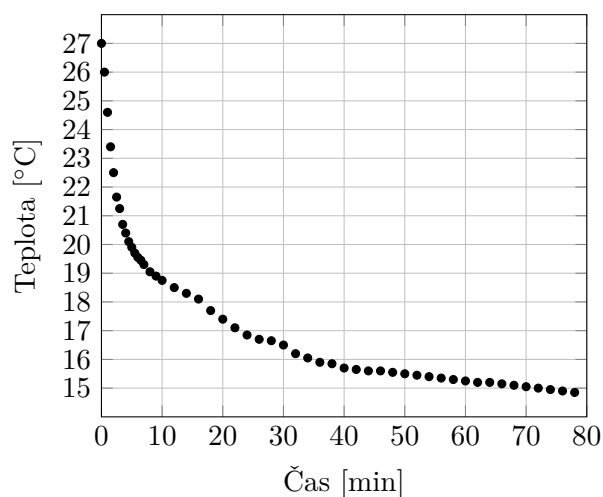
V této sekci byla měřena reakce teploty na připojení maximálního výkonu. Byl také měřen čas pro dosažení mezních hodnot komory. Při nahřívání trvalo 25 minut, než se teplota komora dostala na své maximum. Pro případ chlazení je doba ustálení na minimální teplotě téměř 80 minut. Jednotlivé průběhy jsou zobrazeny na obrázku 7.5 a 7.6.



Reakce teploty na připojení napájení - nahřívání

**Obrázek 7.5:** Graf závislosti teploty na čase po připojení napájení pro nahřívání.

Reakce teploty na připojení napájení - chlazení

**Obrázek 7.6:** Graf závislosti teploty na čase po připojení napájení pro chlazení.

## 7.6 Regulace teploty

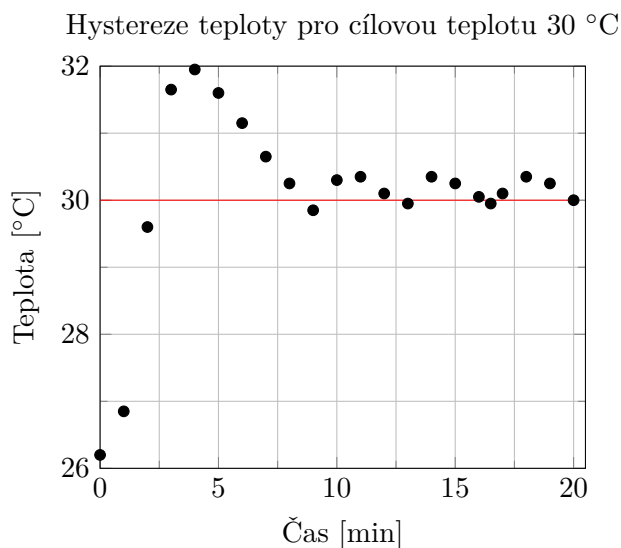
Během měření byly vyzkoušeny dva způsoby s různými nastaveními.

### 7.6.1 Ruční nastavení

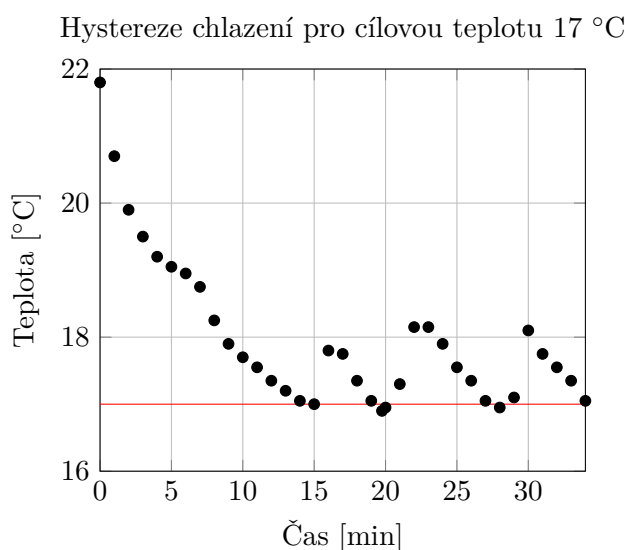
Prvním a stávajícím způsobem je řízení dodávaného výkonu do Peltierových článků pomocí podmínek a rozdílu aktuální a nastavené teploty. Při oteplování je možný výkon rozdělen pomocí podmínek do 6 kategorií podle potřeby rozdílu teplot. Pokud se rozdíl zmenšuje, bude se s ním zmenšovat i dodávaný výkon, aby zbytečně nepřesáhl hranici nastavené teploty kvůli setrvačnosti oteplování. Pro chlazení byl výkon rozdělen na 3 kategorie, protože při chlazení je setrvačnost ochlazení menší.

Průběh regulace teploty pro oteplování při nastavené cílové teplotě 30 °C je zobrazen na obrázku 7.7.

V případě chlazení byla regulace měřena pro dvě teploty a to 17 °C a 19 °C. V případě cílové teploty 19 °C se maximální odchylka od cílové teploty rovnala 0,4 °C a celý průběh teploty je zobrazen na obrázku 7.9. Při chlazení na cílovou teplotu 19 °C byla po ustálení maximální odchylka o něco větší, 1,15 °C. Tato odchylka ovšem netrvala dlouho a během minuty se zmenšila o 0,35 °C. Celý průběh regulace je zobrazen na obrázku 7.8.



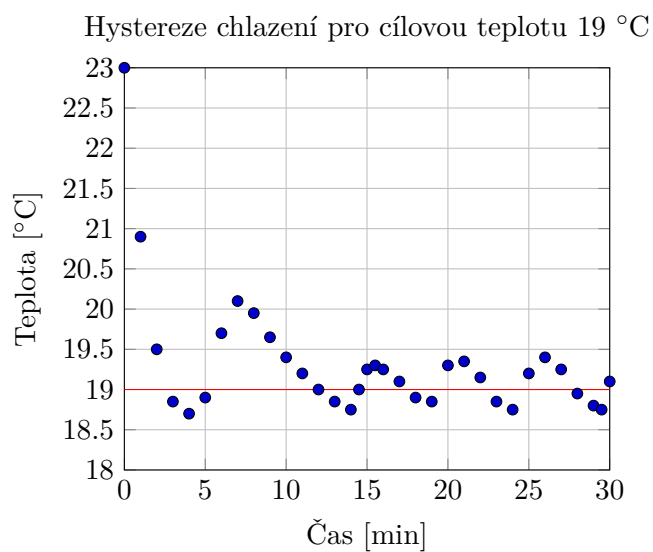
**Obrázek 7.7:** Graf závislosti teploty na čase při oteplování na cílovou teplotu 30 °C.



**Obrázek 7.8:** Graf závislosti teploty na čase při chlazení na cílovou teplotu 19 °C.

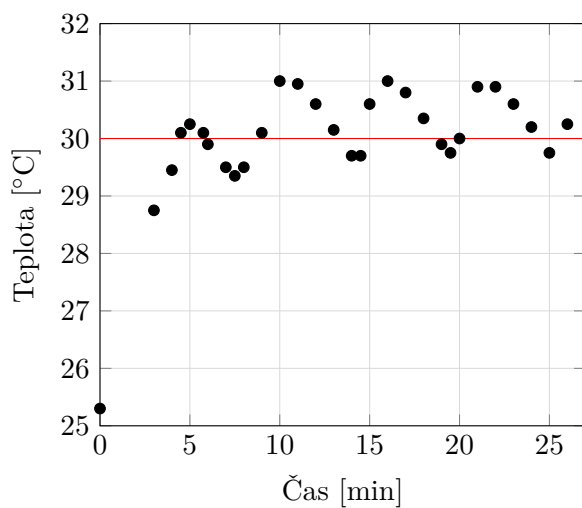
### 7.6.2 PID regulátor

Jako druhý způsob byla testována regulace pomocí PID. Ten by v ideálním případě se správnými parametry sám řídil výkon na základě teplotní odchylky. S odhadnutými parametry regulátoru, proporční složkou  $K_p = 0,1$ , integrační složkou  $K_i = 110$  a derivační složkou  $k_d = 16,96$ . Zjištění parametrů probíhalo experimentálním odhadem, který probíhal v následujících krocích. Odhad probíhal nastavením integrační složky na maximum a derivační složky na minimum, čímž byly vyřazeny z provozu. Dále se po malých přírůstcích zvětšovala proporční složka, dokud se nenašel kompromis mezi kmitáním výstupu a časovou reakcí regulátoru. Poté se začala zmenšovat integrační složka regulátoru a zvětšovat derivační složka tak, aby odezva byla co nejrychlejší a nejčistější. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo s předcházejícími parametry, kdy maximální odchylka od cílové teploty byla 1 °C, což je srovnatelné s ovládáním pomocí ručně zadaných podmínek. Problém může vznikat v setrvačnosti nahřívání a chlazení po sepnutí, protože reakce Peltierova článku je sice téměř okamžitá, ale vnitřní chladič, který by měl distribuovat teplotu do komory se nahřívá/nachlazuje s určitým zpožděním. Samotný výsledek je vidět na obrázku 7.10.



**Obrázek 7.9:** Graf závislosti teploty na čase při chlazení pro cílovou teplotu 19 °C.

Teplotní hystereze s regulací pomocí PID pro cílovou teplotu 30 °C



**Obrázek 7.10:** Ukázka regulace pomocí PID pro cílovou teplotu 30 °C.





**Část IV**

**Závěr**

## Kapitola 8

### Závěr

V bakalářské práci byla realizována tepelná komora s využitím Peltierových článků, která je řízena mikrokontrolérem.

V první části byly shrnuty důležité poznatky z technologie, která je využívána a její příklady implementace. Dále byly vybrány dva výrobci komerčně vyráběných tepelných komor, kteří využívají technologii Peltierových článků a byly uvedeny parametry jejich komor.

Následně se druhá část práce věnuje popisu použitých komponentů a zdůvodnění, které vedlo k jejich použití. Zároveň byla navržena deska plošného spoje a deska pro ovládání tlačítek. Obě desky byly navrženy, osazeny součástkami a komponenty a nainstalovány do komory. Vzhledem k velikosti komory nebyl kladen důraz na průmyslový vzhled, takže k zobrazování je použit jednoduchý LCD a k ovládání nastavení mikrospínače.

V rámci praktické části byli změřeny potřebné hodnoty jako maximální dosažitelná teplota 63 °C, minimální dosažená teplota 14,85 °C, pokles a nárůst teploty při připojení napájení nebo schopnost izolovat vnitřní teplotu. Vzhledem k prezentovaným výsledkům se izolace ukázala jako klíčová pro dosažení nízkých teplot. Nedokonalou izolaci potvrzují i výsledky měření uchování vnitřní teploty, kdy teplota v komoře stoupne z minimální teploty na okolní během zhruba za 10 minut.

Jsem ale přesvědčen, že použité komponenty byly dostačující k dosažení nižších teplot a kvůli špatné izolaci hlavně víka komory a přepážky mezi

samotnou komorou a prostorem pro elektroniku bylo znemožněno dosažení nižších teplot.

Vzhledem k průměrné dolní hranici teploty, je sestavená komora použitelná spíše pro vyšší teploty, kde i regulační odchylka od cílové teploty je nejmenší, např. 0,4 °C při cílové teplotě 30 °C.





## Bibliografie

- [1] *Termoelektrický jev*. URL: <https://www.fzu.cz/vyzkum/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev>.
- [2] *Termoelektrický jev*. 2001. URL: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD\\_jev#Seebeck%C5%AFv\\_jev](https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev#Seebeck%C5%AFv_jev).
- [3] Bc. Lukáš Fries. “Výzkum bezolovnatých pájecích slitin z pohledu termoelektrických napětí”. Dis. pr. 2019. URL: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191538](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191538).
- [4] *Encyklopedie fyziky: Thomsonův jev*. Čvn. 2022. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>.
- [5] *Peltierův článek 138W 40x40mm TEC1-127140S*. 1990-2022. URL: <https://www.gme.cz/peltieruv-clanek-tec1-12714-vigan>.
- [6] Luigi O. Freire, Luis M. Navarrete, Byron P. Corrales et al. “Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells”. In: *Energy Reports* 7 (2021). 2021 6th International Conference on Advances on Clean Energy Research, s. 355–361. ISSN: 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2021.08.099>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721007022>.
- [7] Chakib Alaoui. “TESTING AND SIMULATION OF SOLID STATE HEATING AND COOLING”. In: *International Journal of Engineering Science and Technology* 3 (2011). ISSN: 0975-5462. URL: [https://www.researchgate.net/publication/50406971\\_TESTING\\_AND\\_SIMULATION\\_OF\\_SOLID\\_STATE\\_HEATING\\_AND\\_COOLING](https://www.researchgate.net/publication/50406971_TESTING_AND_SIMULATION_OF_SOLID_STATE_HEATING_AND_COOLING).
- [8] *Temperature control units with Peltier or Compressor technology: Technology guide for laboratory use*. 2021. URL: <https://t.ly/WIc1>.
- [9] *IPC Standards*. 2022. URL: <https://www.ipc.org/ipc-standards>.

- [10] Bruce Rose. “How to Integrate a Peltier Module into a Thermal Management System”. In: (), s. 1. URL: <https://www.digikey.cz/en/articles/how-to-integrate-a-peltier-module-into-a-thermal-management-system>.
- [11] *Vysvětlení pojmu regulace*. URL: <https://www.elektrobock.cz/vysvetleni-pojmu-regulace/c117>.
- [12] Maxim Integrated®. *MAX1968EVKIT*. 2002. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/switching-regulators/MAX1968EVKIT.html/product-details/tabs-4>.
- [13] Withnell Sensors. *Peltier chambers- quiet climatic chambers from Kam-bic*. URL: <https://www.withnellsensors.co.uk/pages/products-and-services/ climatic-chambers-and-calibration-baths/peltier-chambers/>.
- [14] *Advanced Peltier Technology*. 2022. URL: <https://www.memmert.com/why-memmert/innovation-leader/heatingcooling-with-peltier/>.
- [15] *Espressif Systems - ESP32-WROOM-32: Datasheet*. URL: [https://www.laskakit.cz/user/related\\_files/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.laskakit.cz/user/related_files/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf).
- [16] *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide*. 2023. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>.
- [17] *Modul DC/DC měnič step-down 3-40V/3A*. 2023. URL: <https://www.gme.cz/v/1508321/modul-dc-dc-menic-step-down-3-40v-3a>.
- [18] *LCD displej 4x20 znaků modrý + převodník I2C LCM1602*. 2023. URL: <https://botland.cz/alfanumericke-a-graficke-displeje/2640-lcd-displej-4x20-znaku-modry-prevodnik-i2c-lcm1602-5904422331061.html>.
- [19] *Zdroj 12V 20,8A 250W spínaný SANPU EPS250-H1V12*. 2023. URL: <https://dratek.cz/arduino/120984-zdroj-12v-20-8a-250w-spinany-sanpu-ps250-h1v12.html>.
- [20] *H-mústek BTS7960B 43A, motorový modul*. 2023. URL: <https://www.laskakit.cz/h-mustek-bts7960b-43a--motorovy-modul/>.
- [21] *TEC1-12710 peltierův článek*. 2023. URL: <https://www.gme.cz/v/1482975/tec1-12710-peltieruv-clanek>.
- [22] *Thermoelectric Cooler Performance Specifications*. 2023. URL: [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/4/601-042/dsh.601-042.1.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/4/601-042/dsh.601-042.1.pdf).
- [23] *DHT22 digitální teploměr a vlhkoměr*. 2023. URL: <https://dratek.cz/arduino/1188-dht22-teplomer-a-vlhkomer-digitalni.html>.
- [24] *MicroSD Card modul SPI 3.3V*. 2023. URL: <https://www.laskakit.cz/microsd-card-modul-spi-3-3v/>.

- [25] *KiCad EDA*. URL: <https://www.kicad.org>.
- [26] *Debouncing*. 2020. URL: <https://blog.mbedded.ninja/electronics/circuit-design/debouncing/>.
- [27] *Debounce on a Pushbutton*. 2023. URL: <https://docs.arduino.cc/built-in-examples/digital/Debounce>.
- [28] *How to Implement Hardware Debounce for Switches and Relays When Software Debounce Is not Appropriate*. 2021. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/how-to-implement-hardware-debounce-for-switches-and-relays>.
- [29] *PlatformIO: https://platformio.org*. 2023. URL: <https://platformio.org>.
- [30] *Mini SMD step-down měnič 5V*. 2023. URL: <https://www.laskakit.cz/mini-smd-step-down-menic-5v/>.





## Přílohy

## Příloha A

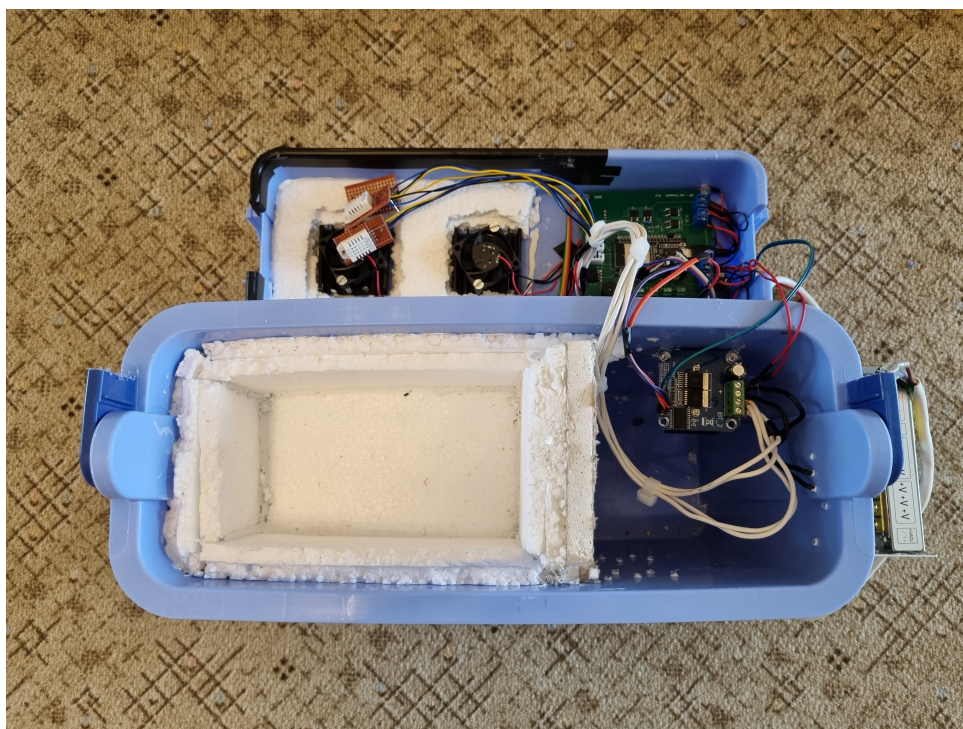
### Fotografie



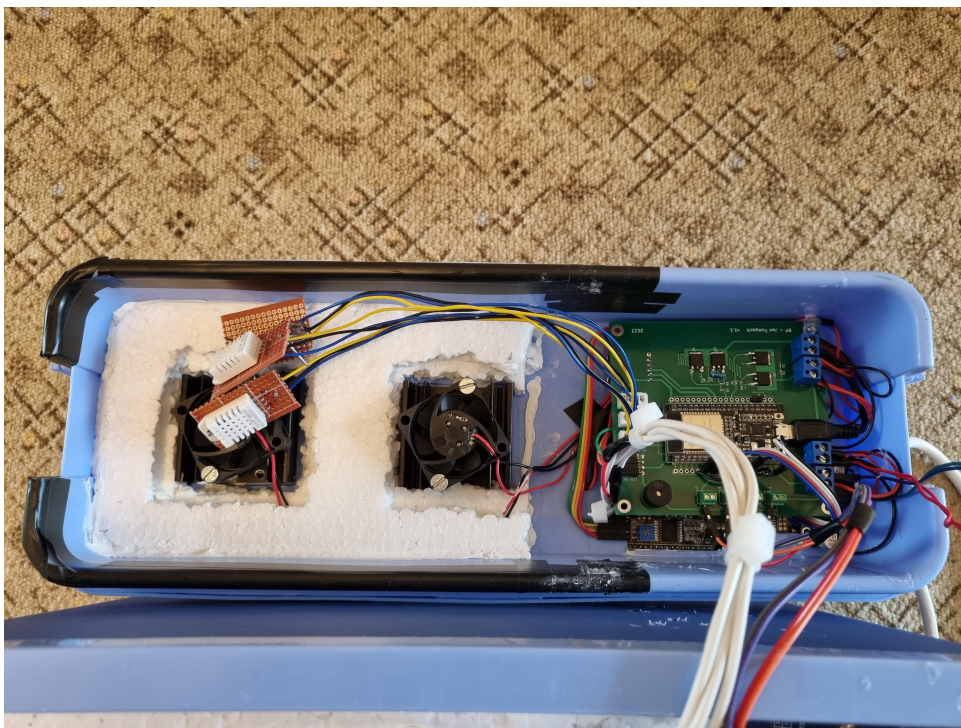
Obrázek A.1: Pohled z boku



**Obrázek A.2:** Pohled shora při zavřené komoře



**Obrázek A.3:** Pohled shora při otevřené komoře



**Obrázek A.4:** Výsledné zapojení ovládací elektroniky





Obrázek A.5: Pohled na čela komory