

České učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav přístrojové a řídicí techniky



## Konstrukce a řízení klimatické komory

Bakalářská práce

*Simon Kalombo*

Bakalářský program: Teoretický základ strojního inženýrství

Bakalářský obor: Bez oboru

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Praha, červen 2020



# Zadání



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kalombo** Jméno: **Simon** Osobní číslo: **473687**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
 Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
 Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konstrukce a řízení klimatické komory**

Název bakalářské práce anglicky:

**Construction and climatic chamber control**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Návrh a realizace mechanické konstrukce klimatické komory se zadanými parametry
- 2) Výběr a instalace vhodných senzorů vlhkosti a teploty do komory, řídicího systému a výkonové elektroniky
- 3) Naprogramování ovládacího a řídicího software
- 4) Experimentální ověření

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ezike, Chinedu & Alabi, Aderemi & Ossai, Amarachukwu & Aina, Adebayo. (2018). A Low-Cost Temperature-Controlled Chamber Fabricated for Materials Testing. Designs. 2. 25. 10.3390/designs2030025.  
 [2] The Basics of Environmental Test Chambers, online  
 <<https://www.totaltemptech.com/the-basics-of-environmental-test-chambers/>>, přístup 10.3.2020

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS**

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

\_\_\_\_\_

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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

**Vedoucí práce:**

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.  
Ústav přístrojové a řídicí techniky  
Fakulta strojní  
České vysoké učení technické v Praze  
Technická 2  
160 00 Praha 6  
Česká republika

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud bude uveden jako její spoluautor.

V Praze 2019

.....  
Simon Kalombo

# Abstract

**Abstrakt** Bakalářská práce je zaměřena na návrh a zhotovení prototypu klimatické komory pro laboratorní využití. V úvodní části se věnuje popisu všech klíčových součástí užívaných v klimatických komorách, a to zejména sensorům pro měření teploty a relativní vlhkosti a poté následnému řízení těchto fyzikálních veličin. Z pohledu konstrukce klimatické komory se tato část věnuje také vlastnostem izolačních materiálů a jejich vhodnosti pro stavbu izolačního bloku.

Druhou částí této bakalářské práce je část praktická, která se věnuje samotnému návrhu, konstrukci, naprogramování a experimentálnímu ověření prototypu klimatické komory pro laboratorní využití. Po zkonstruování byl prototyp klimatické komory experimentálně testován. Z výsledků prvních měření byl naprogramován řídicí algoritmus, který používá pro řízení teploty PID regulátor a relativní vlhkost je řízena způsobem ON/OFF. Řídicí algoritmus byl následně opět testován, kdy docházelo k jeho odladění, až do doby, kdy každé další provedené měření vykazovalo stabilní výsledky.

**Klíčová slova:** Klimatická komora, PID, Teplota, Relativní vlhkost

## Abstract

The bachelor thesis is focused on the design and fabrication of a prototype of climatic chamber for laboratory use. The first part describes all major components used in climate chambers, especially sensors for measuring temperature and relative humidity and then the subsequent control of these physical quantities. From the point of view of the construction of the climatic chamber, this part is also focused on properties of insulation materials and their suitability for the construction of an insulation block.

The second part of this bachelor thesis is the practical part, which is devoted to the design, construction, programming and experimental verification of a prototype of climate chamber for laboratory use. After construction, the prototype of climate chamber was experimentally tested. From the results of the first measurements, a control algorithm was programmed, which uses a PID controller to control the temperature and the relative humidity is controlled by the ON / OFF system. The control algorithm was then tested again and debugged, until each subsequent measurement showed stable results.

**Keywords:** Climatic chamber, Environmental chamber, PID, Temperature, Relative Humidity

# Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu a schovívavost, zejména během tvorby praktické části.

# Seznam tabulek

1.1	Teplotní součinitele jednotlivých materiálů [3]	3
1.2	Typy termočlánků [5]	4
1.3	Vlastnosti izolačních materiálů [13][14]	13
2.1	Parametry izolačního materiálu Styrodur 3000 [16]	17
2.2	Peltierův článek TEC 12715S [4]	20
2.3	zdroj sensirion	25
2.4	Porovnávací tabulka vybraných řídicích jednotek [20]	29
2.5	Výsledky měření při 25% výkonu tepelné jednotky	40
2.6	Výsledky měření při 50% výkonu tepelné jednotky	41
2.7	Výsledky měření při 75% výkonu tepelné jednotky	42
2.8	Doby náběhu a časové konstanty při měření teploty	44
2.9	Doby náběhu a časové konstanty při měření vlhkosti	48
2.10	PID měření č. 1	49
2.11	PID měření č.2	49
2.12	PID měření č.3	50
2.13	PID měření č.4	51
2.14	PID měření č.5	51
2.15	PID měření č.6	52
2.16	PID měření č.7	53
2.17	Měření kompletní	53



# Seznam obrázků

1.1	Snímač Pt100 (50-500 °C) [4]	3
1.2	Zapojení termočlánku [5]	4
1.3	Snímání teploty PN přechodem [6]	7
1.4	Schéma Kapacitního senzoru vlhkosti [8]	8
1.5	Vyhodnocovací obvod s frekvenčním výstupem [9]	9
1.6	Vyhodnocovací obvod s napěťovým výstupem a dvojitou kalibrací [9]	10
1.7	Peltierův článek - princip [10]	11
1.8	Peltierův článek [4]	11
1.9	Ultrazvukový zvlhčovač [12]	12
2.1	Původní koncept rámu z kombi profilů	15
2.2	Detail hliníkového L profilu [15]	16
2.3	Druhý (finální) koncept rámu z L profilů	16
2.4	Izolační výměnný blok	17
2.5	Izolační výměnný blok(Reálný)	17
2.6	Koncept tepelné jednotky (bez tepelného štítu a ventilátorů)	18
2.7	Tepelná jednotka v rámu	18
2.8	Odvlhčovací klapka (řez)	19
2.9	Odvlhčovací klapka (3D)	19
2.10	Mosfet Pulse width modulation (PWM) modul [17]	21
2.11	Schéma reverzačního modulu	22
2.12	Ultrazvukový zvlhčovač v nádržce	23
2.13	Modul L298N [17]	24
2.14	I2C senzor SHT85 [18]	25
2.15	Senzor SHT85 v krytu	25
2.16	I2C LCD 20x4 [17]	26
2.17	Kontrolka Harmony XB5 [19]	27
2.18	Tlačítko Harmony XB5 [19]	27
2.19	Human Machine Interface (HMI) panel	28
2.20	Arduino Mega [20]	30
2.21	ESP32 [20]	30
2.22	Raspberry Pi [20]	30
2.23	Nucleo F-144 [20]	30
2.24	Rozvaděč klimatické komory	31
2.25	Prostředí STM32CubeIDE s CubeMX	32
2.26	Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 25% výkonu	40
2.27	Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 50% výkonu	41
2.28	Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 75% výkonu	42

2.29	Přechodová charakteristika teploty při 25% výkonu . . . . .	43
2.30	Přechodová charakteristika teploty při 50% výkonu . . . . .	43
2.31	Přechodová charakteristika teploty při 75% výkonu . . . . .	44
2.32	Graf teploty a relativní vlhkosti v závislosti na čase při ohřevu při 25% P .	45
2.33	Graf teploty závislosti na čase při ohřevu při 25% P . . . . .	46
2.34	Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při vypnutém vnitřním ven- tilátoru . . . . .	47
2.35	Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při zapnutém vnitřním venti- látoru . . . . .	48
2.36	Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při otevření odvlhčovacího ventilu . . . . .	48
2.37	Měření PID regulátoru č.1 . . . . .	49
2.38	Měření PID regulátoru č.2 . . . . .	50
2.39	Měření PID regulátoru č.3 . . . . .	50
2.40	Měření PID regulátoru č.4 . . . . .	51
2.41	Měření PID regulátoru č.5 . . . . .	52
2.42	Měření PID regulátoru č.6 . . . . .	52
2.43	Měření PID regulátoru č.7 . . . . .	53
2.44	Měření kompletní . . . . .	54
2.45	Měření kompletní - výkon . . . . .	54
3.1	Klimatická komora . . . . .	56
3.2	Klimatická komora(otevřená) . . . . .	56

# Seznam zkratek

**A/D** Analog/Digital. 7

**ABS** Akrylonitrilbutadienstyren. 16

**ASA** Akrylonitrilstyrenakryl. 16, 19

**GPIO** General-purpose input/output. 32

**HMI** Human Machine Interface. ix, xii, 20, 26, 28, 31, 32

**I2C** Inter Integrated Circuit. 25, 26, 28, 29, 32, 35

**NTC** Negative temperature coefficient. 6

**PID** Proporcionalní integrační derivační. 37, 50

**PTC** Positive temperature coefficient. 6

**PWM** Pulse width modulation. ix, 21, 23, 28

**RTD** Resistance temperature detector. 2

**SD** Secure Digital. 28, 30

**USB** Universal Serial Bus. 27–29, 33, 35

**USB MSC** USB Mass storage class. 32

# Obsah

Zadání	iii
Prohlášení	v
Abstract	vi
Poděkování	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam obrázků	ix
Seznam zkratk	xi
<b>1 Teoretická část</b>	<b>1</b>
1.1 Úvod . . . . .	1
1.2 Měření teploty . . . . .	2
1.2.1 Analogový teplotní senzor . . . . .	2
1.2.2 Digitální teplotní senzor . . . . .	7
1.3 Měření relativní vlhkosti . . . . .	8
1.3.1 Kapacitní senzory relativní vlhkosti . . . . .	8
1.3.2 Odporové senzory relativní vlhkosti . . . . .	10
1.4 Řízení teploty – Peltierův článek . . . . .	11
1.5 Řízení vlhkosti – ultrazvukový zvlhčovač . . . . .	12
1.6 Izolační materiály . . . . .	12
<b>2 Praktická část</b>	<b>14</b>
2.1 Konstrukce . . . . .	14
2.1.1 Rám . . . . .	15
2.1.2 Izolace . . . . .	17
2.1.3 Tepelná jednotka . . . . .	18
2.1.4 Odvlhčovací klapka . . . . .	19
2.2 Elektronika . . . . .	20
2.2.1 Řízení teploty . . . . .	20
2.2.2 Řízení vlhkosti . . . . .	22
2.2.3 Řízení otáček ventilátorů . . . . .	23
2.2.4 Měření teploty a relativní vlhkosti . . . . .	24
2.2.5 Human Machine Interface (HMI) rozhraní . . . . .	26
2.2.6 Řídící jednotka . . . . .	28
2.2.7 Rozvaděč . . . . .	31

2.3	Firmware . . . . .	32
2.4	Experiment . . . . .	39
2.4.1	Chlazení . . . . .	39
2.4.2	Ohřev . . . . .	45
2.4.3	Vlhkost . . . . .	47
2.4.4	Regulátor . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam použitého softwaru</b>	<b>61</b>

# Kapitola 1

## Teoretická část

### 1.1 Úvod

Klimatická komora je zařízení sloužící k zajištění spolehlivosti průmyslových výrobků. Svoje hlavní využití nalézá v elektrotechnickém průmyslu, a to zejména u vystavování elektronických předmětů dlouhotrvajícímu působení enviromentálních vlivů.

Klíčovými vlastnostmi klimatických komor je udržování nastavených enviromentálních vlivů (nejčastěji teplota a vlhkost) po stanovenou dobu (staticky nebo cyklicky). [1][2]

Parametry charakterizující klimatickou komoru

- Teplotní a vlhkostní rozsah, který je komora schopna zajistit
- Přesnost měření enviromentálních vlivů
- Přesnost řízení enviromentálních vlivů
- Užitná velikost komory

Dle velikosti lze dělit na: [1][2]

- Stolní
- Samostatně stojící (ve většině případů montovány k podlaze)
- Komory s možností vstupu pracovníka
- Klimatizační místnosti

Vlivy [1][2]

- Teplota
- Vlhkost
- Nadmořská výška
- Elektrodynamické vibrace
- Elektromagnetické záření
- Cyklické korozní zkoušky
- Slané prostředí (simulace mořských podmínek)
- Déšť
- Sluneční záření (Degradace UV zářením)
- Vakuum

## 1.2 Měření teploty

Měření teploty se provádí pomocí teplotních senzorů, které mohou mít buď analogový výstup (napětí, proud, odpor) nebo digitální výstup.

### 1.2.1 Analogový teplotní senzor

Analogové senzory teploty lze rozdělit na:

- Odporové teploměry (Resistance temperature detector (RTD))
- Termočlánky
- Termistory
- Diodové teploměry

## Odporové teploměry

Princip odporových teploměrů spočívá ve změně odporu snímače s teplotou. Tuto závislost popisuje teplotní součinitel [ $\alpha K^{-1}$ ]. Materiály používané pro jejich výrobu jsou platina (Pt<sub>xxx</sub>), nikl (Ni<sub>xxx</sub>) a měď (Cu<sub>xxx</sub>).

Materiál	Teplotní součinitel [ $\alpha K^{-1}$ ]
Platina	3,92
Nikl	6,17
Měď	3,9

Tabulka 1.1: Teplotní součinitele jednotlivých materiálů [3]

### Platina

Díky svým vlastnostem se jedná o nejlépe vyhovující kov pro výrobu odporových teploměrů. Platina má velký teplotní součinitel, který je časově stabilní, tudíž je možná záměna kus za kus bez nutnosti kalibrace. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena (50-100 euro/ks). Snímače se vyskytují v několika provedeních

- Skleněný
- Keramický
- Tenkovrstvý

a také v různých hodnotách odporů

- Pt100 (odpor 100,00  $\Omega$  při teplotě 0 °C) – nejpoužívanější
- Pt1000 (odpor 1000,00  $\Omega$  při teplotě 0 °C)
- Pt50 (odpor 50,00  $\Omega$  při teplotě 0 °C)



Obrázek 1.1: Snímač Pt100 (50-500 °C) [4]



### Nikl

Jedná se o levnější kov než platina, ale je nestabilní => dosahuje meších přesností (cca  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Citlivost niklových teploměrů je však 2x větší než u platiny. Svoje využití nalézá zejména u aplikací, kde jsou menší nároky na přesnost (měření enviromentálních vlivů v domácnosti).

### Měď

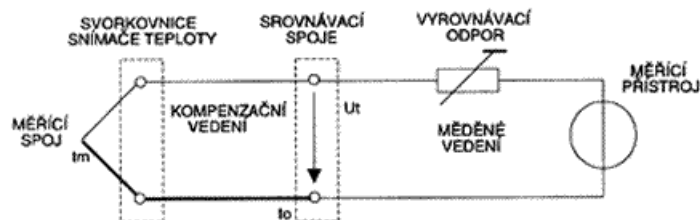
Měď je ze všech používaných kovů nejlevnější, a také má nejhorší vlastnosti. Je nestabilní a má velmi malý odpor. Používá se zejména pro měření elektrických strojů.[3]

## Termočlánky

Termočlánky využívají termoelektrického jevu pro měření teploty (při změně teploty dochází ke změně termoelektrického napětí na výstupu z termočlánku). Vnikají svařením 2 různých kovů. Tato dvojice by měla mít velký přírůstek termoelektrického napětí v závislosti na teplotě a zároveň by tento přírůstek měl být dlouhodobě stabilní. Důležitá je i odolnost vůči chemickým a mechanickým vlivům. Vstupem z termočlánku je napětí, které udává rozdíl teplot mezi teplým koncem (měřené místo) a studeným koncem (pokojoová teplota, ledová lázeň, kompenzační krabice atd.)

Typ termočlánku	Dvojice materiálů	Rozsah teplot [ $^\circ\text{C}$ ]	Citlivost [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ]
J	Železo - Konstantan	0 - 750	52,3
K	Chromel - Alumen	-200 - 1250	40,8
E	Nichrom - Konstantan	-200 - 900	42,3
T	Měď - Konstantan	-200 - 350	43

Tabulka 1.2: Typy termočlánků [5]



Obrázek 1.2: Zapojení termočlánku [5]

Horký (měřící) konec termočlánku se připojuje do svorkovnice a odtud je připojen do srovnávacího místa (studený konec) pomocí prodlužovacího (je ze stejného materiálu jako termočlánekový drát) nebo kompenzačního (z jiných materiálů – slouží pro termočlánky z drahých kovů) vedení. Tato vedení disponují stejnými termoelektrickými vlastnostmi jako

samotný termočlánek, a to až do teploty vedení 200 °C (nepředpokládá se překročení této hranice). Dále už je realizováno spojení měděnými kabely až do měřícího přístroje.

V případě kolísání teploty na studeném konci je nutné použít tepelnou kompenzaci, která se provádí buď termostatem nebo elektrickou kompenzací – pomocí kompenzační krabice.[3]

## Termistory

Termistor je polovodičová součástka, která mění svůj odpor v závislosti na teplotě, přičemž polovodiče disponují přibližně 10x větší citlivostí než kovy, ale jejich charakteristika je nelineární. Teplotní závislost odporu termistoru na teplotě je popsána rovnicí 1.1.

$$[H]Rt = A \cdot e^{B(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_0})} \quad (1.1)$$

kde

- $R_T$  [ $\Omega$ ] – odpor termistoru při teplotě  $t$
- $A$  [ $\Omega$ ] – konstanta závislá na materiálu a konstrukci čidla (udává výrobce)
- $B$  [K] – materiálová konstanta (udává výrobce)
- $T_m$  [K] – termodynamická teplota měření

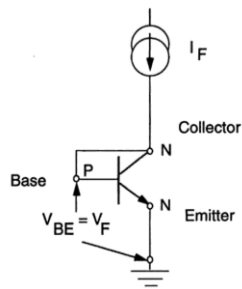
Rozlišujeme 2 typy termistorů:

- Negative temperature coefficient (NTC) – mají záporný teplotní součinitel  $\alpha$  -> odpor se vzrůstající teplotou klesá
- Positive temperature coefficient (PTC) – mají kladný teplotní součinitel  $\alpha$  -> odpor se vzrůstající teplotou roste

Pro samotné měření teploty se používají NTC termistory. PTC termistory svoje využití nalézají jako teplotní pojistky.[3]

## Diodové teploměry

Digitální teplotní snímače jsou polovodičové součástky, které pracují na principu PN přechodu, konkrétně na jeho změně napětí v závislosti na teplotě. Hlavní měřicí složkou senzoru je polovodičová dioda nebo transistor (v dnešní době více používaný). Snímač vznikne spojením kolektoru a báze bipolárního tranzistoru (dojde k vytvoření diody). Konstantní proud procházející tímto spojením vyprodukuje napětí  $V_{BE}$  (Obr. 2) mezi bází a emitorem, které je přímo úměrné absolutní teplotě. Celkový úbytek dopředného napětí má teplotní koeficient  $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ .[6]



Obrázek 1.3: Snímání teploty PN přechodem [6]

## 1.2.2 Digitální teplotní senzor

Digitální teplotní snímač není pouze senzor, ale jedná se o integrovaný obvod, který v sobě obsahuje analogový teplotní senzor a vyhodnocovací elektroniku (zesilovač, Analog/Digital (A/D) převodník, komparátor apod), tudíž ve většině případů je možné ze senzoru přímo odečítat teplotu.

Tento typ senzorů sebou přináší určité výhody:

- Výstup je většinou lineární – přímá hodnota teploty
- Levné
- Jednoduché na provoz
- Zabudované funkce (nastavení hystereze, alarm apod.)

Ale i několik nevýhod:

- Nutnost napájecího zdroje
- Pomalé
- Samy se zahřívají
- Omezená konfigurovatelnost
- Menší rozsah teplot ( $-55^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ )

Princip

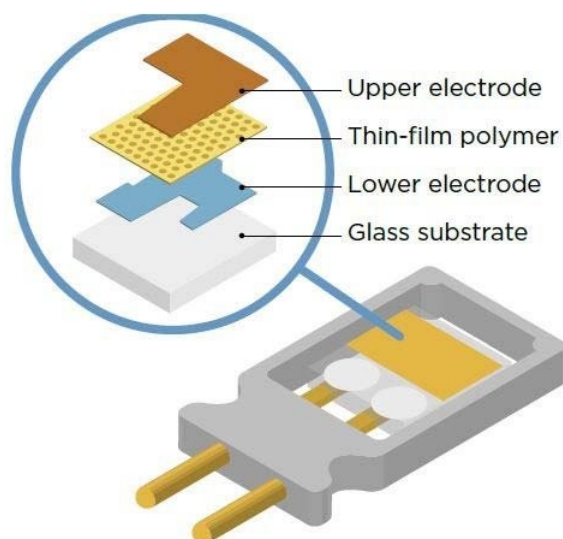
O zpracování signálu (napěťový nebo proudový) se stará Analog/Digital (A/D) převodník, což je zařízení, které převádí analogový signál na signál digitální, který je následně zpracováván. V závislosti na velikosti výstupního signálu ze senzoru (velikost napětí) může být Analog/Digital (A/D) převodník doplněn ještě zesilovačem.

## 1.3 Měření relativní vlhkosti

Pro měření vlhkosti je možné použít senzory odporové nebo kapacitní. V dnešní době jsou nejvíce používané snímače kapacitní. [6]

### 1.3.1 Kapacitní senzory relativní vlhkosti

Kapacitní snímač vlhkosti je v podstatě malý kondenzátor, který se skládá z hygroskopického dielektrika (hygroskopie je vlastnost materiálu snadno pohlcovat a udržovat vzdušnou vlhkost z okolí [7]) a dvou elektrod umístěných na skleněném, keramickém či křemičitém podkladu. Elektrody jsou ve většině případů vyrobeny z hliníku, platiny nebo chromu. Jako dielektrika v kapacitních senzorech se nejčastěji používají polymery s relativní permitivitou 2 – 15. [7] [8] [9]



Obrázek 1.4: Schéma Kapacitního senzoru vlhkosti [8]

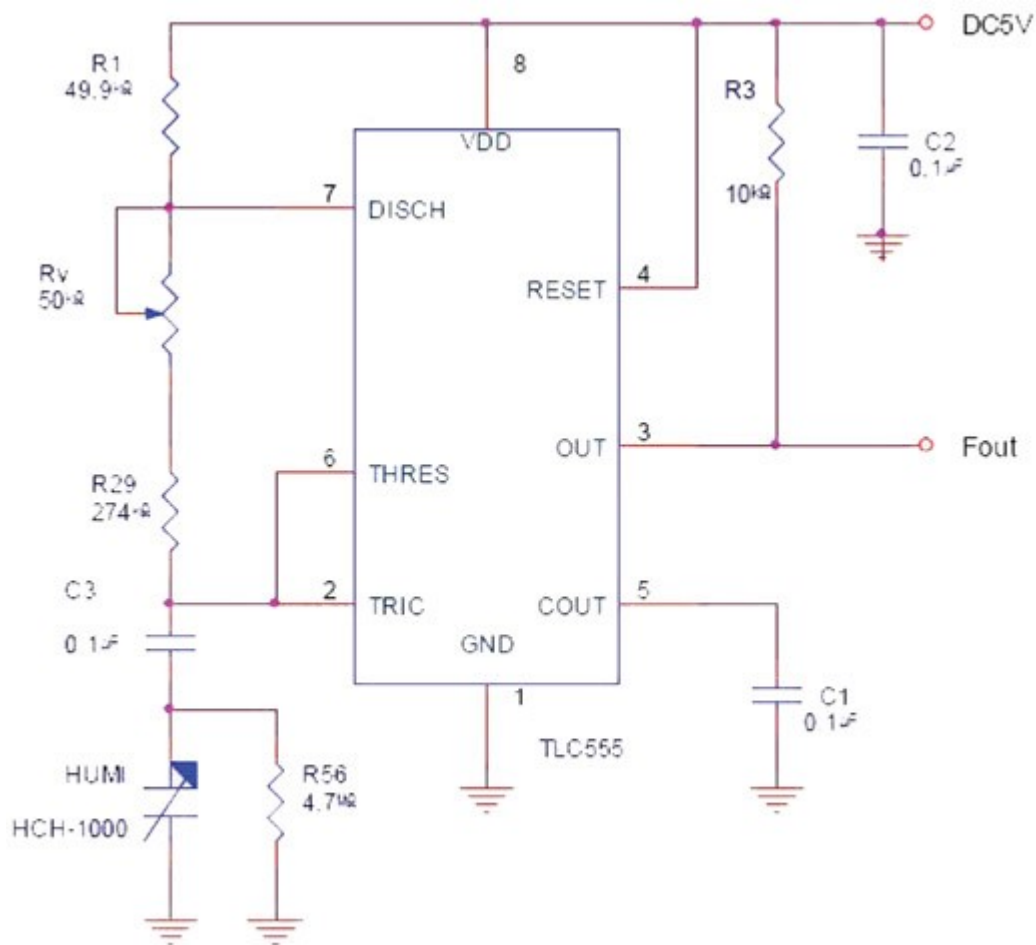
Výhody kapacitního senzoru vlhkosti:

- Výstup je lineární
- Schopnost detekce širokého rozsahu relativní vlhkosti (0-100)
- Levné
- Stabilní

Nevýhody:

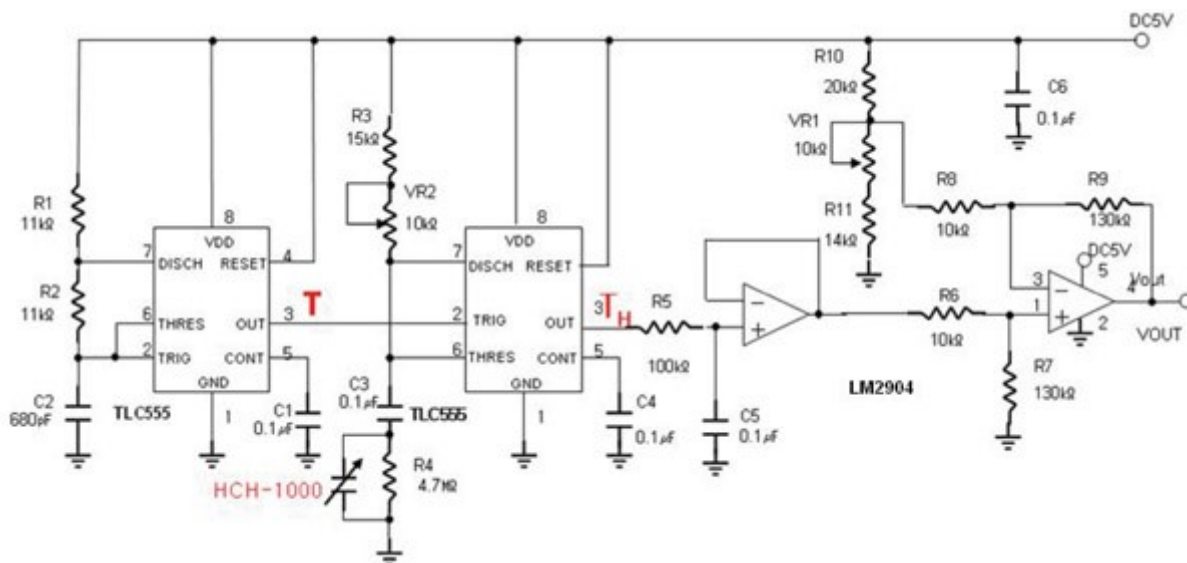
- Vzdálenost mezi senzorem a vyhodnocovací elektronikou je velmi omezená [8][9]

Princip Kapacitní senzor pracuje na principu absorpce vody ze vzdušné vlhkosti do polymerního dielektrika, což má za následek změnu jeho vlastností. Jelikož voda má při pokojové teplotě relativní permitivitu  $\epsilon_r = 80$ , což je hodnota několikanásobně větší než relativní permitivita dielektrika, tak při její absorpci do dielektrika dochází ke zvětšení hodnoty kapacity senzoru. Množství absorbované vody do dielektrika je závislé na teplotě a barometrickém tlaku v měřeném prostředí. Senzor je v podstatě variabilní kondenzátor, tudíž pro jeho vyhodnocení je nutné použít elektroniku se schopností převést změnu kapacity na napětí či frekvenci.[9]



Obrázek 1.5: Vyhodnocovací obvod s frekvenčním výstupem [9]

Na obr.1.5 je znázorněn vyhodnocovací obvod s časovačem TLC555, který při použití kapacitního senzoru vlhkosti HCH-1000 (Honeywell) dosahuje přesnosti  $\pm 3,9\%$  relativní vlhkosti.



Obrázek 1.6: Vyhodnocovací obvod s napěťovým výstupem a dvojitou kalibrací [9]

Na obr. 1.6 je znázorněn vyhodnocovací obvod s napěťovým výstupem a dvojitou kalibrací, která je prováděna variabilními rezistory VR1 a VR2. Základem obvodu jsou 2 časovače TLC555 a 2 operační zesilovače LM2904. Přesnost tohoto obvodu se senzorem HCH-1000 dosahuje  $\pm 0,5\%$  relativní vlhkosti. [9]

### 1.3.2 Odporové senzory relativní vlhkosti

Konstrukce odporového senzoru vlhkosti se skládá z nevodivého základu (keramika) na kterém jsou umístěny 2 elektrody a hygroskopický materiál, který mění svoji rezistivitu na základě absorpce vzdušné vlhkosti. Materiálem elektrod je nejčastěji ušlechtilý kov (zlato, stříbro, platina) a hygroskopická výplň senzoru je nejčastěji tvořena vodivou solí nebo polymerem. Pro ochranu senzoru se používá keramický povlak. Odporové senzory vlhkosti se napájejí střídavým napětím (u stejnosměrného napětí by docházelo k polarizaci senzoru) o frekvenci od 30 Hz do 10 kHz. [8] [9]

Výhody

- Malé rozměry
- Levné
- Dovolují velkou vzdálenost mezi senzorem a vyhodnocovacím obvodem
- Snadno záměnné bez kalibrace

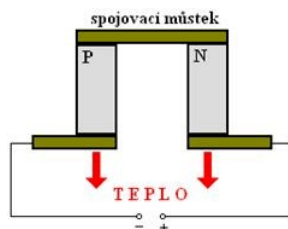
Nevýhody

- Náchylné na kontaminaci – mohou být ovlivněny výpary různých látek. [8] [9]

## 1.4 Řízení teploty – Peltierův článek

Peltierův článek je polovodičová součástka pracující na principu Peltierova jevu. Článek se skládá ze dvou polovodičových tělísek, kdy jedno je typu P a druhé typu N, které jsou spojeny spojovacím můstkem, kterým se do článku přivádí elektrická energie a zároveň dochází k odvodu (absorpci) tepla z článku do okolí.

Princip peltierova článku spočívá v PN přechodu, kdy jsou ke zdroji odváděny elektrony z polovodiče typu N a díry z polovodiče typu P. Tento jev má za následek pokles majoritních nosičů ve spojovacím můstku a tím dochází ke snižování kontaktního napětí mezi spojovacím můstkem a polovodičem. Dochází k ochlazení jednoho spojovacího můstku, zatímco druhý se ohřívá.



Obrázek 1.7: Peltierův článek - princip [10]

V praxi se peltierovy články spojují sériově do tzv. termobaterií, což má za následek dosažení vyšších teplotních rozdílů na teplé a studené straně termobaterie. Tato baterie má ještě jako izolaci z obou stran keramickou destičku.[10]

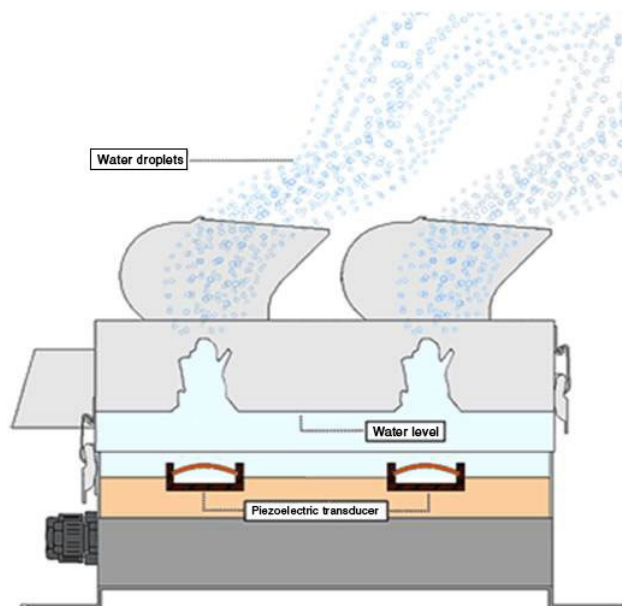


Obrázek 1.8: Peltierův článek [4]



## 1.5 Řízení vlhkosti – ultrazvukový zvlhčovač

Ultrazvukový zvlhčovač využívá piezoelektrický oscilátor, který je buzen vysokou frekvencí, což má za následek mechanické kmitání. Tento oscilátor je umístěn v nádobě s vodou. Vysokofrekvenčním kmitáním dochází k poklesu tlaku v okolí piezoelektrického oscilátoru, což má za následek vznik dutin v kapalině s následnou implozí. Vznikají mikroskopické kapičky kapaliny, které proudí vzhůru a odchází z přístroje jako aerosol. [11][12]



Obrázek 1.9: Ultrazvukový zvlhčovač [12]

## 1.6 Izolační materiály

Jelikož je nutné v klimatické komoře udržovat konstantní teplotu dlouhodobě, tak je nutné zajistit její vhodnou izolaci takovou, aby bylo docíleno co nejmenší energetické náročnosti celého zařízení => snaha minimalizovat ztráty tepla. Pokud bude izolace v přímém kontaktu s vnitřním prostředím komory, musí být zároveň odolná vůči vlivům, které budou v klimatické komoře používány (vlhkost, slaná voda, UV záření atd.). Ve většině případů se bude jednat o pěnové či extrudované polymery nebo vaty, a to díky snadné aplikaci těchto izolací a nízké hmotnosti.

### Extrudovaný polystyren (XPS)

Výroba extrudovaného polystyrenu se provádí z polystyrenového granulátu, a to extrudováním rozpínavými plyny. Vzniklá struktura má uzavřené póry, které zajišťují téměř nulovou nasákavost. Disponuje také velkou pevností v tlaku.

**Pěnový polystyren (EPS)**

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších izolací, zejména ve stavebnictví. Výroba EPS se provádí napěněním polystyrenových perlí, které mají velikost 0,63-3,15 mm. Pěnový polystyren disponuje objemovou nasákovostí při úplném ponoření do 5%.

**Pěnový polyuretan**

Pěnový polyuretan se vyskytuje ve 2 aplikačních formách. První formou jsou desky, které mohou být k dispozici jako samostatný polyuretan, nebo jako sandwich, kdy je polyuretan napěněn mezi odlišné materiály (hliníková folie, plech, skelná tkanina). Druhou formou je polyuretan litý nebo stříkaný, kdy dochází k napěnění až v místě aplikace, tudíž dochází ke kompletnímu vyplnění prostoru i u tvarově složitějších míst.

**Minerální vata**

Minerální vata je tvořena vlákny, které se vyrábějí rozvlákněním čediče, bazaltu nebo gabra za vysokých teplot v peci. Vlákna jsou ve většině případů formována do desek nebo rohoží. Její aplikace je nutná do připravených prostorů (mezer). Je nehořlavá.

**Skelná vata**

Skelná vata se používá ve formě desek nebo rolí. Skleněná vlákna, ze kterých je vyrobena, se vyrábí rozfoukáváním roztaveného skla, kdy sklo může být jak nové, tak i recyklované. Díky její nehořlavosti ji lze využít i jako požární izolaci. [13][14]

Materiál	Hustota	Součinitel tepelné vodivosti	Teplotní odolnost
Extrudovaný polystyren	30-150 $kg/m^3$	0,030 – 0,038 W/mK	80 °C
Pěnový polystyren	15-40 $kg/m^3$	0,040 W/mK	80 °C
Pěnový polyuretan	30 - 100 $kg/m^3$	0,022 – 0,075 W/mK	70 °C
Minerální vata	30-100 $kg/m^3$	0,035-0,045 W/mK	1000 °C
Skelná vata	15-35 $kg/m^3$	0,03-0,045 W/mK	550 °C

Tabulka 1.3: Vlastnosti izolačních materiálů [13][14]

# Kapitola 2

## Praktická část

V rámci praktické části jsem se seznámil s konstrukcí klimatických komor a zejména využití 3D tisku v prostředí s trvale vyšší teplotou. Dále jsem se zdokonalil v návrhu plošných spojů v softwaru KiCad a i v jejich samotné výrobě a osazování. Nejvíce znalostí jsem nabyl ohledně programování embeded systémů, konkrétně STM32 v jazyce C s použitím softwaru STM32CubeIDE. Cílem praktické části bylo navrhnout, zkonstruovat a uvést do provozu klimatickou komoru s možností řízení teploty a vlhkosti a následně vše experimentálně ověřit.

### 2.1 Konstrukce

Pro vhodný návrh a konstrukci klimatické komory bylo nutné stanovit si základní požadavky, pracovní prostředí a následné využití zařízení

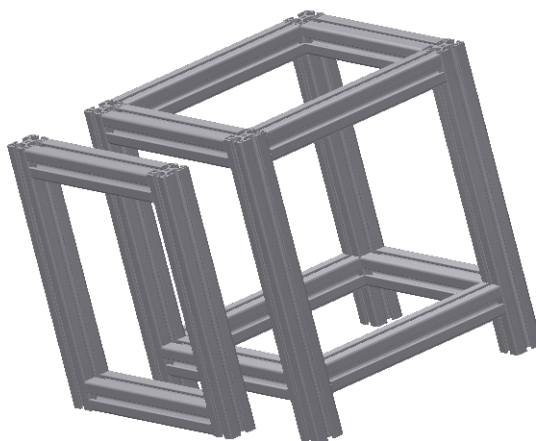
Požadavky na konstrukci:

- Odolná konstrukce
- Dobrá tepelná izolace
- Objem okolo 15 l
- Nízká pořizovací cena
- Snadná obsluha/manipulace
- Snadná výroba

### 2.1.1 Rám

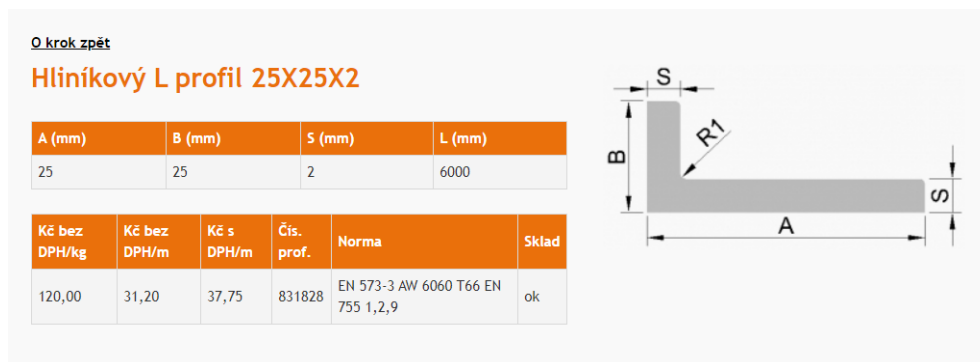
Původní návrh rámu klimatické komory byl navrhnout z hliníkových kombi profilů 30x30 mm (viz. obrázek 2.1). Tento koncept vyhovoval svojí odolností, snadnou výrobou a montáží, jelikož pro kombi systémy je na trhu dostupné nepřeberné množství příslušenství (spojky, panty, madla atd.).

Značnou nevýhodou tohoto rámu byla jeho pořizovací cena, která se pohybovala okolo 1000 Kč, což není příliš vysoká částka, ale bylo zřejmé, že lze najít levnější řešení. Druhým hlavním problémem byla zástavba izolace do tohoto rámu, která by díky masivnosti kombi profilů velmi zmenšila využitelný prostor, nebo by naopak bylo nutné rám zvětšovat.



Obrázek 2.1: Původní koncept rámu z kombi profilů

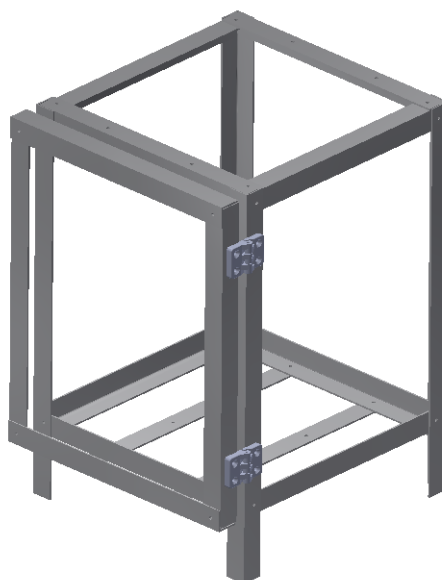
Druhý návrh vycházel ze všech chyb a poznatků získaných při návrhu prvního konceptu. Namísto masivních kombi profilů 30x30 mm byly použity hliníkové L profily 25x25x2 mm. Ačkoliv disponují menší pevností, tak mají nespočet výhod oproti původnímu návrhu. V první řadě je to pořizovací cena, kdy kombi profil stojí 130 Kč/m bez DPH a L profil 31 Kč/m bez DPH [15]. Cenu rámu bylo tedy možné několikanásobně snížit. Další výhodou tohoto řešení byl tvar L profilu, jelikož bylo možné izolaci zasadit přímo do profilu a tím se zvětšil vnitřní využitelný prostor, aniž by došlo k nárůstu vnějších rozměrů.



Obrázek 2.2: Detail hliníkového L profilu [15]

Na samotný rám, včetně dveří, bylo použito 6 metrů výše zmíněného profilu. Jednotlivé profily jsou spojeny pomocí šroubových spojů, ačkoliv původní záměr byl nýtování, které bylo zahrnuto z důvodu nerozebíratelnosti (např. při servisu a výměně dílů) a větším nárokům na přesnost předvrtaných otvorů, která je při takovém počtu dílů a dílenském vybavení špatně dosažitelná.

Dveře jsou k rámu připojeny pomocí dvoudílných pantů, které byly zhotoveny na 3D tiskárně z materiálu Akrylonitrilstyrenakryl (ASA), který je na rozdíl od Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) snadněji tisknutelný a téměř stejně pevný.



Obrázek 2.3: Druhý (finální) koncept rámu z L profilů

Ve spodní části jsou přišroubovány 2 držáky, které slouží k uchycení tepelné jednotky, což zajišťuje její snadnou výměnu, či vyjmutí pro opravu v případě poruchy.

### 2.1.2 Izolace

Při výběru izolace bylo nutné brát zřetel na podmínky, které budou v klimatické komoře při provozu. Prvním zásadním vlivem je provozní teplota, jejíž teoretická maximální hodnota je dána teplotní odolností izolace. Druhou podmínkou ovlivňující výběr izolace je relativní vlhkost, která by se měla v komoře pohybovat v rozmezí 0 – 100% (teoreticky).

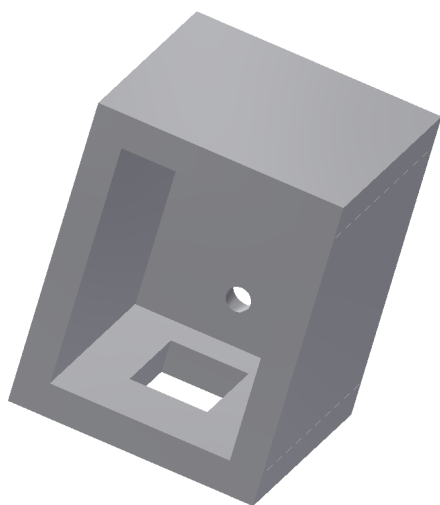
Po prozkoumání dostupných izolací na trhu padla volba na polystyren, konkrétně na jeho extrudovanou verzi s názvem Styrodur 3000.

Tepelná vodivost $\lambda_D$	0,033 $Wm_{-1}K_{-1}$
Tepelný odpor RD	1,2 $m^2\Delta K\Delta W_{-1}$
Pevnost v tlaku	300 kPa

Tabulka 2.1: Parametry izolačního materiálu Styrodur 3000 [16]

Styrodur 3000 je kromě svých izolačních vlastností i dobře opracovatelný, konkrétně je možné ho jednoduše řezat a broušením dokončit požadovaný tvar.

Při konstrukci izolace klimatické komory bylo bráno v potaz její možné poničení. Izolaci je tedy možné po odstranění horní části rámu vyndat jako celek a vyměnit za nový kus. Samotný izolační blok je tvořen z desek, které jsou k sobě slepeny montážním lepidlem Roxolid Uni-Fix 180. Blok má celkem 4 otvory. První je v jeho čelní části a jedná se o otvor vstupní, který slouží pro vkládání předmětů do komory. Další otvor se nachází na zadní části bloku, který slouží pro odvlhčovací mechanismus (bude blíže specifikováno v kapitole elektronika). Třetí otvor se nachází ve spodní části bloku a jedná se o otvor pro tepelnou jednotku. Poslední otvor se nachází v zadní části a jedná se o otvor pro senzor.



Obrázek 2.4: Izolační výměnný blok



Obrázek 2.5: Izolační výměnný blok (Reálný)

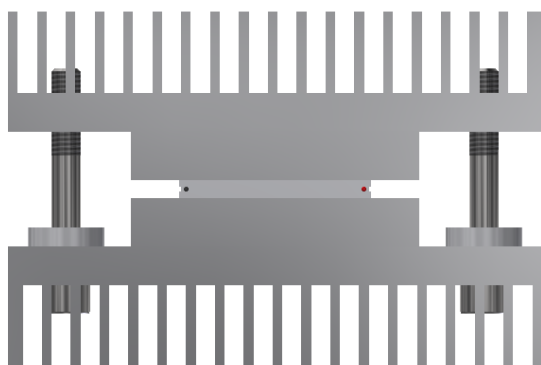
### 2.1.3 Tepelná jednotka

Jelikož byl jako topný/chladicí element vybrán Peltierův článek (blíže v kapitole Elektronika), bylo nutné zkonstruovat jednotku, do které bude Peltierův článek vložen a zajistí jeho správnou funkci

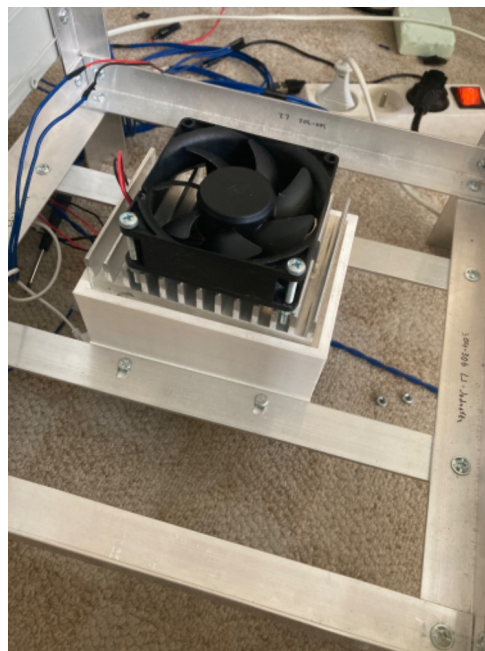
Požadavky na jednotku:

- Dostatečný odvod tepla z teplé a studené strany
- Rovnoměrná distribuce tepla v pracovním prostoru komory
- Jednoduché a kompaktní řešení - jednoduché na výrobu

Tepelná jednotka je zkonstruována ze 2 hliníkových chladičů, kdy na každý je přišroubován mezičlen, který slouží pro zvětšení mezery mezi jednotlivými chladiči. Mezi tyto dvě části je instalován Peltierův článek a celá jednotka je spojena pomocí dvou šroubů. Všechny kontaktní plochy byly kvůli lepšímu přenosu tepla leštěny a opatřeny vrstvou teplovodivé pasty.



Obrázek 2.6: Koncept tepelné jednotky (bez tepelného štítu a ventilátorů)



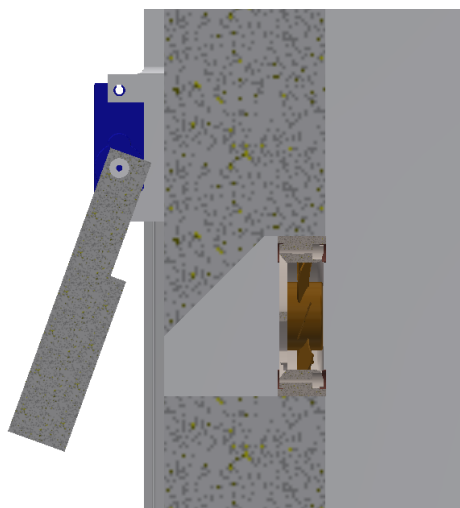
Obrázek 2.7: Tepelná jednotka v rámu

O distribuci tepla z jednotky do prostoru klimatické komory se stará 12 V ventilátor, kterému je možné regulovat otáčky (více v sekci Elektronika). Stejně vlastnosti má i druhý ventilátor jednotky, který se stará o odvod tepla z vnější strany jednotky do okolí.

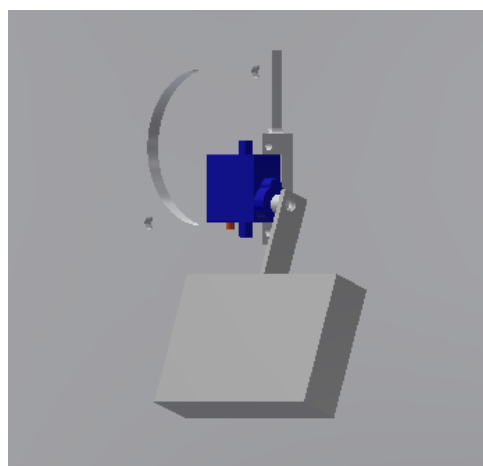
Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění izolace od tepelné jednotky, je jednotky zasazena do tepelného štítu z termoplastu Akrylonitrilstyrenakryl (ASA), který disponuje větší tepelnou odolností, než Styrodur 3000. Štít zároveň slouží pro upevnění jednotky k rámu pomocí šroubů. Tato montáž zajišťuje snadné vyjmout jednotky při poruše, či výměně.

### 2.1.4 Odvlhčovací klapka

Pro potřebu odstranění převlhčeného vzduchu z klimatické komory bylo nutné navrhnout klapku, která zajistí dostatečné otevření pro vyfouknutí a zároveň bude dostatečně tepelně izolována, aby nedocházelo k úniku tepla a tím k razantnějšímu poklesu teploty. Základem klapky je blok zhotoven z identického materiálu jako izolace klimatické komory, tedy z extrudovaného polystyrenu Styrodur 3000. Chod klapky zajišťuje servomotor SG90, které je umístěn na držáku na zadní straně izolačního bloku. Pohybem serva dochází k otevírání ventilu. Při otevření klapy dojde k sepnutí ventilátoru o rozměrech 40x40 mm, který urychlí proces snížení hodnoty relativní vlhkosti.



Obrázek 2.8: Odvlhčovací klapka (řez)



Obrázek 2.9: Odvlhčovací klapka (3D)



## 2.2 Elektronika

Pro prvotní návrh řídicí elektroniky bylo nutné vytvořit seznam všech funkcí, které bude elektronika řídit. Byl tedy sestaven seznam potřebných vstupů a výstupů na základě kterého bylo možné určit potřebné komponenty

Výstupy:

- Topný/chladicí element (výkon + chlazení/ohřev)
- Zvlhčovač
- Ventilátory – řízení otáček
- Human Machine Interface (HMI) rozhraní – kontrolky, display
- Odvlhčovací klapka

Vstupy:

- Senzor vlhkosti
- Senzor teploty
- Human Machine Interface (HMI) rozhraní – ovládací prvky (tlačítka, rotační enkoder)

### 2.2.1 Řízení teploty

Jelikož je nutné teplotu v komoře zvyšovat i snižovat (dle nastavené teploty uživatelem), tak bylo nutné zvolit tepelný element, který by v nejlepším případě dokázal splnit obě funkce. Proto byl zvolen Peltierův polovodičový článek TEC1-127150S.

Maximální vstupní napětí	16.4 V
Maximální vstupní proud	15 A
Maximální tepelný výkon	141 W
Maximální teplota	90 °C
Maximální rozdíl teplot stran	75 °C
Rozměr	40x40 mm

Tabulka 2.2: Peltierův článek TEC 12715S [4]

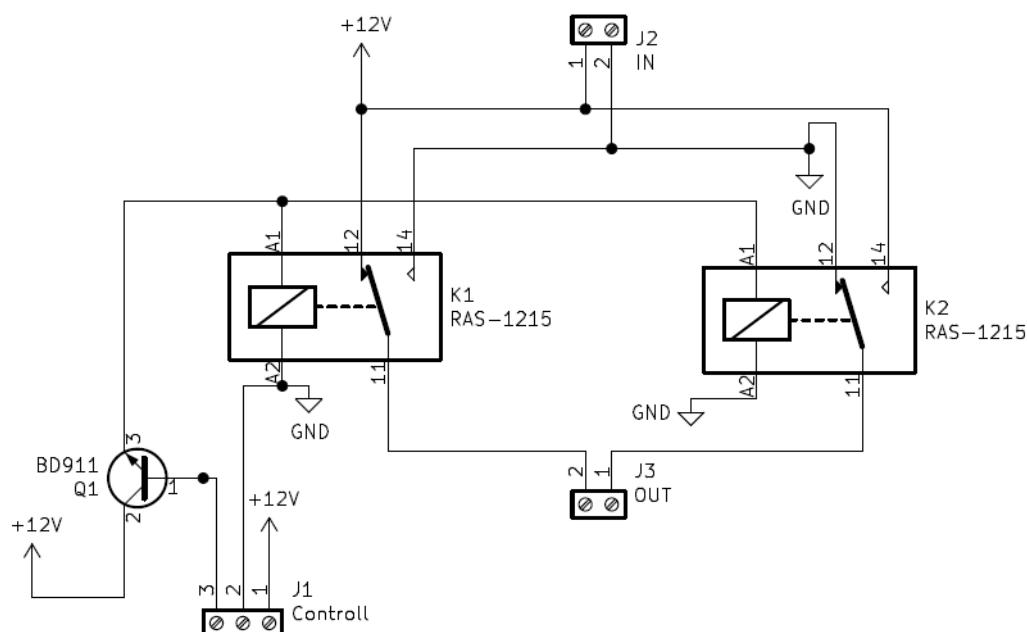
Aby bylo dosaženo větší efektivity tepelné jednotky, jejíž je peltierův článek hlavní součástí, tak bylo nutné navrhnout způsob, kterým regulovat výkon peltierova článku. Nejlépe se pro tuto funkci, s dobrou návazností na řízení, hodí regulace výkonu pomocí

transistoru, konkrétně byl použit modul s mosfet transistorem (viz. obrázek 2.10 , který je možný řídit pomocí Pulse width modulation (PWM). Modul je možné provozovat v intervalu napětí 0-24 V až do proudu o velikosti 25 A [17] Toto řešení zajišťuje plynulou regulaci výkonu, ale nezajišťuje však možnost změny polarity peltierova článku, která je nutná pro přechod z chladícího modu na topný a naopak.



Obrázek 2.10: Mosfet Pulse width modulation (PWM) modul [17]

Pro reverzaci je použit modul, který je sestaven ze 2 rele RAS1215, které jsou schopné přenášet proud o velikosti 15 A a jednoho bipolárního transistrou BD711, který slouží jako spínač pro cívky obou relé, které jsou spínány na 12 V a signál z řídicí jednotky má napětí 3.3V. Celý modul je zapojen dle schématu zobrazeném na obrázku 2.11 a je osazen na univerzálním plošném spoji, kdy jsou jednotlivé cesty spojeny pomocí vodičů. Tento způsob řešení byl zvolen kvůli vysokému proudovému zatížení až 15 A. Zároveň je toto řešení jednoduše vyrobitelné.

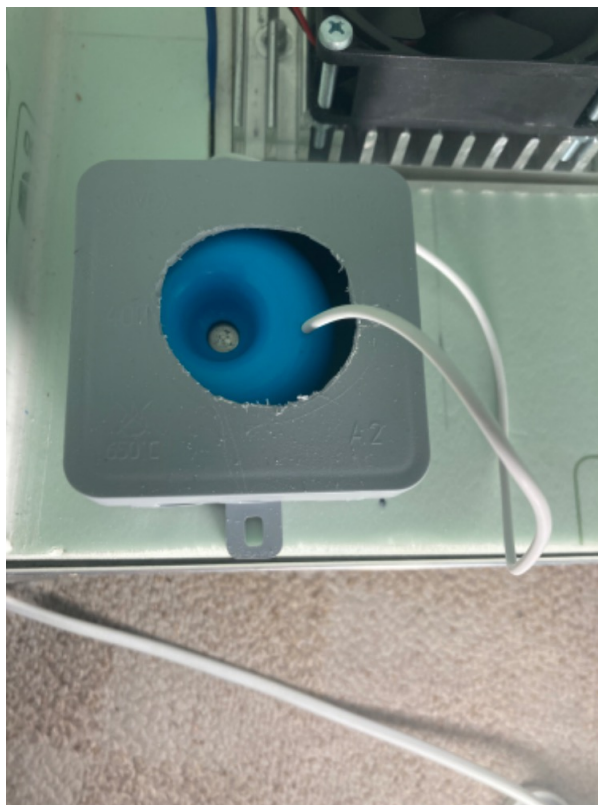


Obrázek 2.11: Schéma reverzačního modulu

## 2.2.2 Řízení vlhkosti

U řízení vlhkosti bylo nutné zvažovat 2 problémy. Prvním problémem je zvýšení relativní vlhkosti ve vnitřním prostoru klimatické komory a druhým problémem je naopak snížení relativní vlhkosti v komoře. Tyto 2 zmíněné problémy jsou řešeny pomocí 2 zařízení

Prvním zařízením je ultrazvukový zvlhčovač, který slouží pro zvyšování relativní vlhkosti. Jedná se o plovák obsahující piezoelektrický oscilátor, který je umístěn na hladinu nádrže s vodou. Jeho řízení je prováděno metodou ON/OFF (více v kapitole Firmware). Druhým zařízením je klapka, která se v případě překročení nastavené hodnoty relativní vlhkosti otevře a pomocí ventilátoru vyfoukne část vzduchu z klimatické komory a tím dojde ke snížení hodnoty relativní vlhkosti. Jelikož je klapka ovládána pomocí servomotoru (viz. obrázek 2.8), tak je možné její otevření řídit plynule pomocí PWM signálu z řídicí jednotky o frekvenci 50Hz.



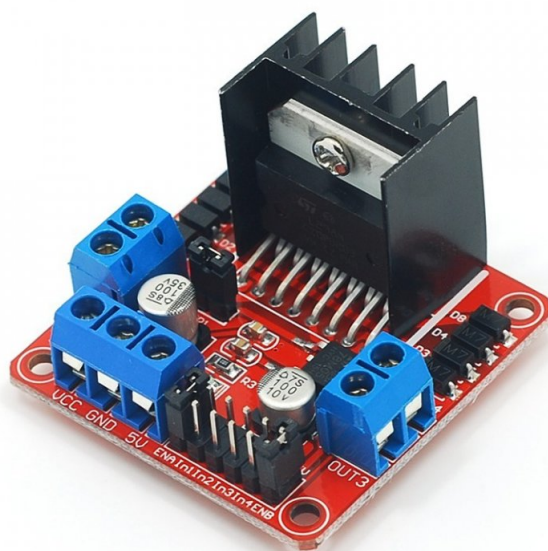
Obrázek 2.12: Ultrazvukový zvlhčovač v nádržce

### 2.2.3 Řízení otáček ventilátorů

V klimatické komoře se nachází celkem čtyři 12 V ventilátory. Dva ventilátory o rozměrech 80x80 mm jsou umístěny na tepelné jednotce, kdy jeden je na vnitřní straně a druhý na vnější.

Jelikož bylo nutné řídit otáčky ventilátorů elektronicky, tak bylo nutné zvolit také řízení pomocí transistorů. Na rozdíl od peltierova článku nemají ventilátory velký proudový odběr (proudový odběr ventilátorů se pohybuje v desítkách až stovkách mA), tak nebylo nutné používat mosfet transistory, ale vystačí pouze obyčejné bipolární NPN transistory.

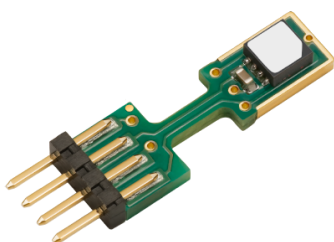
Pro potřeby této aplikace byl zvolen modul s plným H můstkem L298N, který umožňuje řízení dvou 12V ventilátorů nezávisle na sobě. Řízení otáček je zajištěno pomocí Pulse width modulation (PWM) signálu z řídicí jednotky.



Obrázek 2.13: Modul L298N [17]

## 2.2.4 Měření teploty a relativní vlhkosti

Pro měření požadovaných veličin byl zvolen senzor SHT85 od firmy Sensirion, který dokáže měřit jak teplotu, tak i relativní vlhkost zároveň. SHT85 patří k nejlepším sensorům ve své kategorii a disponuje spoustou užitečných funkcí, například kompenzace samozahřívání a krytí IP67.



Obrázek 2.14: I2C senzor SHT85 [18]



Obrázek 2.15: Senzor SHT85 v krytu

Senzor je osazen na plošném spoji (viz.obrázek 2.14), což zaručuje jeho snadnou výměnu v případě poruchy.

Vlhkost-rozsah	0-100 % RH
Vlhkost-přesnost	$\pm 1.5\%$ RH
Teplota-rozsah	-40-105 °C
Teplota-přesnost (20°C - 50°C)	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Napájecí napětí	2.15-5.5V
Proudový odběr (maximální)	0,6-1,5 mA

Tabulka 2.3: zdroj sensirion

Komunikace mezi senzorem a řídicí jednotkou probíhá pomocí protokolu Inter Integrated Circuit (I2C), který pro komunikaci potřebuje pouze 2 vodiče (více v kapitole Firmware). Na tyto 2 vodiče je nutné přidat pull-up rezistory o hodnotě 1-10kohm, což je požadavkem I2C protokolu.

Senzor je uvnitř komory umístěn v ochranném krytu, který ho chrání před mechanickým poškozením při obsluze komory.

### 2.2.5 Human Machine Interface (HMI) rozhraní

Pro snadnou obsluhu klimatické komory bylo nutné navrhnout jednoduchý uživatelský panel, který bude zobrazovat informace o průběhu procesu v komoře a zároveň bude přes něj možno jednoduše nastavit parametry procesu v klimatické komoře.

Jako zobrazovač je použit LCD displej s rozlišením 20x4 znaků, který je pro tuto aplikaci naprosto dostatečný. Tento displej komunikuje s řídicí jednotkou pomocí protokolu Inter Integrated Circuit (I2C). Při běhu procesu je na displeji zobrazena aktuální vlhkost, teplota a zbývající čas do ukončení procesu.



Obrázek 2.16: I2C LCD 20x4 [17]

Pro obsluhu komory jsou na HMI panelu umístěny celkem 4 ovládací prvky. Prvním je rotační enkodér, který slouží k nastavení požadované hodnoty teploty a relativní vlhkosti. Dále se jedná o 2 tlačítka, která plní funkci start a stop procesu. Posledním prvkem je přepínač, který slouží pro přepínání mezi modelem pro nastavení parametrů a modelem běhu procesu. Pokud je přepínač v poloze běhu procesu, tak není možné nastavovat parametry, ale lze proces zastavit či spustit pomocí stop tlačítka, resp. start tlačítka. Všechna tlačítka

a přepínač jsou od firmy Schneider electric řady Harmony XB5 se spínacím blokem s označením ZBE-101 (viz obrázek 2.18).



Obrázek 2.17: Kontrolka Harmony XB5 [19]



Obrázek 2.18: Tlačítko Harmony XB5 [19]

Pro signalizaci jsou na HMI panelu ještě 3 kontrolky. Zelená svítí, pokud je proces v běhu. Červená kontrolka signalizuje zapnutí klimatické komory a pokud bliká, tak signalizuje otevřené dveře komory, nebo chybu v procesu (více v kap. Firmware). Poslední kontrolkou je kontrolka oranžová, která svým sepnutím signalizuje přítomnost Universal Serial Bus (USB) flash disku pro sběr dat. Všechny kontrolky jsou stejně jako tlačítka od firmy Schneider electric řady Harmony XB5 (viz obrázek 2.17). Jelikož jsou kontrolky od výroby navrženy na 24V, tak bylo nutné upravit elektroniku na 3.3V. Tato úprava spočívá v odstranění všech komponent z elektroniky kontrolky (usměrňovací můstek a cívka), kromě led diody a kondenzátoru. Led dioda byla následně propojena přes rezistor o hodnotě 330 ohm přímo na kontakt kontrolky.

Samotné tělo uživatelského panelu je zhotoveno pomocí 3D tisku z materiálu PLA, který je pro tuto mechanicky nenamáhanou součást dostačující. Panel se skládá celkem ze 3 dílů. Prvním je přední panel, do kterého jsou umístěny všechny prvky, druhým je rámeček a třetím je zadní víko. První dva díly jsou k sobě slepeny a třetí díl je přišroubován. V těle je umístěna svorkovnice, která sdružuje všechny prvky do kabelu, který je osazen konektorem Cannon dsub-15, což zaručuje jednoduché odpojení v případě potřeby.





Obrázek 2.19: Human Machine Interface (HMI) panel

### 2.2.6 Řídící jednotka

Poté, co byly známy všechny ovládané prvky a periférie, tak bylo možné navrhnout vhodnou řídicí jednotku na základě několika požadavků:

- Pulse width modulation (PWM) výstupy
- Dostatečný počet digitálních vstupů a výstupů
- Inter Integrated Circuit (I2C)
- Uživatelsky přístupné Universal Serial Bus (USB) nebo možnost doplnění Secure Digital (SD) karty pro logování
- Dostatečná paměť a výpočetní výkon

Na základě těchto požadavků bylo možné provést průzkum na trhu, ze kterého vzešlo několik kandidátů, které byly následně porovnány mezi sebou.

	Arduino Mega	Nucleo-144	ESP32	Raspberry Pi 4
Procesor	Atmega2560	STM32	ESP32-D0WDQ6	Broadcom BCM2711
Architektura	8-bit	32-bit	32-bit	64-bit
Frekvence	16 MHz	216 MHz	40 MHz	1,5 GHz
Paměť	256 KB	1000 KB	4000 KB	4 GB
USB/SD	Ne-SD modul	USB-OTG	SD	USB-OTG
Digital I/O	54	Ano	Ano	Ano
I2C	1x	4x	1x	1x
Ethernet/Wi-fi	Ne-modul	Ethernet	Wi-fi	Ethernet+Wi-fi
Cena (bez DPH)	1 138 Kč	592 Kč	453 Kč	1 325 Kč

Tabulka 2.4: Porovnávací tabulka vybraných řídicích jednotek [20]

Prvním kandidátem je Arduino Mega (obr. 2.20), což je jedna z nejpoužívanějších platform pro vývoj prototypů. Mezi jeho výhody patří snadné programování v jazyce Wiring a jednoduchá obsluha. Za nevýhodu může být považována 8-bitová architektura, která je více náchylnější na dobré odladění programu, což je jedna z hlavních nevýhod Arduina Mega, které se občas chová nepředvídatelně v případech, když uživatelem vytvořený program zabírá téměř celou paměť, která není velká. Toto může být problém při používání několika vstupních a výstupních periférií a zároveň zavedení složitěho algoritmu řízení teploty. Zároveň cena je enormně vysoká oproti několikanásobně lepší konkurenci. Arduino Mega bylo tedy zavrhnuto.

Dalším kandidátem je řada mikrokontrolérů od firmy ST pod označením Nucleo-144. Jedná se v podstatě o vývojové desky osazené procesory STM32, které jsou postavené na 32-bitové architektuře. Tyto mikrokontroléry nabývají v současné době na popularitě, což znamená snažší cestu v případě řešení potenciálních problémů při vývoji programu. Na rozdíl od ostatních řídicích jednotek zmíněných v tabulce 2.4 disponuje čtyřmi separátními Inter Integrated Circuit (I2C) linkami, což je pro tuto aplikaci výhodou, i přes to, že Inter Integrated Circuit (I2C) protokol dokáže pojmout velké množství zařízení na jedné lince. Jeho další výhodou je největší počet uživatelsky přístupných pinů, uživatelsky plně konfigurovatelné Universal Serial Bus (USB) rozhraní, které lze použít pro datový výstup a přítomnost ethernetu, který lze použít pro dálkovou správu zařízení. Nespornou výhodou velmi dobrý poměr cena/výkon.



Obrázek 2.20: Arduino Mega [20]



Obrázek 2.21: ESP32 [20]



Obrázek 2.22: Raspberry Pi [20]

Třetím kandidátem je ESP32 (obr. 2.21), což je mikrokontrolér postavený také na 32-bitové architektuře, který je zaměřený spíše na bezdrátovou konektivitu. Disponuje velmi velkou flash pamětí a dostatečným výkonem spolu s bezdrátovým wi-fi připojením. ESP32 má také přímo připraven výstup na Secure Digital (SD) kartu. Nevýhodou je však malý počet pinů, který by mohl vést při vývoji k problémům, které by se musely řešit pomocí rozšiřujících modulů, či posuvných registrů.

Čtvrtým a posledním kandidátem je Raspberry Pi 4 (obr. 2.22). V tomto případě se spíše než o mikrokontrolér jedná o mikropočítač s 64-bitovou architekturou. Na Raspberry Pi 4 musí již běžet operační systém, většinou na bázi linuxu, což úplně mění způsob programování, kdy je potřeba vyvinout aplikace, které poběží na zvoleném operačním systému, což oproti ostatním kandidátům snižuje rychlost. Výhodou tohoto řešení je naopak obrovský potenciál pro budoucí vývoj, který však nebude využit u jednoúčelového zařízení, které samo o sobě nemá možnost být dále nějakým razantní způsobem rozvíjeno.

Po zhodnocení všech výhod a nevýhod jednotlivých kandidátů vychází jako vítěz mikrokontrolér Nucleo F-144, konkrétně Nucleo F767zi.



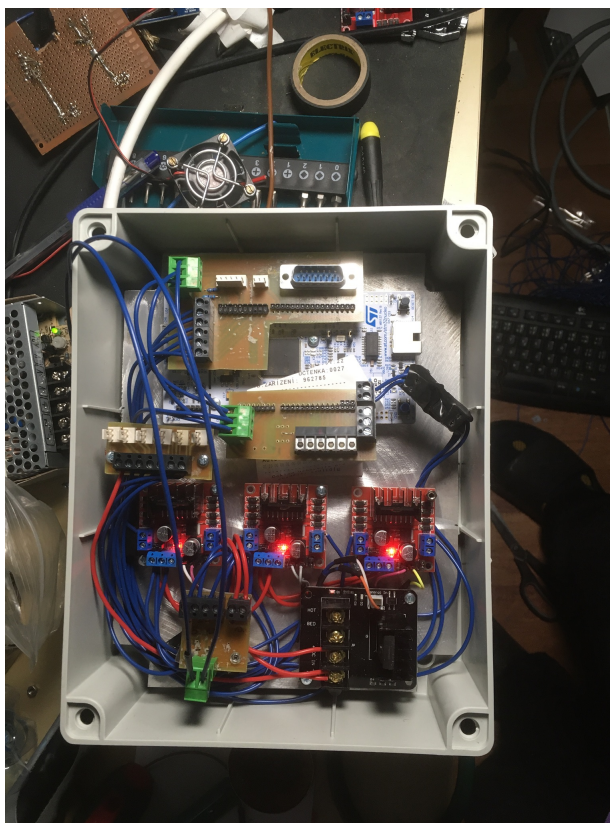
Obrázek 2.23: Nucleo F-144 [20]

### 2.2.7 Rozvaděč

Všechny komponenty bylo nutné pospojovat a zajistit jejich pevnou polohu. Pro tento účel byl vytvořen rozvaděč, ve kterém jsou komponenty umístěny. Pro řídicí jednotku Nucleo F-144 byly zhotovené 2 plošné spoje pod označením Pravá lišta a Levá lišta, které se zasunou do dutinek na desce a disponují všemi potřebnými periferiemi. Na pravé liště se nachází 6 pinový konektor pro senzor teploty a vlhkosti (díky použití senzoru SHT85, který měří obě veličiny, nejsou všechny piny využity), jeden 3 pin pro servo odvlhčovací klapky, dva 3 pinnové konektory pro dodatečné teplotní senzory, svorkovnice sloužící k ovládání ventilátorů, napájecí konektor a D-SUB 15 konektor sloužící k připojení Human Machine Interface (HMI) panelu.

Na levé liště se nachází svorkovnice, která slouží k ovládání tepelné jednotky a svorkovnice s volnými vstupy/výstupy.

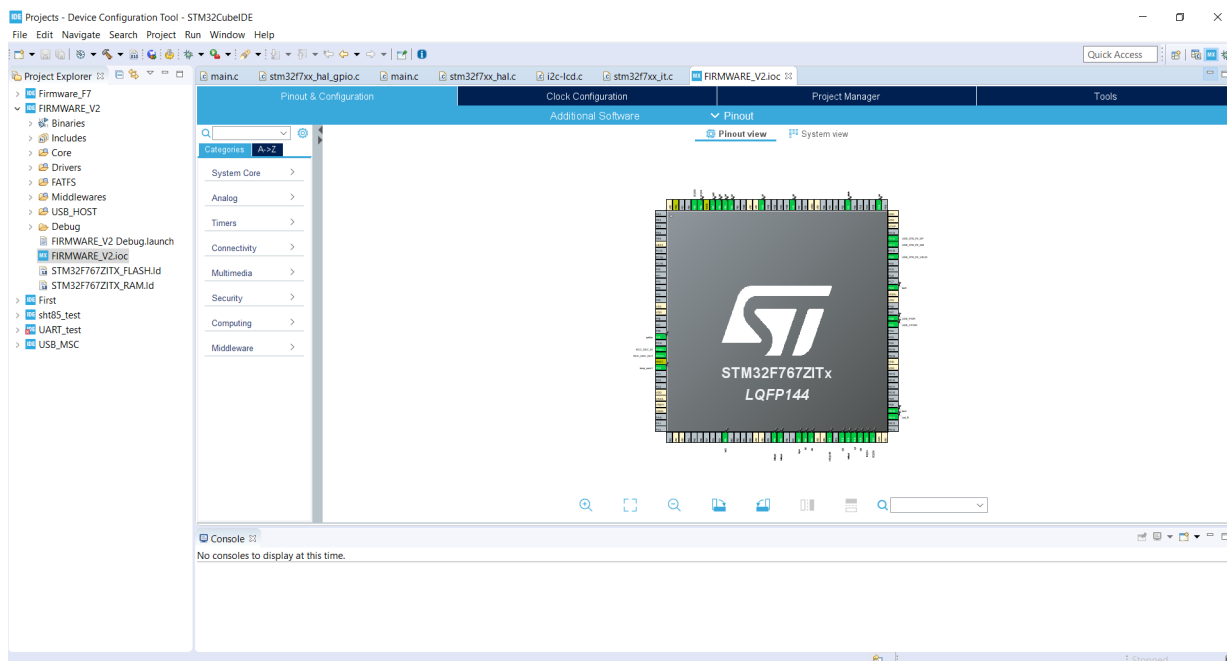
Pro snadnější instalaci byla vytvořena ještě sduřovací lišta pro ventilátory osazená 3 pinovými konektory a blok pro rozvod napětí osazen step-down měničem, který slouží pro napájení řídicí jednotky napětím 5V.



Obrázek 2.24: Rozvaděč klimatické komory

## 2.3 Firmware

Firmware pro klimatickou komoru byl naprogramován v softwaru STM32CubeIDE v jazyce C s využitím nástroje CubeMX, který slouží jako konfigurátor periferií.



Obrázek 2.25: Prostředí STM32CubeIDE s CubeMX

Firmware lze rozdělit do 3 částí. První částí je Setup, který je prováděn při zapnutí klimatické komory. V této části dochází k inicializaci periferií (Inter Integrated Circuit (I2C), ADC, USB Mass storage class (USB MSC), General-purpose input/output (GPIO), časovače). Následně je inicializován LCD panel, který zobrazí úvodní text a poté dojde k probliknutí všech kontrolky na Human Machine Interface (HMI) panelu a tím je klimatická komora připravená k provozu.

Po setupu přechází firmware do nekonečné smyčky `while(1)`

Listing 2.1: Začátek nekonečné smyčky `while(1)`

```
while (1)
{
    MX_USB_HOST_Process(); //Inicializace USB OTG HOST

    //Firmware Loop Start
    BTN_Read(); // Nacteni tlacitek HMI panelu
    USB_MSC_Ready(); // USB flash disk
```

Funkce `BTN_Read()` slouží k načtení tlačítek z HMI panelu, z jejichž stavu poté čerpá následně zbytek firmwaru. Funkce `USB_MSC_Ready()` slouží pro detekci stavu vloženého Universal Serial Bus (USB) flash disku, konkrétně uděluje povolení pro sběr dat, pokud je Universal Serial Bus (USB) disk připraven k zápisu, což je signalizováno rozsvícením oranžové kontrolky.

Listing 2.2: Funkce `BTN_Read()`

```

void BTN_Read(void) {
    if (HAL_GPIO_ReadPin(btn1_GPIO_Port, btn1_Pin) == 1) {
        runMode = 1;
    } else {
        runMode = 0;
    }
    if (HAL_GPIO_ReadPin(btn2_GPIO_Port, btn2_Pin) == 1 &&
        HAL_GPIO_ReadPin(btn3_GPIO_Port, btn3_Pin) == 0 ) {
        start = 1;

        } else if (HAL_GPIO_ReadPin(btn3_GPIO_Port, btn3_Pin) == 1 &&
        HAL_GPIO_ReadPin(btn2_GPIO_Port, btn2_Pin) == 0) {
        start = 0;
        }
    HAL_Delay(10);
}

```

Po načtení tlačítek a naplnění proměnných `runMode` a `start` následuje podmínka `if`, která rozděluje smyčku `while(1)` do tří hlavních částí.

Listing 2.3: Základny mody firmwaru

```

if (runMode == 0 && start == 0) { //Mod Nastaveni hodnot

} else if (runMode == 1 && tempMin <= tempset && tempset <= tempMax
&& humidMin <= humidset && humidset <= humidMax ) //Provozni mod

} else { //Chybovy mod

}

```

První mod slouží pro uživatelské nastavení požadované teploty, relativní vlhkosti a délky procesu. Tento mod je signalizován blikáním zelené kontrolky. Při spuštění klimatické komory firmware automaticky po setupu přeskočí do tohoto modu. Nastavení hodnot

se provádí pomocí rotačního encoderu s tlačítkem.

Listing 2.4: Uživatelské nastavení hodnoty RH pomocí rotačního encoderu

```

while (clickCounter == 3 && runMode == 0){
    clkState = HAL_GPIO_ReadPin(e_clk_GPIO_Port, e_clk_Pin);

    if(clkState != clkLastState){
        if(HAL_GPIO_ReadPin(e_dt_GPIO_Port, e_dt_Pin) != clkState){
            humidset += 1;
        } else{
            humidset -= 1;
        }
        clkLastState = clkState;

        sprintf(Humid, "H-set:%0.1f", humidset);
        lcd_send_cmd (0x80|0x40);
        lcd_send_string(Humid);
        lcd_send_cmd (0x80|0x54);
        HAL_Delay(20);
    }
}

```

Druhý mod je určen pro samotný provoz klimatické komory. Před vstupem do tohoto modu je provedena validace hodnot nastavených uživatelem. Pokud je validace úspěšná a zbývající čas je větší než 0, dochází ke spuštění smyčky, na jejímž začátku dochází k načtení všech měřených veličin. Tento mod je signalizován rozsvícenou zelenou kontrolkou.

Listing 2.5: Provozní mod - načtení veličin

```

if(start == 1 && timeToEnd >= 0){
    HAL_GPIO_WritePin(kontrolka_zel_GPIO_Port, kontrolka_zel_Pin,
        GPIO_PIN_SET);

    run = 1;

    measure(THData); // mereni z SHT85(I2C)
    temperatureC = THData[0];
}

```

```

humidity = THData[1];
HAL_Delay(20); //Nutne zpozdeni pro stabilni mereni

if(logReady == 1 && logOK == 1){
    dataLog();
    logReady=0;
}

```

Funkce `measure(THData)` se stará o komunikaci se senzorem SHT85 dle protokolu Inter Integrated Circuit (I2C). Funkce byla naprogramována dle doporučení z katalogu výrobce senzoru. Funkce `dataLog()` se stará o zápis naměřených hodnot na Universal Serial Bus (USB) flash disk.

Listing 2.6: Provozní mod - měřící funkce pro SHT85

```

void measure(float arr []){
    //Sensor variables
    uint8_t buffer [6];
    float valT;
    float valH;

    buffer [0]=0x24;
    buffer [1]=0x00;
    HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1 ,0x44 <<1,buffer ,2 ,100);
    HAL_Delay(100);
    HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1 , 0x44<<1, buffer , 6, 100);

    valT = buffer [0] << 8 | buffer [1];
    arr [0] = -40+(175*valT)/65535;
    valH = buffer [3] << 8 | buffer [4];
    arr [1] = (100*valH)/65535;

}

```

Posledním krokem provozního modu je řízení. Před samotným naprogramováním řídicího algoritmu byla nejdříve provedena měření (viz. kapitola Experiment). Na základě těchto poznatku byly navrženy požadavky na tento řídicí algoritmus.

- Maximální teplota 60°C



- Při chlazení používat maximálně 75% výkonu tepelné jednotky
- Při ohřevu používat maximálně 25% výkonu tepelné jednotky

Na základě těchto stanovených požadavků byly naprogramovány řídicí algoritmy pro vlhkost a teplotu.

Jelikož vlhkost je řízena pouze stylem ON/OFF, tak nebylo nutné zavádět nějaké složité řízení. Bylo však nutné brát v potaz potřebný čas na ustálení hodnoty, aby nedocházelo k převlhčení. Proto je zvlhčovač spouštěn v cyklu, který mu stanovuje čas vypnutí a čas zapnutí, který je řízen pomocí časovače "TIM9" s frekvencí 1Hz.

Listing 2.7: Řízení relativní vlhkosti

```

if (humidset >= humidity){
    if (timeRH <= onCycleRH){
        HAL_GPIO_WritePin(humidifier_GPIO_Port , humidifier_Pin ,
        GPIO_PIN_SET);

    } else {
        HAL_GPIO_WritePin(humidifier_GPIO_Port , humidifier_Pin ,
        GPIO_PIN_RESET);
        dehumidify (); // Automaticke snizeni vlhkosti
    }
}

```

Funkce dehumidify() při překročení stanovené hodnoty vlhkosti otevře odvlhčovací klapku a spustí ventilátor, což má za následek snížení hodnoty vlhkosti. Servo klapky je řízeno pomocí časovače "TIM1" s frekvencí 50Hz.

```

void dehumidify (void){
    if (humidity > (humidset+5)){
        htim1.Instance->CCR1 = 42; // Otevreni klapky
        HAL_GPIO_WritePin(fan4_GPIO_Port , fan4_Pin ,
        GPIO_PIN_SET);
        HAL_GPIO_WritePin(humidifier_GPIO_Port ,
        humidifier_Pin ,
        GPIO_PIN_RESET);
    } else {
        htim1.Instance->CCR1 = 37; // Uzavreni klapky
        HAL_GPIO_WritePin(fan4_GPIO_Port , fan4_Pin ,

```

```

        GPIO_PIN_RESET);

    }

}

```

Teplota je řízena pomocí PID algoritmu se spojitým výstupním signálem, který reguluje výkon peltierova článku. V případě, že nastavená teplota je vyšší než teplota změřená na počátku procesu, jedná se tedy o ohřev, který je řízen kompletním Proporcionální integrační derivační (PID) algoritmem, který používá následující konstanty:

- Konstanta proporcionální  $k_p = 100$
- Konstanta integrační  $k_i = 30$
- Konstanta derivační  $k_d = 70$

```

if (heatMode == 1){

    PID_error = tempset - temperatureC + 0.0325*tempset;
    PID_p = PID_error;

    PID_i = PID_i + PID_error;
    if (PID_i > 21.7){
        PID_i = 21.7;
    } else if (PID_i < -21.7){
        PID_i = -21.7;
    }

    PID_d = PID_error - PID_last_error;
    PID_last_error = PID_error;

    PID = (kp*PID_p)+(ki*PID_i)+(kd*PID_d);

    if (PID > heatingPower){
        PID = heatingPower;
    } else if (PID < -coolingPower){
        PID = -coolingPower;
    }
}

```

```
power = PID;
if (power > 0){
    HAL_GPIO_WritePin(peltier_state_GPIO_Port ,
        peltier_state_Pin ,GPIO_PIN_RESET); // Mod Ohrevu

    htim14.Instance->CCR1 = power;
} else {
    HAL_GPIO_WritePin(peltier_state_GPIO_Port ,
        peltier_state_Pin ,GPIO_PIN_SET); //Mod Chlazení

    htim14.Instance->CCR1 = power*(-1);
}
```

Při výpočtu chyby `PID_error` si lze všimnout členu `"0.0325*tepset"`. Tento člen slouží jako kompenzační člen pro tepelnou setrvačnost. Byl zjištěn a odladěn experimentálně (viz. kapitola Experiment). Další upravou PID regulátoru bylo omezení integrální chyby, jelikož proces není příliš rychlý a chyba by rostla do enormních hodnot, ale zároveň je potřeba velký zásah od integrálního členu. Velikost omezení integrační chyby byla také zjištěna experimentálně (viz. kapitola Experiment).

Pokud je však uživatelsky nastavená teplota nižší než teplota změřená, jedná se tedy o mod chlazení. Zde nastává změna oproti ohřevu. Tepelné jednotce je nastaven maximální výkon, tedy 75% až do doby, kdy téměř dosáhne nastavené hodnoty. Poté nastupuje P regulátor, který používá kvadrát proporcionální konstanty  $k_p$ . Změna teploty je zde tak malá, že téměř není znát kolísání od P regulátoru.

Třetím a posledním modem je mod chybový, který nastane při nesplnění podmínek pro spuštění modu provozního. Tento mod je signalizován blikáním červené kontrolky.

```
} else {
    error (); //Rozblikani cervene kontrolky
}
```

## 2.4 Experiment

Po sestavení a základním naprogramování klimatické komory bylo nutné zjistit její výkonnostní limity. Byl tedy proveden experiment pro jejich určení. V první části byla komora provozována v modu chlazení s různými hodnotami výkonu tepelné jednotky.

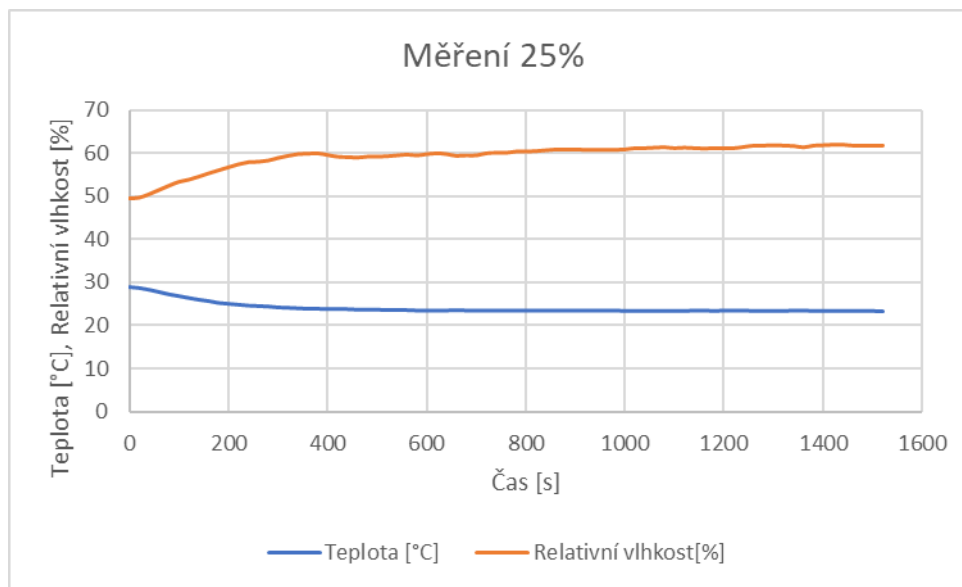
### 2.4.1 Chlazení

V modu chlazení byly provedeny celkem 3 testy s hodnotami výkonu tepelné jednotky 25%, 50%, 75%. Test pro hodnotu výkonu 100% nebyl prováděn záměrně, protože dochází k nadměrnému ohřevu, protože se pohybujeme mimo efektivní pásmo Peltierova článku, které se nachází kolem 70%. Vysoká teplota chladiče by také mohla ohrozit samotné materiály, ze kterých je komora sestavena.

Všechna měření probíhala stejným stylem. Byl nastaven požadovaný výkon tepelné jednotky a komora byla spuštěna bez jakéhokoliv regulátoru či časového omezení. Při těchto měřeních byl brán zřetel spíše na teplotu. Poté co se teplota ustálila na nějaké hodnotě a příliš neoscilovala, byl tento stav považován jako ustálený a měření bylo ukončeno. Zápis výsledků měření probíhal každých 20 sekund. Z výsledků byl poté zpracován graf závislosti teploty a vlhkosti na čase a přechodová charakteristika pro teplotu. Před každým měřením byla komora ponechána do doby, než se všechny části ustálili na teplotu okolí (bylo ověřeno kontaktním teploměrem).

## Měření č.1 - 25% výkonu

Při prvním měření s nastavenou hodnotou 25% výkonu se teplota po zhruba 10 minutách ustalovala kolem hodnoty 23.5 °C a oscilovala s výchylkou 0.1 °C což již lze s ohledem na chybu měření považovat za ustálený stav.



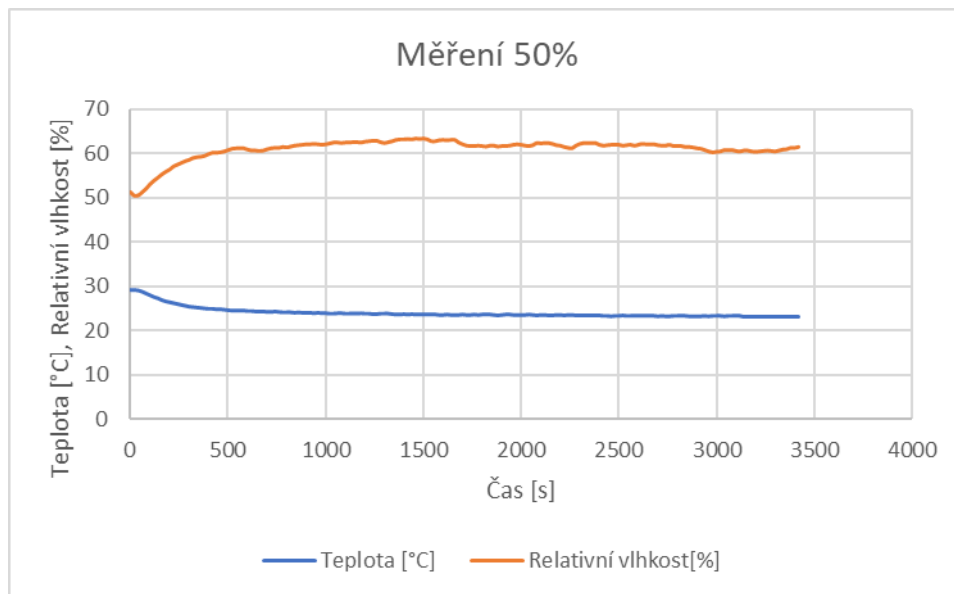
Obrázek 2.26: Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 25% výkonu

Teplota okolí [°C]	28.8
Výkon [%]	25
Teplota dosažená [°C]	23.4
Délka měření [s]	1520

Tabulka 2.5: Výsledky měření při 25% výkonu tepelné jednotky

## Měření č.2 - 50% výkonu

Druhé měření probíhalo již s vyšším výkonem. Rozdíl teplot však nebyl téměř znatelný oproti měření při 25% výkonu.



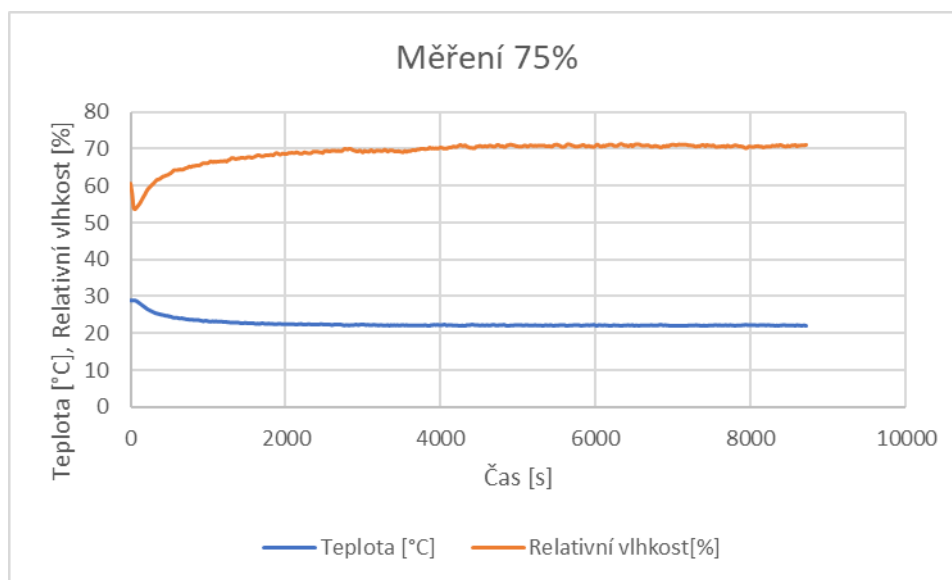
Obrázek 2.27: Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 50% výkonu

Teplota okolí [°C]	29.3
Výkon [%]	50
Teplota dosažená [°C]	23.2
Délka měření [s]	3420

Tabulka 2.6: Výsledky měření při 50% výkonu tepelné jednotky

**Měření č.3 - 75% výkonu**

Při třetím měření již byla poznat větší rychlost poklesu teploty při vyšším nastaveném výkonu. Dosažená teplota byla také o 1 °C nižší než při 50 % výkonu. Oteplení chladiče bylo však nejvyšší s dosaženou teplotou 62 °C (měřeno kontaktním teploměrem).

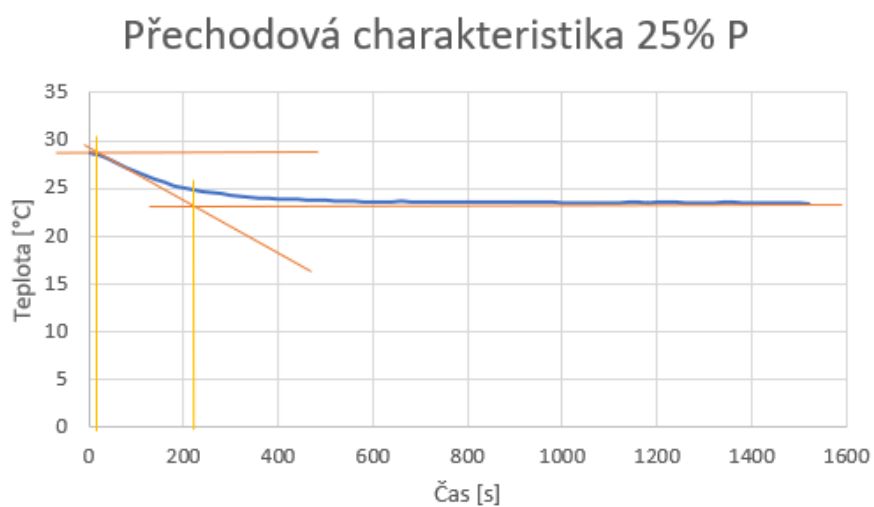


Obrázek 2.28: Graf teploty a vlhkosti v závislosti na čase při 75% výkonu

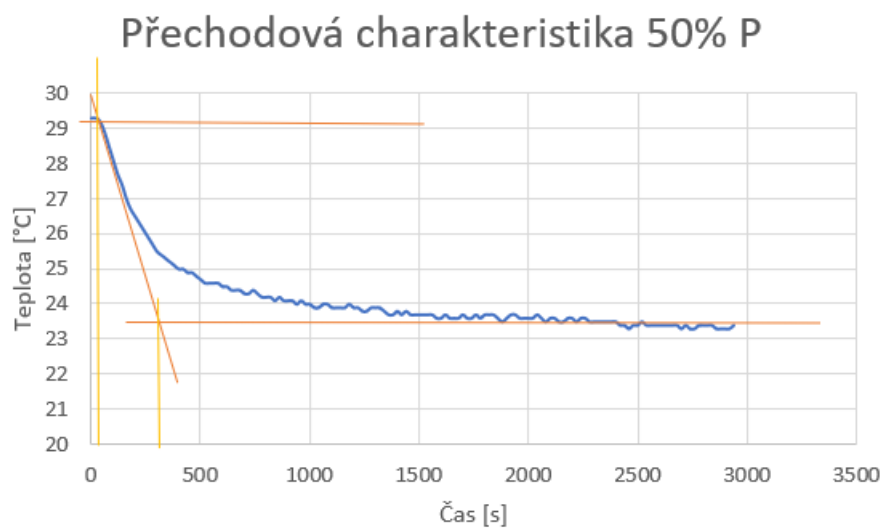
Teplota okolí [°C]	28.8
Výkon [%]	75
Teplota dosažená [°C]	22.2
Délka měření [s]	4880

Tabulka 2.7: Výsledky měření při 75% výkonu tepelné jednotky

## Přechodové charakteristiky

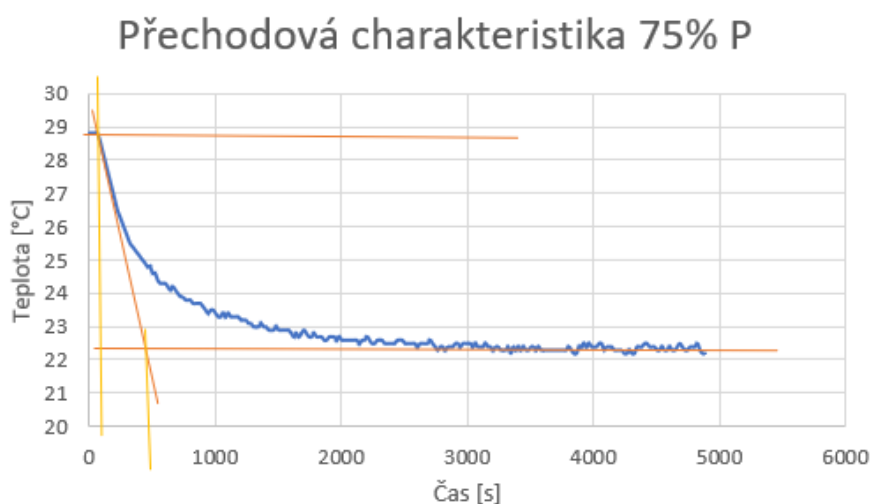


Obrázek 2.29: Přechodová charakteristika teploty při 25% výkonu



Obrázek 2.30: Přechodová charakteristika teploty při 50% výkonu





Obrázek 2.31: Přechodová charakteristika teploty při 75% výkonu

Doby náběhu a časové konstanty byly odečteny graficky.

% výkonu	Doba náběhu [s]	Časová konstanta [s]
25	14,8	203,7
50	36,2	275,4
75	112,7	352,1

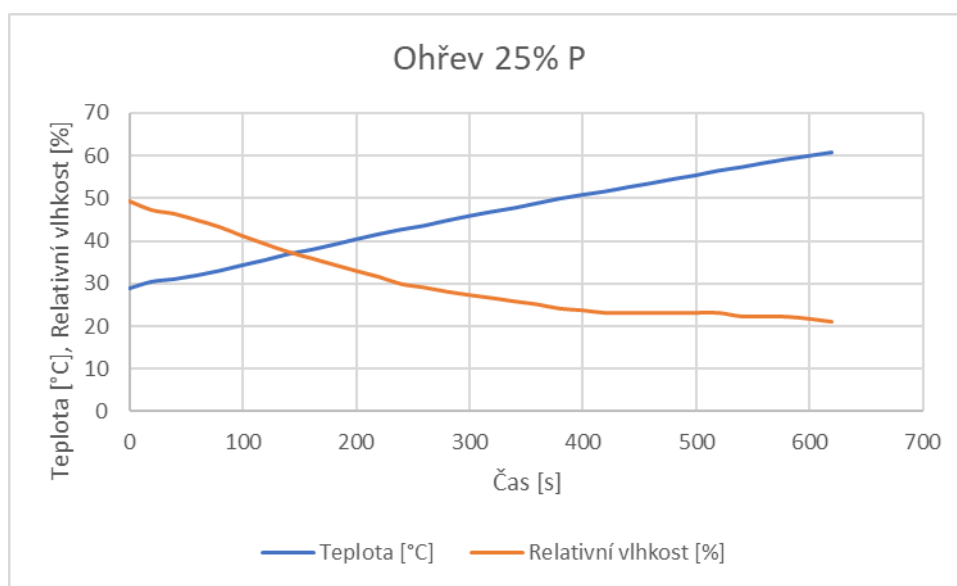
Tabulka 2.8: Doby náběhu a časové konstanty při měření teploty

Při porovnání všech 3 přechodových charakteristik je patrné, že při výkonovém zatížení 25% je úhel strmosti grafu zhruba 2 krát větší než u zbývajících dvou, které jsou si podobné. Toto zjištění je vhodné zejména pro řízení regulátorem, kdy je vidět, že změnou výkonu tepelné jednotky lze jednoduše regulovat teplotu (změna strmosti).

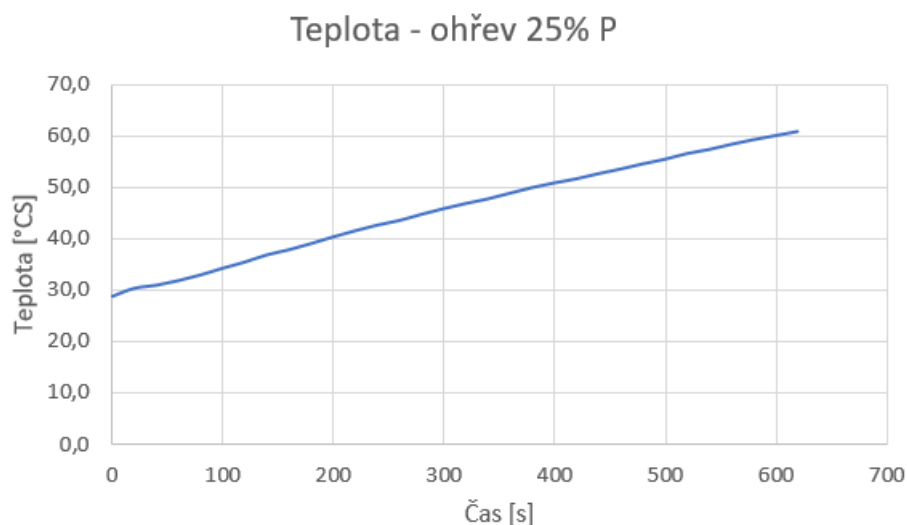
## 2.4.2 Ohřev

Jelikož byla již při testech v chladicím modu měřena kontaktním teploměrem i vnější, tedy teplejší strana tepelné jednotky, která se pohybovala v rozmezí 42 °C až 62 °C, tak bylo možné předpokládat potřebné výkonové zatížení pro ohřev. Bylo nutné také brát v potaz, že v případě chlazení je teplá strana mimo prostor klimatické komory, tudíž je stále ochlazována okolním vzduchem. Toto však u ohřevu neplatí, jelikož teplá strana tepelné jednotky je uzavřena v pracovním prostoru. Z těchto faktů byla stanovena hodnota pro experiment 25% výkonu. Při testu bylo dodatečně umístěno čidlo kontaktního teploměru do pracovního prostoru v blízkosti tepelné jednotky z důvodu zkoumání tepelného ovlivnění izolace.

Průběh Měření byl následující. V řídicí jednotce byla nastavena hodnota výkonu 25 % a komora uvedena do provozu. Byla sledována jak teplota vzduchu v komoře, tak i teplota izolace v blízkosti tepelné jednotky.



Obrázek 2.32: Graf teploty a relativní vlhkosti v závislosti na čase při ohřevu při 25% P



Obrázek 2.33: Graf teploty závislosti na čase při ohřevu při 25% P

Poté co teplota v klimatické komoře přesáhla 60 °C bylo měření ukončeno. Nebylo tedy dosaženo ustáleného stavu, který by mohl být až za hranicemi odolnosti materiálů, ze kterých je klimatická komora zhotovena. Teplota chladiče tepelné jednotky se vyšplhala na 66 °C. Jelikož teplotní odolnost extrudovaného polystyrenu je krátkodobě 80 °C a dlouhodobě 65 - 70 °C [14], byla stanovena maximální provozní pracovní teplota na 60 °C.

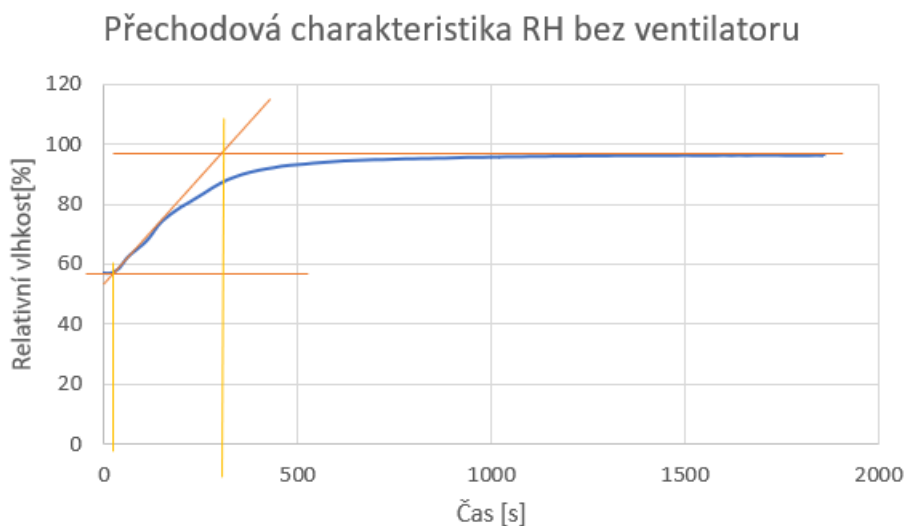
Výkonové zatížení 25% je považováno jako limitní pro ohřev, protože dosahuje optimální rychlosti ohřevu na maximální provozní pracovní teplotu a zároveň nedochází k nadměrnému ohřevu vnitřní části tepelné jednotky.

Dále byl proveden test na 50% výkonu, který byl po 3 minutách ukončen, protože teplota izolace v blízkosti jednotky rostla mnohonásobně rychleji než teplota pracovního prostoru, což není optimální.

### 2.4.3 Vlhkost

Měření navlhčení klimatické komory bylo prováděno bez zapnutí tepelné jednotky. V provozu byl tedy pouze zvlhčovač a vnitřní ventilátor.

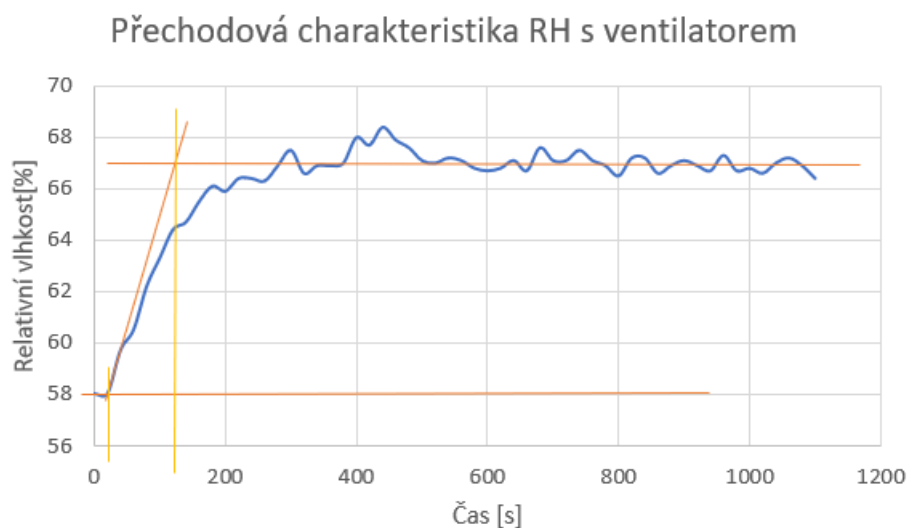
Při prvním testu byl vnitřní ventilátor vypnut a v provozu byl pouze zvlhčovač vzduchu.



Obrázek 2.34: Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při vypnutém vnitřním ventilátoru

Z obrázku 2.34 je patrné, že nárůst vlhkosti při vypnutém ventilátoru byl téměř maximální. Konkrétní dosažená maximální hodnota relativní vlhkosti byla 96,6%. Kolem této hodnoty již byl stav ustálený a dále se její hodnota neměnila.

V případě zapnutého ventilátoru byla hodnota dosažené relativní vlhkosti o poznání menší. Maximálně se vyšplhala na hodnotu 68,4% a silně oscillovala, což je patrné z obrázku 2.35.

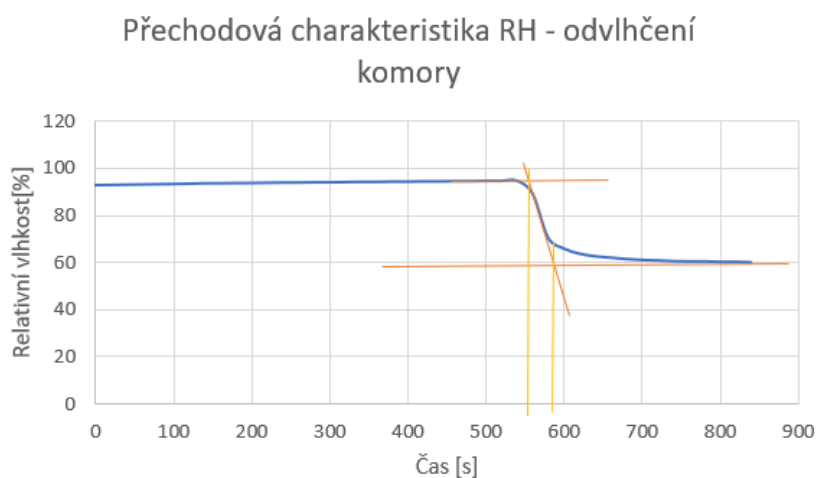


Obrázek 2.35: Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při zapnutí vnitřním ventilátoru

Stav ventilátoru	Doba náběhu [s]	Časová konstanta [s]
ON	24,8	281
OFF	19,5	102,5

Tabulka 2.9: Doby náběhu a časové konstanty při měření vlhkosti

Posledním testem byl test schopnosti komory relativní vlhkost snížit. Komora byla spuštěna s limitní hodnotou 95% relativní vlhkosti. Po jejím dosažení byl zvlhčovač vypnut a otevřena odvlhčovací klapka spolu s odvlhčovacím ventilátorem. Časová konstanta této přechodové charakteristiky byla rovna hodnotě 31,5s.



Obrázek 2.36: Přechodová charakteristika relativní vlhkosti při otevření odvlhčovacího ventilu

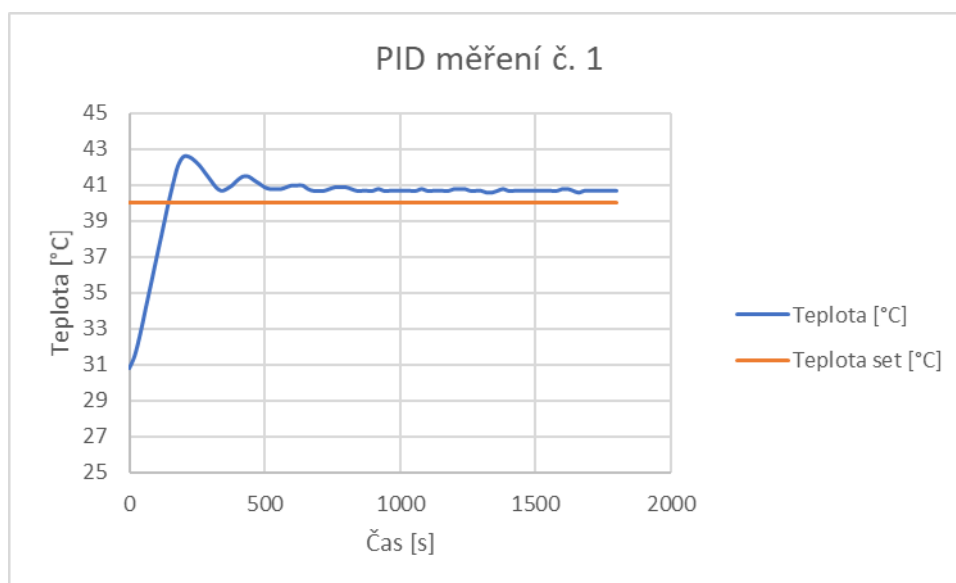
### 2.4.4 Regulátor

Po experimentálním ověření možností klimatické komory byl naprogramován regulační algoritmus (viz. kapitola Firmware), který bylo následně potřeba odladit.

První měřený test měl následující nastavení.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
2	130	50	70	20	40	-

Tabulka 2.10: PID měření č. 1

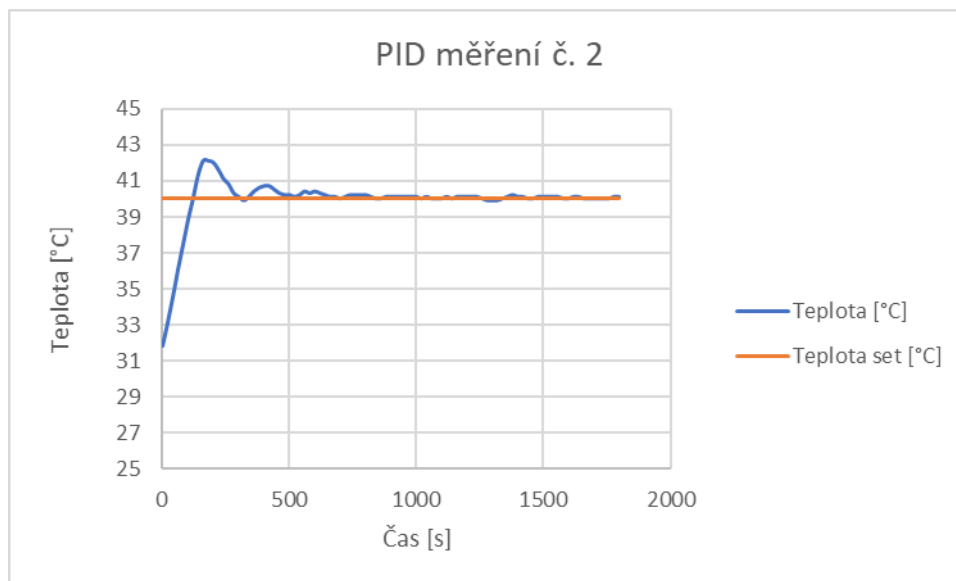


Obrázek 2.37: Měření PID regulátoru č.1

Na obrázku 2.37 lze vidět, že regulovaná veličina se sice stabilizovala, ale nad požadovanou veličinou. Tento fakt byl zapříčiněn moc velkým korekčním součinitelem chyby, který měl při tomto měření hodnotu 2. Bylo nutné jej tedy pro další měření snížit.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
1,3	100	30	70	20	40	-

Tabulka 2.11: PID měření č.2

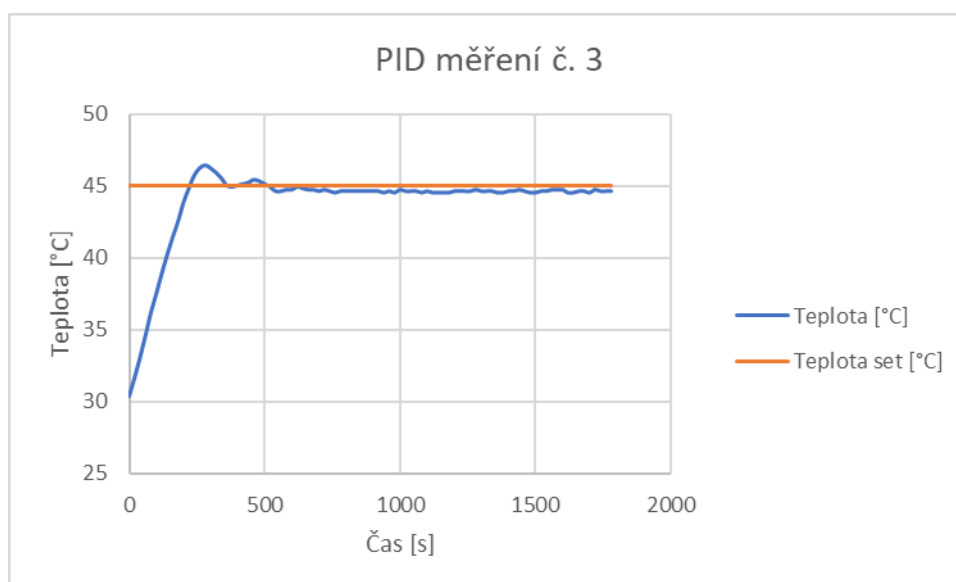


Obrázek 2.38: Měření PID regulátoru č.2

Z obrázku 2.38 je již patrné, že se regulovaná veličina ustálila na požadované hodnotě. Následující test tedy sloužil jako korekční s jinou nastavenou teplotou.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
2	100	25	70	20	45	-

Tabulka 2.12: PID měření č.3



Obrázek 2.39: Měření PID regulátoru č.3

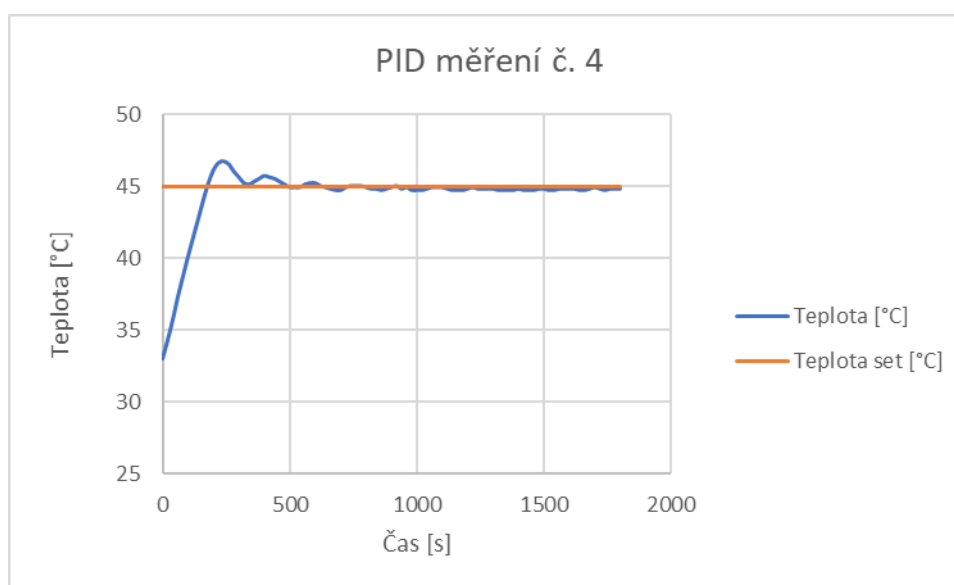
V případě třetího měření se teplota nedokázala ustálit na nastavené hranici, nýbrž Proporcionální integrační derivační (PID) algoritmus generoval nedostatečný výkon. Bylo

tedy jasné, že se vzrůstající teplotou je pro její udržení nutný větší výkon, proto byl korekční součinitel na základě předchozích hodnot navržen jako funkce nastavené teploty  $k = 0,0325 * T_{set}$ , kdy koeficient 0,0325 udává při teplotě 40°C hodnotu koeficientu  $k = 1,3$ .

Následující měření bylo tedy provedeno již se změněným koeficientem.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
$0,0325 * T_{set}$	100	25	70	20	45	-

Tabulka 2.13: PID měření č.4



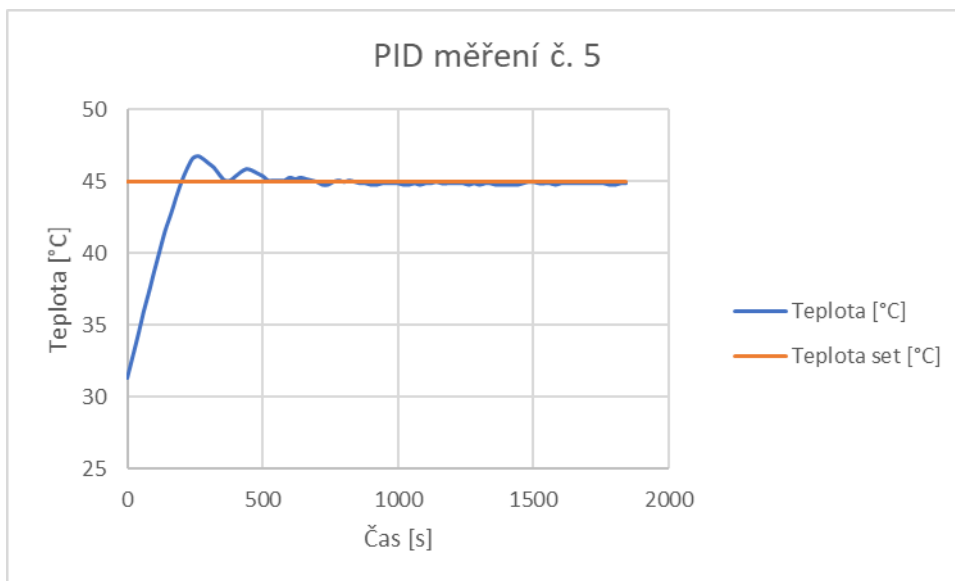
Obrázek 2.40: Měření PID regulátoru č.4

Při čtvrtém měření je patrné z obrázku 2.40, že se teplota uslálila lehce pod nastavenou hodnotou. Opět to znamenalo chybějící výkon, proto byl navýšen vliv integrální chyby PID\_imax na hodnotu 21,5.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
$0,0325 * T_{set}$	100	25	70	20	45	-

Tabulka 2.14: PID měření č.5

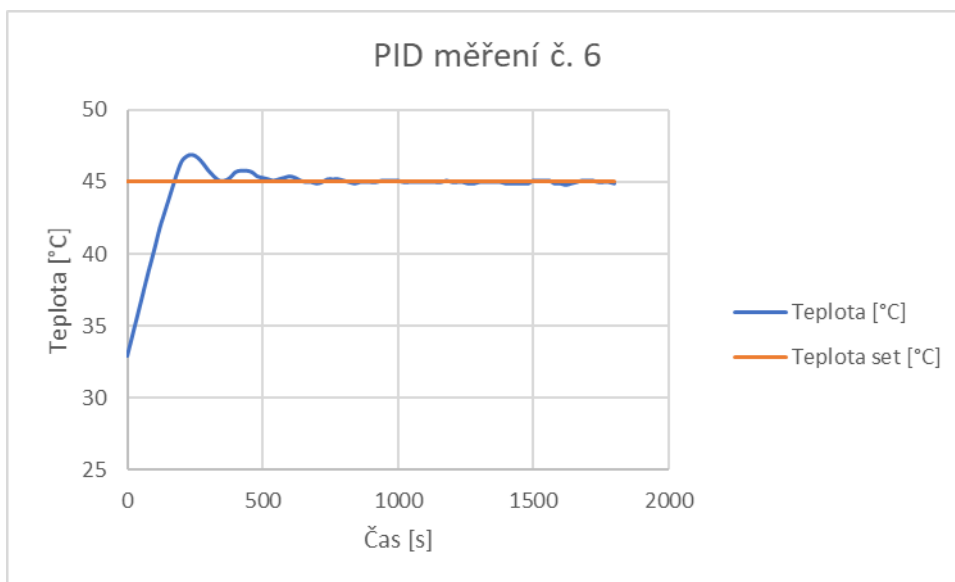




Obrázek 2.41: Měření PID regulátoru č.5

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
0,0325 * Tset	100	25	70	21,5	45	-

Tabulka 2.15: PID měření č.6



Obrázek 2.42: Měření PID regulátoru č.6

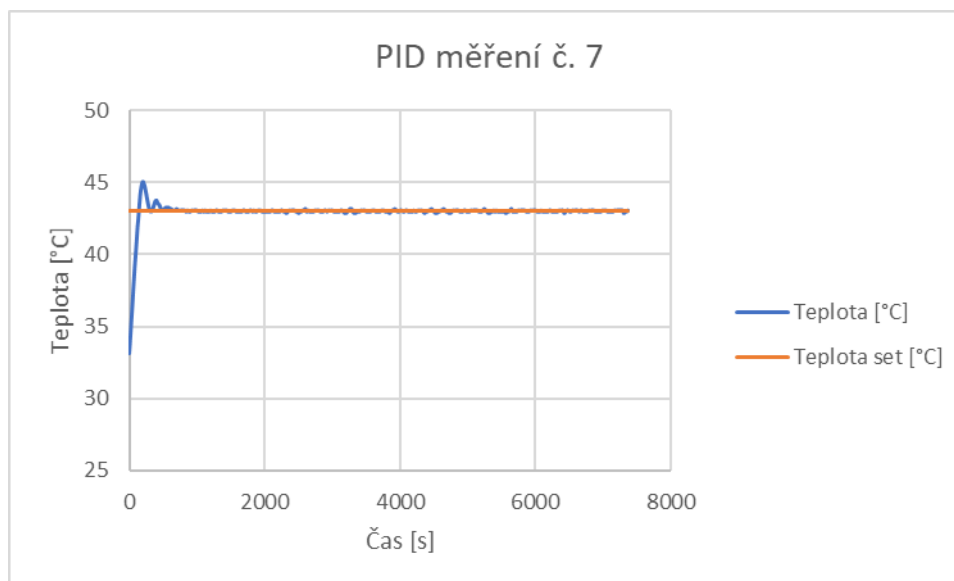
Po měření č.5 následovala ještě další korekce PID\_imax na hodnotu 21,8, která již zaručila stabilní výsledky.

Posledním testem PID regulátoru byl zároveň test zátěžový, kdy měření probíhalo v délce přes 2 hodiny. Test probíhal při nastavených hodnotách (viz. tabulka 2.16 velmi

stabilně. Byly měřeny i teploty na elektronice, které byly nízké. Závěrem tohoto měření tedy je, že je komora schopna dlouhodobého provozu a stabilně udržet teplotu.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
$0,0325 * T_{set}$	100	25	70	21,8	43	-

Tabulka 2.16: PID měření č.7



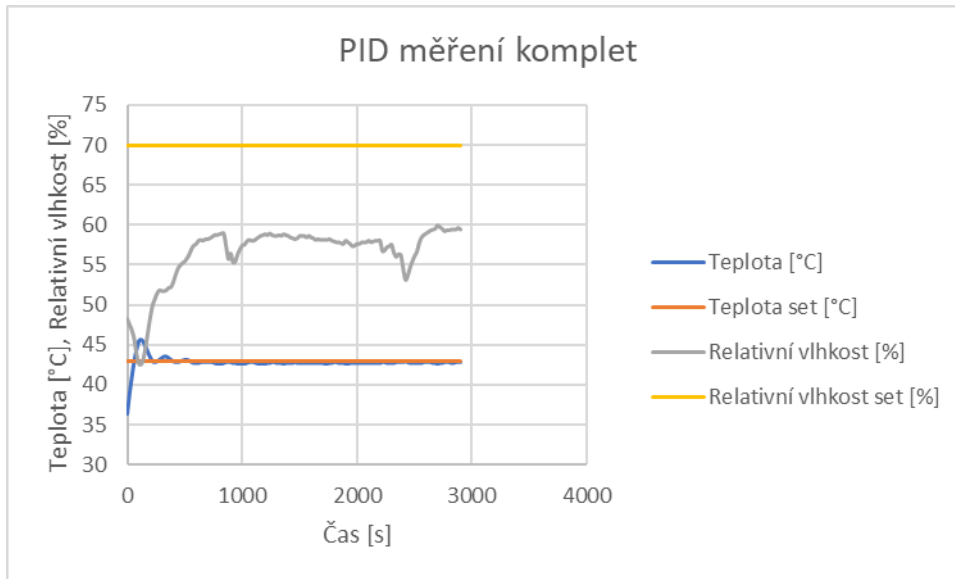
Obrázek 2.43: Měření PID regulátoru č.7

Po odladění regulátoru bylo spuštěno kompletní měření, tedy klimatická komora byla uvedena do plného provozu. Hodnota Relativní vlhkosti byla záměrně nastavena na vyšší hodnotu, aby byl ověřen fakt, že při zapnutém ventilátoru je výkon zvlhčovače příliš malý. Toto bylo jasné již z předchozích měření. Teplota se ustálila na nastavené hodnotě, regulátor tedy fungoval.

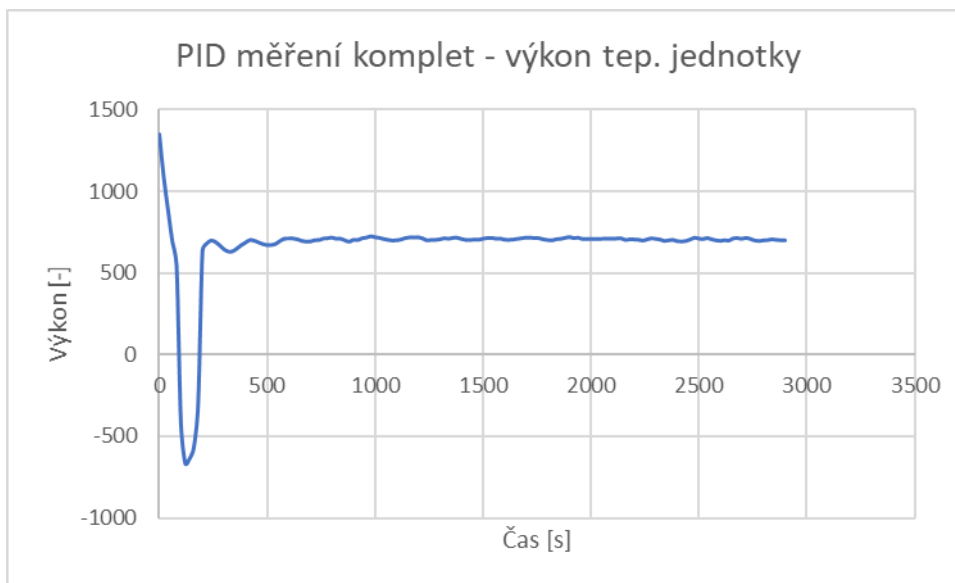
Na obrázku 2.45 lze vidět průběh výkonu, který dodává regulátor. Pokud se výkon nachází v záporné části, tak došlo k přepnutí z modu ohřevu na mod chlazení, aby se snížil překmit přes nastavenou hodnotu.

k	kp	ki	kd	PID_imax	Tset [°C]	RHset[%]
$0,0325 * T_{set}$	100	25	70	21,7	43	70

Tabulka 2.17: Měření kompletní



Obrázek 2.44: Měření kompletní



Obrázek 2.45: Měření kompletní - výkon

# Kapitola 3

## Závěr

Na základě provedené rešerše byl navržen, zkonstruován, naprogramován a uveden do provozu prototyp klimatické komory, který byl následně experimentálně zkoušen a laděn. Během celého procesu jsem načerpal spoustu poznatků o potenciálních úpravách, či řešeních.

Z pohledu konstrukce všechny navržené prvky fungují tak, jak bylo zamýšleno. Možné zlepšení by mohlo nastat u tepelné jednotky hned několika způsoby. Prvním způsobem by byla lepší optimalizace tepelného štítu pro lepší průtok vzduchu, který by zajistil lepší odvod tepla z vnější strany. Druhým způsobem by bylo zlepšení tepelného stínění, což by mohlo vést k možnosti dosažení stabilně vyšší teploty prostoru. Bylo by také možné umístit jednotku mimo pracovní prostor. Přes všechna možná zlepšení jednotka však vyhověla všem požadavkům, a to zejména v topném modu. Pro chlazení by bylo nutné navýšit výkon Peltierova článku, nebo by bylo možné použít jednotky dvě - jednu pro ohřev (méně výkonný článek) a jednu pro chlazení.

Použitou konstrukcí bylo dosaženo funkčního řešení, které je snadno vyrobitelné, servisovatelné a levné.

V oblasti elektroniky také vše vyhovělo i při maximálním výkonovém zatížení. Nastalo zde však pár nesrovnalostí, které jsem při návrhu neuvažoval. Prvním problémem byl napěťový pokles u PWM modulů, který znemožnil dobré řízení otáček, jelikož hodnota napětí nebyla dostatečná. Robustnějším řešením by bylo použít ventilátory, které již mají vstup pro PWM řízení a dodávat jim pouze tento signál z řídicí jednotky.

Při programování firmwaru a následných experimentech byl zřejmý nedostatečný výkon zvlhčovače vzduchu, který při zapnutém ventilátoru nedokáže při provozu navlhčit na více než 60% relativní vlhkosti. Řešením tohoto problému je výměna zvlhčovače za výkonější kus, která by byla velmi jednoduchá.

Ve výsledku prototyp klimatické komory plní svoji funkci a je použitelný v praxi.



Obrázek 3.1: Klimatická komora



Obrázek 3.2: Klimatická komora(otevřená)

# Bibliografie

- [1] (2015). Environmental Test Chambers and Rooms Information, WWW: [https://www.globalspec.com/learnmore/labware\\_test\\_measurement/product\\_material\\_testing/environmental\\_test\\_chambers](https://www.globalspec.com/learnmore/labware_test_measurement/product_material_testing/environmental_test_chambers) (cit. 18.02.2020).
- [2] (2015). Buyers Guide, WWW: <https://www.iest.org/About/Buyers-Guide/Thermotron-Industries> (cit. 18.02.2020).
- [3] M. Novák, *Technická měření*, Český. 2018, ISBN: 978-80-01-06388-0.
- [4] (2020). GME, WWW: <https://www.gme.cz/> (cit. 18.02.2020).
- [5] (2012). Termočlánky, WWW: [http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_tcl.htm](http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm) (cit. 18.02.2020).
- [6] J. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. 2. doplněné vydání*, Anglický. 1999, ISBN: 3540648305.
- [7] (2018). THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR, WWW: [https://www.rotronic.com/en/humidity\\_measurement-feuchtemessung-mesure\\_de\\_l\\_humidite/capacitive-sensors-technical-notes-mr](https://www.rotronic.com/en/humidity_measurement-feuchtemessung-mesure_de_l_humidite/capacitive-sensors-technical-notes-mr) (cit. 18.02.2020).
- [8] (2017). Humidity Sensor – Types and Working Principle, WWW: <https://www.electronicshub.org/humidity-sensor-types-working-principle/> (cit. 18.02.2020).
- [9] (2011). Humidity Sensors and Signal Conditioning Choices, WWW: <https://www.digikey.com/en/articles/humidity-sensors-and-signal-conditioning-choices> (cit. 18.02.2020).
- [10] (2008). Peltierův jev, WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev> (cit. 18.02.2020).
- [11] (2012). How ultrasonic humidifiers work, WWW: <https://blog.stulz-usa.com/how-ultrasonic-humidifiers-work> (cit. 18.02.2020).
- [12] (2020). Tecnología, WWW: <https://www.bioazul.com/en/technology/> (cit. 18.02.2020).
- [13] (2020). Katalog tepelných izolací, WWW: <https://www.izolace-info.cz/katalog/> (cit. 18.02.2020).

- [14] (2020). Tepelné izolace, WWW: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace> (cit. 18.02.2020).
- [15] (2020). Obchod s hliníkovými profily, WWW: <https://www.ehlinik.cz/> (cit. 26.07.2020).
- [16] (2020). Isover, Výrobce izolačních materiálů, WWW: <https://www.isover.cz/produkty/styrodur-3000-cs> (cit. 26.07.2020).
- [17] (2020). Laska arduino, obchod orientovaný na Arduino, WWW: <https://www.laskarduino.cz/> (cit. 26.07.2020).
- [18] (2020). Sensirion, Výrobce senzorů, WWW: <https://www.sensirion.com/en/> (cit. 26.07.2020).
- [19] (2020). TME, Obchod s elektrotechnikou, WWW: <https://www.tme.eu/cz/> (cit. 26.07.2020).
- [20] (2020). Farnell, Obchod s elektrotechnikou, WWW: <https://cz.farnell.com/> (cit. 26.07.2020).

# Seznam Příloh

- Text práce (.pdf)
- 3D model klimatické komory (.stp)
- Výrobní výkresová dokumentace klimatické komory (.pdf)
  - Rám
    - \* L2 č.v. BP-2019-01-01
    - \* L3-Jednotka č.v. BP-2019-01-02
    - \* L4 č.v. BP-2019-01-03
    - \* L3-Top č.v. BP-2019-01-04
    - \* L4-Pant č.v. BP-2019-01-05
    - \* P1-jednotka č.v. BP-2019-01-06
    - \* L-Dveře1 č.v. BP-2019-01-07
    - \* L-Dveře2 č.v. BP-2019-01-08
    - \* L-Dveře3 č.v. BP-2019-01-09
  - Izolační blok
    - \* Polystyren-celek č.v. BP-2019-02-00
    - \* Polystyren-dveře č.v. BP-2019-02-01
    - \* Polystyren-bok č.v. BP-2019-02-02
    - \* Polystyren-zadní č.v. BP-2019-02-03
    - \* Polystyren-spodek č.v. BP-2019-02-04
- Elektrická schemata (.pdf)
  - Pravá lišta
  - Levá lišta
  - HMI
- Firmware



- Data z měření (.xlsx)

# Seznam použitého software

- Autodesk Inventor Professional 2018/2021
- KiCad v.5.1.5
- STM32CubeIDE v.1.2.0
- GIMP v.2.10.8
- Microsoft Excel