



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh přístroje pro přímé stanovení rosného bodu

Bakalářská práce

Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Autor práce: **Pavel Vaščuk**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.
Konzultanti: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ing. Martin Fryml





Zadání bakalářské práce

Návrh přístroje pro přímé stanovení rosného bodu

Jméno a příjmení: **Pavel Vaščuk**
Osobní číslo: M19000207
Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami měření vlhkosti vzduchu a nepřímými metodami stanovení rosného bodu.
2. Navrhněte postup pro přímé stanovení rosného bodu.
3. Provedte rozbor problematiky optické detekce orosené plochy.
4. Navrhněte prototyp přístroje pro přímé stanovení rosného bodu.
5. Zvolte vhodný mikropočítač a vytvořte program pro automatické měření rosného bodu a výpočet vlhkosti vzduchu.
6. K navrženému přístroji vypracujte dokumentaci.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
30–40 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Lepil Oldřich, Bednařík Milan, Široká Miroslava. (2003). Optika. In Fyzika: Sbíрка úloh pro střední školy (pp. 180-215). essay, Prometheus. ISBN 9788071962663
- [2] Hluchý Miroslav, Kolouch, J. (2007). Strojírenská Technologie 1. Scientia. ISBN 9788086960265
- [3] Virius, M. (2021). Programování V C#: Od základů K profesionálnímu použití. Grada Publishing. ISBN 9788027112166

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. března 2022

Pavel Vaščuk

Návrh přístroje pro přímé stanovení rosného bodu

Abstrakt

Tato práce se v teoretické části zabývá rozborem problematiky měření vzdušné vlhkosti, metodami detekce rosného bodu za využití optické geometrie. Dále se zaměřuje na teorii konstrukce zařízení z pohledu mechanického, elektrického a programátorského. V praktické části se práce zabývá návrhem postupu pro přímé stanovení rosného bodu s využitím optické detekce orosené plochy. Hlavním bodem této části práce je návrh a popis vývoje výroby prototypu přístroje pro přímé měření rosného bodu s využitím 3D tisku, standardizovaných komponentů a mikropočítače řízeného za pomoci aplikace z PC.

Klíčová slova: Rosný bod, Relativní vlhkost, Lom, C#, C, 3D tisk, WPF, Arduino

Design of an instrument for direct determination of dew point

Abstract

Theoretical part of this work deals with analysis of the measurement of air humidity. Methods for dew point detection in use of optical geometry. Furthermore, it describes design theory and creation from a mechanical, electrical and programming point of view. The practical part of this work describes the procedure of designing an instrument for direct determination of dew point with the usage of optical methods of measurement. The main part of this work is design and description of the development of the prototype device for direct determination of dew point. It handles 3D printing, standardized components and a microcontroller controlled by a PC application.

Keywords: Dew point, Relative humidity, Refraction, C#,C, 3D printing, WPF, Arduino

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku tohoto díla. Zejména panu Ing. Jiřímu Jelínkovi, Ph.D. vedoucímu bakalářské práce za odborné vedení, konzultace a za možnost využití laboratoří MNV. Dále pak panu Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. za jeho vhled do konstrukce zařízení, panu Ing. Martinu Frymlovi, za rady při tvorbě softwarové části zařízení, panu Ing. Martinu Diblíkovi, Ph.D. za konzultace elektrotechnické dokumentace.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	12
Úvod	13
Teoretická část	14
2.1 Vlhkost vzduchu	14
2.1.1 Relativní a absolutní vlhkost	14
2.1.2 Rozdělení metod měření vlhkosti vzduchu	14
2.1.3 Aproximace vlhkosti	16
2.1.4 Rosný bod	16
2.1.5 Metody dosažení rosného bodu	16
2.1.6 Nepřímé metody stanovení rosného bodu	17
2.2 Přímá metoda stanovení rosného bodu	17
2.2.1 Optická metoda	17
2.2.2 Geometrická optika	18
2.2.3 Indexy lomu a odrazu	18
2.2.4 Lasery	19
2.2.5 PT senzory	20
2.2.6 NTC senzory	20
2.3 Regulace	21
2.3.1 Požadované chování dynamického systému při regulaci	22
2.3.2 Vestavěné systémy	22
2.3.3 Polovodiče	23
2.3.4 Tranzistory	23
2.3.5 Komunikační protokoly	24
2.3.6 Programovací jazyky	25

2.3.7	Jazyk C	25
2.3.8	Jazyk C#	25
2.4	Strojírenské technologie	26
2.4.1	Vrtání a vyvrtávání	26
2.4.2	Pájení	26
2.4.3	Plasty	26
2.4.4	Technologie 3D tisku	26
Praktická část		28
3.1	Návrh zařízení pro přímé stanovení rosného bodu	28
3.1.1	Problematika optické detekce orosené plochy	28
3.1.2	Postup	28
3.2	Návrh zařízení	29
3.2.1	Výběr mikropočítače	29
3.2.2	Návrh detekce rosného bodu - komponenty, postup	29
3.2.3	Návrh komponent za účelem dosažení rosného bodu	31
3.2.4	Návrh rozměrů zařízení	31
3.2.5	Návrh regulace	32
3.2.6	Návrh sensoriky	32
3.3	Modelování zařízení	32
3.3.1	Volba tloušťky stěn těles	32
3.3.2	Řešení uchycení USB	32
3.3.3	Řešení uchycení zásuvky	33
3.3.4	Vzájemné uchycení tělesa senzoru a pláště	33
3.3.5	Řešení ochranné sítě	33
3.3.6	Řešení optického mechanismu	33
3.3.7	Kompenzace pnutí	34
3.4	3D tisk	35
3.4.1	Zakázková výroba	35
3.4.2	Vlastní výroba	35
3.5	Zapojení	36
3.5.1	Obecné informace o zapojení	36

3.5.2	Problémy s dokumentací komponent	36
3.5.3	KY-008 laser	36
3.5.4	BTS7960	37
3.5.5	BMP280	37
3.5.6	Volba děliče pro NTC a výroba dělicího můstku	38
3.6	Firmware Arduina	39
3.6.1	Postup vývoje	39
3.6.2	Oprava knihovny a komunikace	40
3.7	C# Vývoj	41
3.7.1	Certifikát	41
3.7.2	Implementace komunikace	41
3.7.3	Rozbor sériové komunikace mezi zařízeními	42
3.7.4	Regulátor	42
3.8	WPF aplikace	44
3.8.1	Vývoj WPF aplikace	44
3.9	Závěrečné měření	47
3.9.1	Shrnutí měření	50
	Závěr	51
	Literatura	51
	Seznam příloh	55

Seznam obrázků

2.1	Mollierův h-x diagram - zdroj: [6]	16
2.2	Peltierův článek - zdroj:[14]	17
2.3	Lom světla - zdroj: [11]	18
2.4	Teplotní sonda - zdroj: [18]	20

2.5	Systém regulovaný zpětnou vazbou PID regulátoru - zdroj: [26]	22
2.6	Nukleo - zdroj: [20]	23
2.7	Diferenční komunikace - zdroj: [22]	25
2.8	Ukázka 3D tiskárny - Ender 3	27
3.9	Graf lomu - zdroj: Příloha Tabulka rozdílů lomů	30
3.10	Graf lomu - zdroj: Příloha Tabulka relativního rozdílů lomů	30
3.11	Úhly odrazů na 2 mm silném, oroseném skle zrcadla	30
3.12	Výřez z dokumentace pro Peltierův článek - Výběr tepelného rozdílů - zdroj: Příloha: Elektro dokumentace	31
3.13	Ukázka řešení USB uchycení	33
3.14	Ukázka řešení Optického mechanismu	34
3.15	Ukázka modelování	34
3.16	Finální model	34
3.17	Ukázka modelu držáku chladiče v programu Cura	35
3.18	Ukázka nepovedených dílů a zapojené těleso senzoru	36
3.19	KY-008	37
3.20	BTS7960	37
3.21	BMP280	38
3.22	Linearizace děliče napětí - zdroj: Příloha Tabulka Linearizace termistoru	38
3.23	Dělič napětí	39
3.24	Ukázka zapojení celého zařízení	39
3.25	Certifikát	41
3.26	Ukázka aplikace 1	45
3.27	Ukázka aplikace 3	45
3.28	Ukázka aplikace 2	46

Seznam tabulek

2.1	Ukázka indexů lomu a odrazu - zdroj: [12]	19
3.2	Indexy lomu - zdroj: [12]	29

Seznam zdrojových kódů

3.1	Ukázka kódu Arduina	40
3.2	Ukázka založení vlákna	46

Seznam grafů

3.1	Kontrolovaná veličina	43
3.2	Interní proměnné regulátoru - zdroj: Příloha	43
3.3	Pracovní stanoviště	48
3.4	Graf naměřených hodnot s překrytým akváriem	49
3.5	Graf naměřených hodnot bez překrytého akvária	50

Seznam zkratk

TUL	Technická univerzita v Liberci
FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci
MNV	Měření neelektrických veličin
PC	"Personal Computer" počítač
LED	"Light-Emitting Diode" dioda vyzařující světlo
CD	"Compact Disc" Kompaktní disk
NP	"negative positive" Polovodičová přechod z katody na anodu
PT	"Platinum" Používá se v kontextu platinových senzorů
NTC	"Negative Temperature Coefficient" Polovodičový senzor teploty
PID	Proporcionálně, integračně derivační regulátor
PWM	"Pulse Width Modulation" Pulzní šířková modulace
ADC	"Analog-to-Digital Converter" Převod z analogového signálu na digitální
PLC	"Programmable Logic Controller" Programovaný logický automat
BJT	"Bipolar Junction Transistor" Bipolární tranzistor
FET	"Field-Effect Transistor" Unipolární tranzistor
USB	"Universal Serial Bus" Univerzální sériová sběrnice
EMC	"ElectroMagnetic Compatibility" Elektromagnetická kompatibilita
WPF	"Windows Presentation Foundation" Knihovna tříd pro tvorbu aplikací
TPR	Technické a programové prostředky řízení

Úvod

Vzdušná vlhkost je přírodním jevem, který výrazným způsobem zasahuje naše okolí, mimo jiné, ovlivňuje oblast technologických procesů, působí na kvalitu, vlastnosti, chování materiálů a je významným faktorem při výpočtech konstrukcí.

Současné přístroje pro měření vzdušné vlhkosti (kapacitní snímače vlhkosti, psychrometrické sondy, elektrolytické vlhkoměry a vlasové hygrometry) vykazují značné nedostatky spočívající v nedokonalém pokrytí měřeného rozsahu, v nelinearitách měření, případně vyžadují častou údržbu ve formě doplňování kapalin a chemikálií.

Z výše uvedeného důvodu vznikla myšlenka vytvořit měřící zařízení, které by těmito nedostatky netrpělo, bylo relativně finančně dostupné a bylo by ho možné využít jako učební pomůcku pro studenty v oboru mechatronika.

Teoretická část

2.1 Vlhkost vzduchu

2.1.1 Relativní a absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost vzduchu je definována jako hmotnost kapaliny $m(kg)$ rozpuštěné v jistém objemu vzduchu $V(m^3)$. To nazýváme absolutní vlhkostí Φ . [1]

$$\Phi = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}]$$

Relativní vlhkost φ (%) definujeme jako poměr absolutní vlhkosti aktuální $\Phi_m (kg \cdot m^{-3})$ vůči absolutní vlhkosti při nasycení vzduchu vodními parami $\Phi_M (kg \cdot m^{-3})$.

$$\varphi = \frac{\Phi_m}{\Phi_M} [\%]$$

2.1.2 Rozdělení metod měření vlhkosti vzduchu

- Změna kapacity
- Změna teploty povrchu
- Změna odporu
- Změna napětí chemikálie
- Změna délky látky

Změna kapacity

Změna kapacity využívá změny relativní permitivity $\epsilon_r (F \cdot m^{-1})$ ve svém okolí, která se následně projeví změnou kapacity $C(F)$ samotné sondy.

Výpočet kapacity:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{l} [F]$$

ϵ_0 permitivita vakua ($F \cdot m^{-1}$)

s je povrch sondy (m^2)

l je vzdálenost jednotlivých ploch sondy (m)

Změnu kapacity dále můžeme detekovat změnou napětí $U(V)$. Výpočet napětí:

$$U = \frac{Q}{C} [V]$$

Q je elektrický náboj(C)

Tohoto typu měření tradičně využívá Kapacitní sonda. Nevýhodou této sondy je velké zpoždění, omezený měřený rozsah z důvodu neschopnosti naměřit velmi suchý anebo téměř nasycený vzduch. [2]

Změna teploty povrchu

Sondy využívající změny teploty povrchu pracují s adiabatickým ochlazením, porovnávají teploty ze dvou termistorů. Příkladem zařízení využívajícího tuto metodu je Psychrometrická sonda, jejíž jedno tepelné čidlo je máčeno v destilované vodě a ofukováno ventilátorem. To způsobuje odpařování kapaliny na povrchu senzoru a jeho ochlazením získáme teplotu vlhkého povrchu $\vartheta_m(K)$. Druhý termistor měří aktuální teplotu okolí $\vartheta_s(K)$. Z rozdílu teplot potom můžeme spočítat velmi přesně relativní vlhkost $\varphi(\%)$. [3]

$$\varphi = \frac{p_M}{p_S} - \frac{A \cdot p_b}{p_S} \cdot (\vartheta_s - \vartheta_m)[\%]$$

p_M Naměřený tlak par(Pa)

p_S Tlak nasycených par(Pa)

A Psychrometrická konstanta(K^{-1})

p_b Barometrický tlak(Pa)

Změna odporu

Tato metoda měření funguje na principu změny elektrické vodivosti $G(R^{-1})$. Příkladem použití této metody je odporový senzor, jehož křivka měření je nelineární a nepokrývá celý rozsah vlhkosti (20 - 90%).[4]

Změna napětí chemikálie

Toto měření využívá chemického procesu, který odčerpává z okolí vlhkost a mění ho na elektrické napětí $U(V)$, které dále detekujeme snímači. Příkladem využití této metody jsou elektrolytické vlhkoměry. Tyto vlhkoměry se vyznačují velmi dobrou dlouhodobou stabilitou. Chemikálie v nich se ale musí pravidelně vyměňovat. V praxi se k měření využívá převážně chloridu lithného ($LiCl$).[5][4]

Změna délky látky

Změna délky látky využívá nasákavosti některých látek za přítomnosti vzdušné vlhkosti v jejich okolí. Tyto látky potom za různých vlhkostí mění svoji délku, která se dále přes pákový mechanismus přenáší na stupnici. Této metody využívají vlasové vlhkoměry, které pracují se změnami délky vlasu v závislosti na přítomné vlhkosti. Dokáží měřit v celém rozsahu vlhkosti a jsou přesnější nežli psychrometrické sondy. Jejich nevýhodou je nelinearita měření v rámci prodloužení a relativně dlouhá doba odezvy.

2.1.3 Aproximace vlhkosti

Pokud známe teplotu rosného bodu a dokážeme změřit teplotu okolí, tak můžeme za pomoci aproximace hustoty výparů určit vlhkost vzduchu.

Polynom [8] :

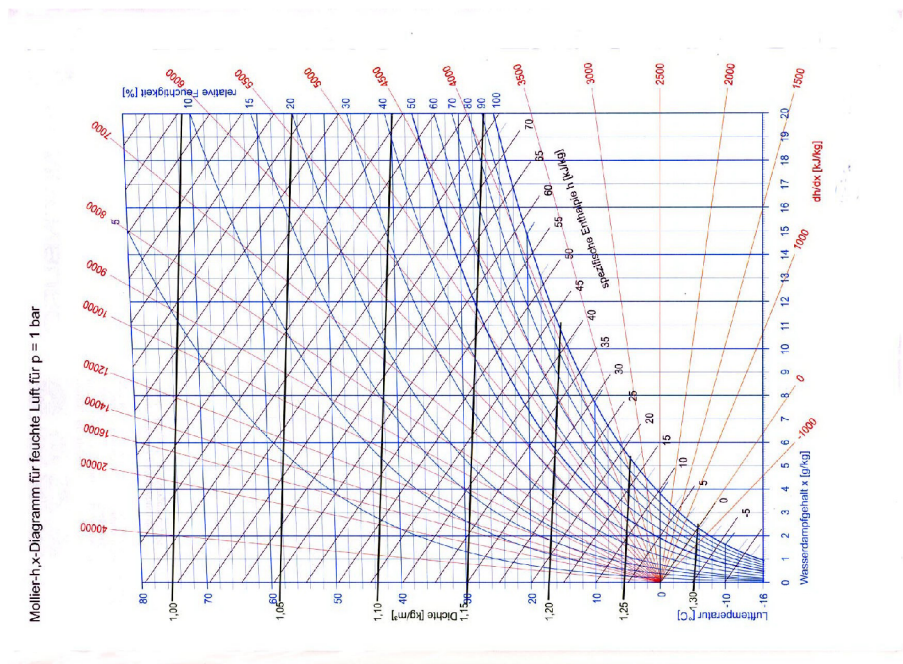
$$y = 5.018 + 0.32321 \cdot x + 8.1847 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 3.1243 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 \quad (2.1)$$

x je teplota rosného bodu ve ($^{\circ}C$)

y je hustota nasyceného vzduchu v ($kg \cdot m^{-3}$)

2.1.4 Rosný bod

Rosný bod je definován jako stav, kdy dojde k přesycení vzduchu vlhkostí. Přesycený vzduch začne uvolňovat vodní páry ve formě kapének - kondenzovat. V tento moment dosáhne relativní vzdušná vlhkost 100%. Přesycení vzduchu můžeme dosáhnout za pomoci snížení teploty vzduchu. Schopnost vzduchu držet vodní páry s klesající teplotou klesá. Důkazem tohoto jevu je Molliérův h-x graf.



Obrázek 2.1: Molliérův h-x diagram - zdroj: [6]

2.1.5 Metody dosažení rosného bodu

Z definice rosného bodu vyplývá, že rosný bod musí být tvořen za neměnného tlaku, a tak jediný další způsob jeho vyvolání je změnou teploty.

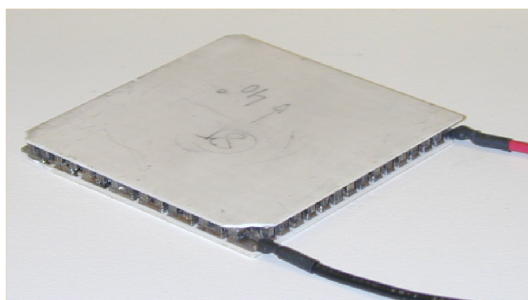
Isoentropická komprese

Teplotu v okolí můžeme změnit za pomoci chladících kompresorů. Dosahujeme

s nimi teplot do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Chladicí kompresory pracují na principu stlačení (komprese) ochlazovaného média, ochlazení stlačeného média a jeho následné rozpínání (expanze).

Peltierův jev

Peltierův článek využívá tzv. Peltierova jevu. Jev lze popsat tak, že elektrony s vyšší energií na jedné straně článku převezmou tepelnou energii s sebou napříč atomovou mřížkou a elektrony na druhé straně článku s nižší energií tuto tepelnou energii vyzáří do okolí. [13]



Obrázek 2.2: Peltierův článek - zdroj:[14]

Nevýhodou Peltierových článků je relativně snadné přehřátí polovodičů, velká spotřeba energie a nízká účinnost. Tepelný rozdíl Peltierových článků závisí na jejich vlastní teplotě, takže například při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dokáže Peltierův článek vytvořit tepelný rozdíl $41\text{ }^{\circ}\text{C}$, při $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ už jen $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1.6 Nepřímé metody stanovení rosného bodu

Změna vodivosti

V této metodě se používá speciální odporový snímač s vrstvou Al_2O_3 . Kondenzující kapalina se postupně dostává do pórů senzoru a tím snižuje jeho elektrický odpor. Nevýhodou tohoto senzoru je velká citlivost na nečistoty.

Změna kapacity

Metoda využívá změny kapacity porézního polymerového senzoru. Kondenzát rychle vyplní mikroprasklinky uvnitř senzoru a tím umožní detekci rosného bodu.

2.2 Přímá metoda stanovení rosného bodu

2.2.1 Optická metoda

Tato metoda využívá odrazu světla na odrazové ploše. V případě, že ochladíme plochu na teplotu rosného bodu, dojde na něm ke kondenzaci kapaliny. Vzniklá kapalina způsobí změnu intenzity světla dopadajícího na fotorezistor. Výhodou této

metody je přímé měření teploty rosného bodu a velmi vysoká přesnost. Za běžných výrobních podmínek se ale nevyužívá. [7]
Nedílnou součástí optické metody je geometrická optika.

2.2.2 Geometrická optika

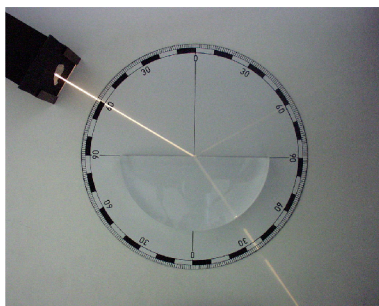
Lom světla (Refrakce) je moment, kdy dojde k přechodu složky paprsku na hranici rozhraní do druhého dielektrika. Známe-li vstupní úhel $\theta(^{\circ})$ paprsku a indexy lomu n_1 a n_2 , můžeme na pomoci Snellova zákona lomu spočítat úhel vstupu světla do látky.

$$n_1 \cdot \sin(\theta) = n_2 \cdot \sin(\theta_t) \quad (2.2)$$

θ_t je výstupní úhel ($^{\circ}$)

Odraz (Extinkce) je moment, kdy dojde k odrazu druhé složky paprsku na hranici rozhraní dvou dielektrik. Známe-li indexy odrazu k a k_t , můžeme spočítat úhly odrazu paprsku od látky. [9] [10]

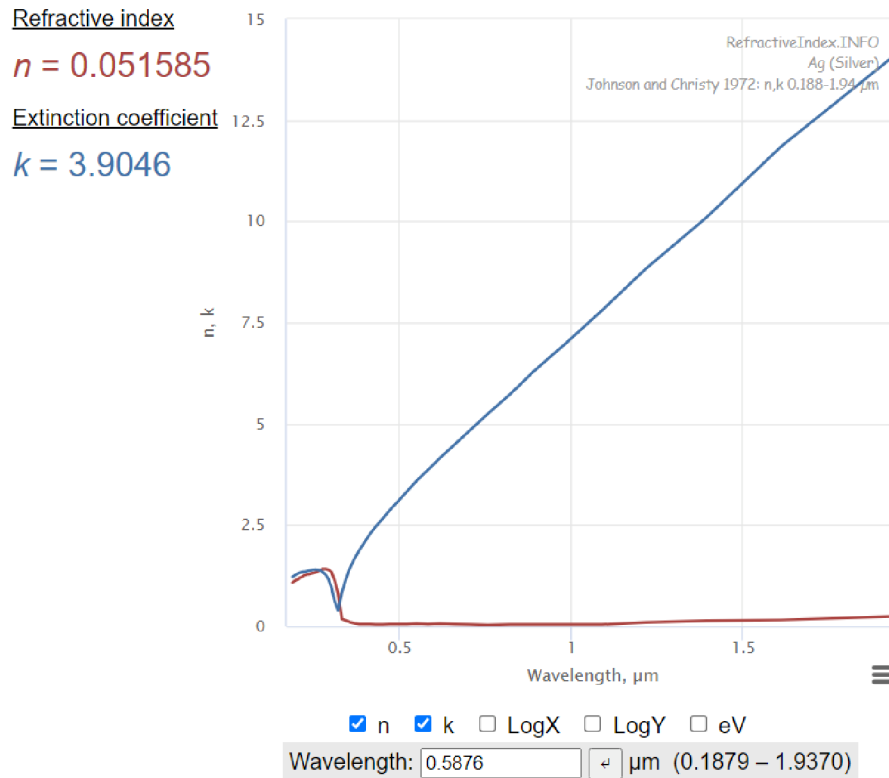
$$k \cdot r \cdot \cos(90^{\circ} + \theta) = k_t \cdot r \cdot \cos(90^{\circ} + \theta_t)$$



Obrázek 2.3: Lom světla - zdroj: [11]

2.2.3 Indexy lomu a odrazu

Index lomu i index odrazu závisí nejen na druhu materiálu, ale i na vlnové délce paprsku. Materiály mají schopnost jistou část paprsku absorbovat.



Tabulka 2.1: Ukázka indexů lomu a odrazu - zdroj: [12]

2.2.4 Lasery

Lasery fungují na principu absorpce fotonů s vyšší energií (příkladem modré světlo) a vyzařování fotonů o nižší energii (příkladem červené světlo). Fotony s vyšší energií jsou zachytávány optickým rezonátorem, který na jedné své straně odráží veškeré světlo a na druhé straně ho v omezené míře propouští. Propouští se pouze paprsek s předem určenou vlnovou délkou a směrem. Známe xenonové lasery, plynové lasery, argonové lasery, laserové diody a mnoho dalších. Laserové diody využívají polovodičového NP přechodu k vytváření světla (LED diody). Laserové diody se nacházejí v kopírkách, CD přehrávačích. Většinou mají malý výkon, do několika mW. [16]

Lasery řadíme do 4 základních bezpečnostních tříd

- Do třídy 1 se řadí lasery s výkonem 0,36 mW, dokáží být potenciálně nebezpečné pouze pro lidi s čůčkami nebo brýlemi, jinak jsou považovány za bezpečné.
- Do třídy 2 se řadí lasery s výkonem do 1 mW. Lasery této třídy dokáží poškodit lidské oko při přímém pohledu do zářiče laseru.

- Třída 3 a vyšší jsou lasery, které se už nesmí být podle Direktivy EU (2001/95/EC)[17] prodávány jako laserová ukazovátka, podskupina 3R do 4,99mW může potencionálně poškodit oko při kontaktu s přímým a odraženým paprskem. Lasery této a vyšší musí být uzavřeny v přístrojových obálkách. Podskupina 3B jsou lasery do výkonu 499.9 mW. Tyto lasery poškodí zrak při přímém kontaktu a odrazu, paprsek také dokáže pálit hořlavé materiály.
- Třída 4 do 10 W jsou lasery, které dokáží spálit kůži, protavit se hliníkovou plechovkou a řezat plexisklo. V experimentálních podmínkách jsou ve speciálně určených komorách, personál musí mít speciální ochranné brýle a musí být odborně proškolen.

2.2.5 PT senzory

Senzory PT (platinové) se tradičně vyrábějí ve dvou variantách, a to PT100 a PT1000, kdy číslovka za PT označuje výchozí rezistenci senzoru při 0 °C.

Tyto senzory jsou relativně drahé, vyznačují se ale vysokou přesností. Dělíme je dle přesnosti a jejich měrného rozsahu. Příkladem označení takového senzoru může být F 0,15 A, které zaručuje výchozí přesnost $\pm 0,15$ °C. Dále se vyznačují vysokou rychlostí detekce změny (ve vodě 0,3s) a vysokou dlouhodobou stálostí. Senzory PT jsou lineární, což výrazným způsobem ulehčuje výpočty teploty. U PT senzorů je nutné řídit tok proudu procházejícího obvodem, z důvodu ovlivnění měřené hodnoty.



Obrázek 2.4: Teplotní sonda - zdroj: [18]

2.2.6 NTC senzory

NTC senzory jsou termistory s negativním tepelným koeficientem. To znamená, že jejich rezistence se snižuje s rostoucí teplotou. Jsou relativně levné, přesnost u nich ovlivňuje jejich výchozí rezistence R_0 při výchozí teplotě T_0 25°C, která se může pohybovat od 10 kΩ do 100 kΩ.

Nevýhodou NTC senzoru je nelinearita měření, která způsobuje problémy při nízkém výpočtovém výkonu. Tento nedostatek lze řešit pomocí měření na dělicím můstku. Pro identifikaci optimální velikosti odporu rezistoru pro linearizaci můžeme provést výpočet a nebo ho přibližně odhadnout z 1/4 výchozí rezistence termistoru.

Křivka popisující TNC termistor:

$$R = R_0 \cdot e^{-B \cdot (\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})}$$

B je koeficient změny rezistence na teplotě T je aktuální teplota ($^{\circ}C$)

Výpočet optimálního odporu rezistoru pro linearizaci NTC termistoru:

$$R_s = R_i \cdot \frac{B - 2 \cdot T_i}{B + 2 \cdot T_i} \quad (2.3)$$

R_i je odpor termistoru v pracovní poloze (Ω) T_i je teplota termistoru v pracovní poloze (K)

2.3 Regulace

Regulace je snaha ovlivnit chování dynamického systému tak, aby na jeho výstupem byly požadované veličiny.

Obecné dynamické systémy lze za pomoci identifikace a Laplasovy transformace převést do obrazového přenosu charakteristické rovnice obsahují kořeny "s". Jmenovatel charakteristické rovnice definuje chování dynamického systému. Dynamický systém je nestabilní, pokud je alespoň jeden kořen "s" v pravé polorovině komplexních čísel (je kladný). Systémy ovlivňujeme regulátory, které zasahují do systému. U regulátorů rozlišujeme 3 základní proměnné. Proporcionální, derivační a integrační (regulátory PID), tyto proměnné nám ovlivňují stabilitu a reakci systému na požadovanou veličinu.

Rovnici regulátoru PID můžeme rozložit do následujícího tvaru:

Akční veličina = proporcionální složka + integrační složka + derivační složka

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \frac{d}{dt} e(t)$$

e je odchylka od žádané hodnoty

r_0 je proporcionální zesílení regulátoru

r_1 je integrační složka regulátoru

r_2 je derivační složka regulátoru

Rovnice ideálního regulátoru PID ve formě obrazového přenosu

$$R(s) = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2 s$$

2.3.1 Požadované chování dynamického systému při regulaci

Řízení dynamických systémů je nutno řešit individuálně. Obecně by regulovaný systém měl reagovat na požadovanou veličinu ustálením na cílené hodnotě s minimálním překmitem, s co nejvyšší možnou rychlostí a neměl by jevit známky nestability (dodatečné kmity).

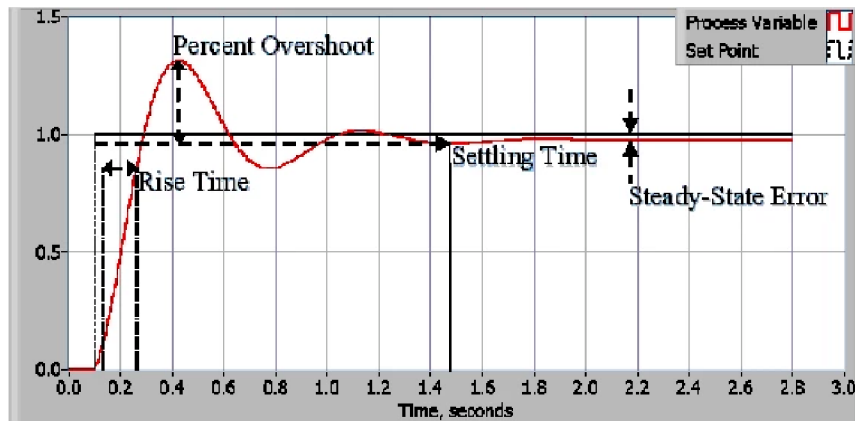


Figure 2: Response of a typical PID closed loop system.

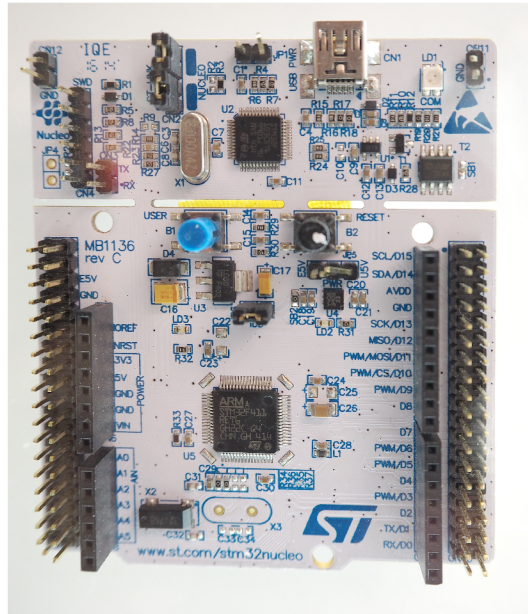
Obrázek 2.5: Systém regulovaný zpětnou vazbou PID regulátoru - zdroj: [26]

V praxi se za správné nastavení regulátoru dynamického systému považuje překmit do 2% zesílení, dovolují se 2 dodatečné kmity a rychlost zásahu odpovídající charakteru dynamického systému.

2.3.2 Vestavěné systémy

”Vestavěné systémy jsou specializované počítače, obsahující procesor, paměť, vstupní a výstupní periferie, které jsou dedikované k funkci ve větších strojích a zařízeních.”[19]

Vestavěných systémů je mnoho. Některé dokáží přepínat svoje výstupy dle požadavků uživatele (Nuklea). Některé se díky své jednoduchosti vejdou do krabičky od bonbonů Tic Tac (Arduino micro) a některé dokonce podporují celé operační systémy (Raspberry Pi). Umožňují nám kontrolovat zařízení, dokáží řešit jednoduché výpočty - číslicového regulátory - díky jejich schopnosti komunikovat s ostatními částmi zařízení.



Obrázek 2.6: Nukleo - zdroj: [20]

Nahrazují analogové signály pulzní šířkovou modulací PWM, dokáží měřit velikosti napětí (ADC), umí komunikovat za pomoci velkého množství protokolů (I2C, CAN, SPI, UART), mohou fungovat jako autonomní zařízení nebo kontrolovat větší celek (podobně jako PLC). V porovnání s PLC ale nemají nutné "realtime" obvody, postrádají ochranné části, zejména "watchdogy" a redundance. Pro průmyslové nasazení jsou proto nevhodné.

2.3.3 Polovodiče

Jedná se o materiály obsahující na jedné straně přebytek kladných nábojů (anoda) a na druhé straně přebytek záporných nábojů (katoda), rozhraní mezi nimi vytváří tzv.: oblast prostorového náboje (přehradu).

V případě, že přes klasickou polovodičovou diodu vznikne potenciál, který by způsobil tok proudu ve směru z katody na anodu, tak se velikost přehrady zvětší a proud znemožní průchod (Tento princip je dále použit u kapacitních diod). V opačném případě je velikost přehrady minimální a proud skrz ni prochází "bez odporu".

2.3.4 Tranzistory

Tranzistory můžeme rozdělit na 3 části: kolektor, emitor a báze. Tranzistorový jev vzniká, když se na bázi tranzistoru přivede malé napětí. Báze nestihne zachytit nosiče náboje a propustí je z emitorového přechodu na kolektorový přechod. Tranzistory dělíme na bipolární (BJT) a unipolární (FET), z toho nejznámější jsou MOSFETy. [15]

2.3.5 Komunikační protokoly

Komunikační protokoly jsou nedílnou součástí řízení větších přístrojových celků. Vestavěné systémy komunikaci využívají k řízení vnějších periférií. Standardně se využívá při komunikaci protokolů SPI, UART, I2C a CAN. [21]

SPI - Sériové periferní rozhraní

SPI využívá signálů CLK (clock), pro přenos hodinového signálu, MOSI (master output slave input) k přenosu vstupních signálů, MISO pro přenos výstupních signálů a pin CS, který určuje výběr zařízení. Rozvody CLK, MOSI a MISO se propojují na více zařízení současně, což umožňuje snížení počtu vodičů. Každé další zařízení vyžaduje připojení unikátního vodiče se signálem CS. Komunikace SPI je oproti I2C nebo UART rychlejší, jednodušší a může probíhat ve dvou směrech současně.

UART - Univerzální, asynchronní přijímač a vysílač

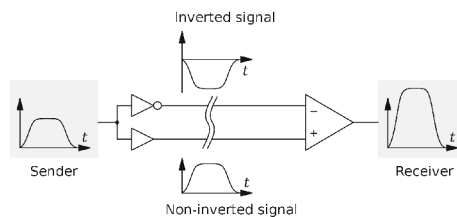
UART neobsahuje hodinový signál, využívá start a stop bitů v průběhu komunikace. Pro přenos dat používá komunikaci z Tx(transfer) a Rx(read) vodičů. Pro správnou komunikaci musí uživatel definovat, při jaké rychlosti bude komunikace mezi zařízeními prováděna (Baud rate). Tolerance chyby rychlosti komunikace mezi zařízeními navzájem musí být nižší než 3%. UART implementuje kontrolu komunikace, oznámení o příjmu, oznámení o přenosu, kontrolu parity, přeplnění zásobníku, ukončení komunikace v případě překročení jistého času.

I2C - Inter-Integrated-Circuit

I2C komunikuje prostřednictvím dvou signálů, SCL a SDA. SCL řídí hodinový signál a SDA přenáší jak vstupy, tak výstupy komunikace zařízení. I2C umožňuje propojovat větší množství zařízení najednou. Díky malému množství vodičů je I2C používáno k propojování velkého počtu periférií. Limitem počtu periférií je 128 zařízení a vodič k perifériím nesmí přesáhnout celkové kapacity vyšší 400pF.

CAN - Controller area network

CAN je průmyslový standard komunikace. Vyznačuje se nižšími rychlostmi, z důvodu charakteru posílaných dat a vestavěnými vícenásobnými funkcemi pro opravu dat. Dosah CANu je oproti předchozím komunikacím výrazně vyšší (až 1 km). Důvodem používání CANu pro průmysl je ten, že interní řešení komunikace po sběrnici je diferenční.



Obrázek 2.7: Diferenční komunikace - zdroj: [22]

2.3.6 Programovací jazyky

Programovací jazyky jsou nástrojem programátorů k vytvoření programů - postupů operací v počítači za účelem vytvoření konkrétního výsledku. Programovací jazyky můžeme rozdělit do dvou základních kategorií, a to: vyšší a nižší programovací jazyky. Příkladem vyšších jazyků jsou jazyky Python, C, C#, Java, C++ a nižších jazyků Assembler, strojový jazyk

2.3.7 Jazyk C

Programovací jazyk C je jeden z nejrychlejších a nejméně náročných programovacích jazyků. Jedná se o takzvaný neobjektový programovací jazyk. Oproti objektovým programovacím jazykům je v něm komplikovanější řešit rozsáhlejší datové struktury. Programátor musí řešit dynamické změny uvnitř paměti, její vyžádání a volnění dle potřeby. Programovací jazyk C se velice často objevuje v mikropočítačích a industriálních aplikacích, které vyžadují extrémně rychlé výpočty.

2.3.8 Jazyk C#

Programovací jazyk C# je objektový programovací jazyk vázaný na prostředí .NET. Je často používán v operačním systému Windows. Lze ho ale použít i na operačních systémech macOS a Linux. Je využíván k tvorbě aplikací, a to na základě GUI vykreslování nebo vykreslování za pomoci DirectX (vykreslování obrázků za pomoci GPU ve Windows). Oproti programování v C je přehlednější, má k dispozici výrazně větší množství funkcí. Paměť programů řeší C# za pomoci vestavěného adaptivního mazání dat. Díky systému výjimek dokáže programátora upozornit na problémy, které by například způsobily přetečení anebo pád aplikace. [23]

WPF aplikace

WPF aplikace jsou v současné době firemní standard vývoje aplikací. Umožňují vykreslovat 3D objekty za pomoci grafických karet, vytvářet animace, reakce na vnější vlivy (kliknutí na tlačítko nebo zmáčknutí klávesy).

2.4 Strojírenské technologie

Strojírenských technologie jsou nezbytnou součástí systému výroby. Příkladem strojírenské technologie může být vrtání, broušení, odlévání, frézování, soustružení, extruze, válcování, kování a mnoho dalších.

2.4.1 Vrtání a vyvrtávání

Vrtání je tvoření otvorů do plného materiálu. Využívá se zde rotačního řezného pohybu nástroje a jeho lineárního přísuvu ve směru otáčení. Vyvrtávání je rozšiřování již vytvořené díry. Rychlost otáček nástroje během vrtání určuje velikost odebírané třísky a také tolerance vytvořené díry. Slepé díry vytvořené vrtáním mají na svém konci kónus, způsobený tvarem nástroje. Mezi dokončovací operace vrtání se řadí vyhrubování a vystružování, které umožňují zajistit v otvoru potřebné rozměrové tolerance, kvalitu povrchu a kruhovitost. [27]

2.4.2 Pájení

Pájení je nerozebíratelný druh spojování materiálů, funguje na principu pojení (prolínání, případně difundování) dvou kusů materiálů pájkou, která má nižší tavnou teplotu než zbylé dva materiály. Pájení dělíme do dvou základních skupin: **Měkké** s použitím cínu nebo olova (do 60 MPa pevnosti v tahu) a **tvrdé**, používající měď a zinek (do 500 MPa pevnosti v tahu). Pájkou zpravidla chráníme přídatnými látkami - tavidly - zabraňující oxidaci pájky, snižující teplotu měknutí pájky a zlepšující její smáčivost. Pro pájení tištěných spojů se dále používají zahřívací křivky, které zaručují minimalizaci napětí na plošném spoji.[27]

2.4.3 Plasty

Plasty se skládají z organických sloučenin - makromolekul - dlouhých řetězců atomů složených převážně uhlíku a vodíku. Plasty dělíme na dva základní druhy: **termoplasty** a **reaktoplasty** (termosety). Termoplasty je možné opakovaným zahřátím uvést zpátky do kapalného stavu. Termoplasty mohou při zahřívání procházet krystalickou, případně amorfní přeměnou. Reaktoplasty můžeme dělit na řídké zesíťené (elastomery) a hustě zesíťené. Elastomery můžeme dále zesítovat vulkanizací. Plasty se vyznačují lehkostí, nižší pevností, nízkými teplotami tavení, dobrými izolačními vlastnostmi a jednoduchým zpracováním.[27]

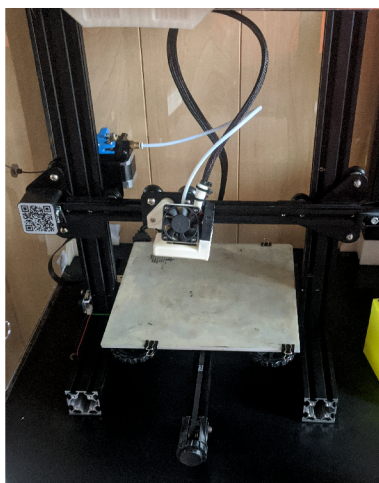
2.4.4 Technologie 3D tisku

V rámci strojírenských technologií je 3D tisk řazen do metod takzvané aditivní výroby. Využívá extruze nataveného plastu (filamentu) nebo kovového prášku (tavení laserem), který je po vrstvách nanášen na požadovaná místa. Výhodou 3D tisku je možnost výroby komplexních a často v praxi jinak nevyrobitelných tvarů. Je to klíčová součást moderních stylů návrhu - Fast Prototyping.

3D tiskárny

Většina v současné době dostupných 3D tiskáren využívá ke svému pohybu krokové motory, řemeny a závitové tyče. Ke kontrole svých pozic nevyužívají zpětnou vazbu, což v některých případech způsobuje komplikace. Jejich vyhřívaná deska a hot end (část sloužící k tavení filamentu) jsou regulovány jednoduchými PID regulátory. 3D tiskárny ke svému řízení používají soubory G-kód, které obsahují souřadnice pohybů, pomocné funkce nastavení výchozích parametrů.

V 3D tisku rozeznáváme 3 základní styly tisku. Plnění (infill), který se stará o pevnost konstrukce. Vytváření skořepiny, která má za úkol vyhladit vnější povrch tělesa a pomocné konstrukce (supporty), které umožňují tisknout těleso do prostoru. Nejnámější filamenty do 3D tiskáren jsou PLA, ABS a PETG.



Obrázek 2.8: Ukázka 3D tiskárny - Ender 3

PLA - Polylaktidová vlákna

Tento filament se vyznačuje nízkou tavnou teplotou (220 °C) a teplotou měknutí 50 °C. Při změnách teploty u něj nevzniká velké pnutí - je tisknutelný na otevřeném vzduchu. Oproti ostatním filamentům dosahuje menších pevností a je kompostovatelný.

ABS - Akrylonitrilbutadienstyren

ABS je filament, který se vyznačuje vysokou chemickou netečností, vysokými tavnými teplotami (250 °C) a teplotou měknutí 100 °C. ABS je amorfní materiál, po průchodu tryskou prochází skrze skelný přechod, který výrazně zvyšuje pevnost konstrukce. Nedostatkem ABS je výrazné pnutí a deformace.

PETG - Polyethylentereftalát

PETG má v porovnání s PLA lepší mechanické vlastnosti. Je pevnější, má vyšší teplotu měknutí. Oproti ABS netrpí na pnutí a stejně jako ABS se vyznačuje vysokou chemickou netečností. Nedostatkem PETG je tvoření vláken mezi spojovanými body.

Praktická část

3.1 Návrh zařízení pro přímé stanovení rosného bodu

3.1.1 Problematika optické detekce orosené plochy

Orosená plocha je ovlivňována atmosférickým tlakem, tokem vzduchu na jejím povrchu a teplotou. Abychom mohli rosný bod opticky detekovat, je nutné zjistit za jakých podmínek se jeho optické vlastnosti mění. Z důvodu měnících se podmínek měření je nutné zařízení pro optickou detekci orosené plochy "adaptovat" vždy na aktuální, konkrétní stav, například kompenzací změny světelných podmínek, změn okolní teploty. Rosný bod musíme dokázat detekovat a pokud možno, v rámci detekce, eliminovat hysterezi spojenou s přechodnými stavy kondenzujících tekutin. Optická detekce orosené plochy není jednoduchým ani standardizovaným postupem měření vlhkosti.

3.1.2 Postup

Pro přímé stanovení rosného bodu byla zvolena optická metoda, z toho důvodu byl navržen tento postup:

1. Najít mikropočítač pro ovládání zařízení
2. Zjistit úhel vhodný pro optickou detekci rosného bodu
3. Navrhnout základní komponenty a zjistit jejich rozměry
4. Vytvořit prvotní 3D model zařízení a z toho odvodit přibližné rozměry výsledného produktu
5. Vybrat vhodné senzory vnějších vlivů, vytvořit podpůrné mechanismy pro snímání veličin
6. Vytvořit 3D model splňující v plném rozsahu bezpečnostní a výrobní podmínky
7. Vytisknout zařízení na 3D tiskárně
8. Osadit zařízení součástkami
9. Nahrát firmware do mikropočítače
10. Vyřešit komunikaci mikropočítače a počítače

11. Vytvořit aplikaci umožňující ovládat zařízení
12. Zpracovat elektrotechnickou a výkresovou dokumentaci
13. Provést analýzu naměřených hodnot

3.2 Návrh zařízení

Optická metoda stanovení rosného bodu patří mezi nepřímé měřicí metody. Pracuje na principu změny odrazu světla produkovaného světelným záříčem na odrazové ploše. Hlavními prioritami návrhu byla funkčnost, bezpečnost zařízení, jednoduchost montáže, oprav a minimalizace ceny.

3.2.1 Výběr mikropočítače

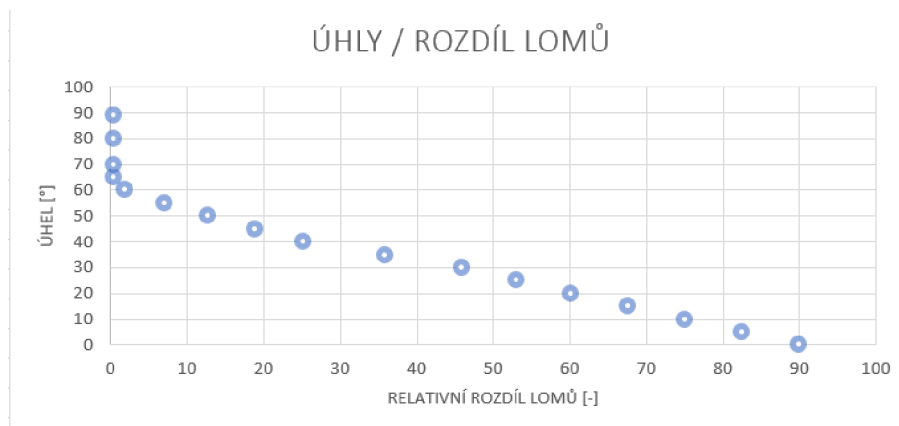
K řízení celého zařízení bylo nutné vybrat vhodný mikropočítač. Rozhodovalo se mezi architekturou od společnosti STMicroelectronics (Nukleo) a architekturou od společnosti Arduino Software (Arduino). Prvotní volbou byl typ Nukleo, a to z důvodu nulové finanční investice a vyššího výkonu mikropočítače. Přesto byl finálně zvolen typ Arduino Leonardo, neboť dosáhne lepšího poměru využití kapacity a relativně nízké ceny. Mírnou komplikací této volby byla komunikace s uživatelem, která musela být vedena po UARTu.

3.2.2 Návrh detekce rosného bodu - komponenty, postup

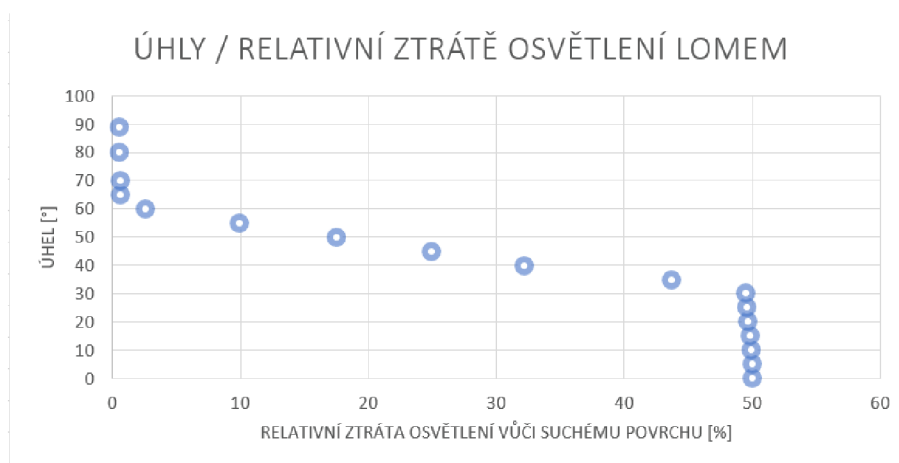
Jako světelný záříč byl zvolen laser KY-008 třídy 3R - 650nm, který je relativně levný a dostupný. Z indexů lomu jednotlivých látek, kterými světelný paprsek prochází, byla zpracována tabulka úhlů viz. příloha. Na základě této tabulky byl zvolen úhel, který byl v poměru rozměrů zařízení a ztráty osvětlení nejvhodnější.

Koeficienty lomu	650 nm
Vzduch	1,0003
Sklo	1,51
Voda	1,331
Hliník	1,558

Tabulka 3.2: Indexy lomu - zdroj: [12]

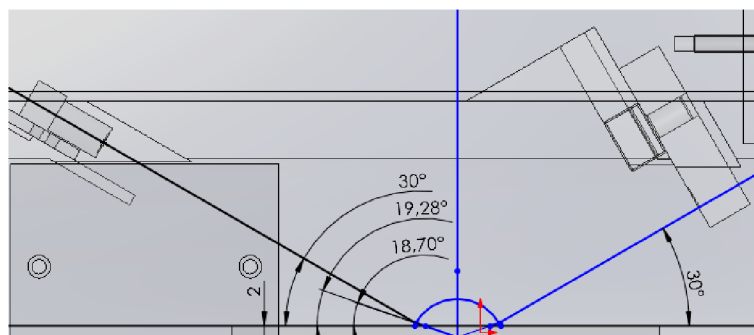


Obrázek 3.9: Graf lomu - zdroj: Příloha Tabulka rozdílů lomů



Obrázek 3.10: Graf lomu - zdroj: Příloha Tabulka relativního rozdílů lomů

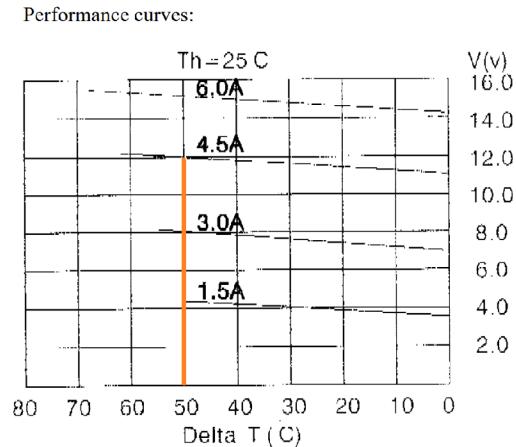
Z výše uvedených grafů vyplynulo, že úhly 90° až 60° vůči povrchu zrcadla neumožňují znatelnou detekci rosného bodu. Vzhledem k tomuto zjištění byl navržen úhel 30°. Pro dosažení co možná nejlepších výsledků měření bylo současně zvoleno černé zabarvení tělesa senzoru.



Obrázek 3.11: Úhly odrazů na 2 mm silném, oroseném skle zrcadla

3.2.3 Návrh komponent za účelem dosažení rosného bodu

Zařízení pro svou funkci vyžaduje ochlazení povrchu. Za tímto účelem byl volen **Peltierův článek** o výkonu 60 wattů, z důvodu jeho kompaktnosti a nenáročné montáže.



Obrázek 3.12: Výřez z dokumentace pro Peltierův článek - Výběr tepelného rozdílu - zdroj: Příloha: Elektro dokumentace

Peltierův článek dále také vyžaduje chlazení, proto byl zvolen **hliníkový chladič** se schopností rozptýlit 95 wattů tepelné energie. Důvodem předimenzování tohoto chladiče byla hlavně bezpečnost celého zařízení a zlepšení chladičích parametrů Peltierova článku.

Jako **zdroj energie** byl zvolen zdroj LRS 150 - 12 s výkonem 150W a napětím 12 V. Zdroj byl předimenzován z důvodu usazení do prostoru bez cirkulace vzduchu a zvýšení jeho životnosti.

Z elektro dokumentace ke zdroji bylo vypočteno, že trvalé maximální vytížení zdroje bude 36% a při produkci cca 7 W odpadního tepla. Zdroj bude ze sítě při tomto zatížení odebírat 0,66 A, proto byla naddimenzována proudová **pojistka** na hodnotu 0,75 A.

Chladič samotný by pro uchlazení Peltierova článku nestačil, proto bylo nutné dodat nucenou cirkulaci vzduchu, řešenou **ventilátorem**.

3.2.4 Návrh rozměrů zařízení

Na základě rozměrů chladiče s přihlédnutím ke zvolenému úhlu dopadu paprsku, byla stanovena odhadem přibližná délka tělesa senzoru. Tento odhad se následně projevil jako nedostatečný. Velikost tělesa senzoru byla proto upravena na průměr pracovního prostoru ventilátoru.

3.2.5 Návrh regulace

K regulaci Peltierova článku byl zvolen H-můstek BTS7960 s vestavěnými ochranami proti výpadku řídicího signálu, detekcí úniku proudu, podpětí a přepětí. Regulace ventilátoru byla zajištěna MOSFETem IRF520N. V rámci kontroly teploty zařízení a jeho chování byl použit PID regulátor ve zpětné vazbě se senzorem teploty a řadou dalších bezpečnostních pojistek. Proces PID regulátoru byl vzhledem k výpočetní náročnosti přesunut do aplikace na PC.

3.2.6 Návrh senzorky

K udržení požadované teploty povrchu byl použit senzor PT100-1020 od firmy TME. Pro jeho výstup byla zvolena 4 vodičová metoda měření, vedoucí do 15 bitového PT100 převodníku MAX31865. Ke kontrole teploty chladiče byl vybrán linearizovaný NTC termistor o impedanci 100 000 ohmů, umístěný do středu chladiče. Ke kontrole výchozí teploty a tlaku vzduchu byl použit integrovaný měřicí obvod od firmy Bosch BMP280. Měření paprsku bylo zajištěno fotorezistorem se zesilovačem od firmy M5Stacks. Pro kontrolu toku proudu byl využit integrovaný senzor proudu ACS712.

3.3 Modelování zařízení

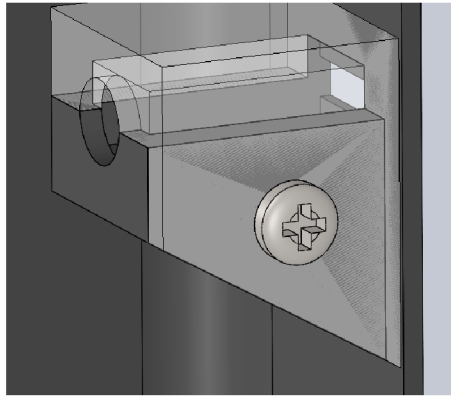
Modely zařízení byly vytvořeny v programu s názvem Solidworks. Z původně zamýšleného trubkovitého tvaru tělesa senzoru byl v průběhu vývoje zařízení vytvořen tvar kvádru, který lépe vyhovoval umístěným komponentám. V průběhu modelování vyšlo najevo, že by standardní výrobní postupy byly příliš nákladné, a proto byl zvolen 3D tisk. Modely byly modifikovány tak, aby minimalizovaly spotřebu filamentu. V rámci tvoření závitů byla zvolena metoda dotvarování děr tváření závitů šroubů tak, jak je to běžné u moderních plastových výrobků.

3.3.1 Volba tloušťky stěn těles

Tloušťka stěn pláště tělesa byla navržena na základě předchozích zkušeností s 3D tiskem a použitými filamenty. Odhadnutá minimální tloušťka stěn činila 2.25 mm na základě použitých rozměrů trysek 3D tiskárny. Pro těleso senzoru se tloušťka stěny řídila tvarem použitých komponent a jejich nároky na uchycení.

3.3.2 Řešení uchycení USB

USB koncovky mají normalizovaný tvar, ten je ale omezen na přípojnou část konektoru, ne však na jeho plášť. Z tohoto důvodu bylo nutné tyto rozměry pláště znova zaměřit a teprve potom vytvořit model úchytu. USB konektory, stejně jako zásuvky vyžadují tuhé uložení, aby nedošlo k nechtěnému odpojení nebo poškození zařízení. Za tímto účelem byl vytvořen speciální kryt USB s přesahem, který splňuje již zmíněné podmínky.



Obrázek 3.13: Ukázka řešení USB uchycení

3.3.3 Řešení uchycení zásuvky

Zásuvka elektrického napájení musí umožňovat bezpečné odpojení elektrické energie od zařízení a současně musí být umístěna na viditelném místě na zařízení. Tento požadavek byl vyřešen pomocí šroubů M3,5, kdy jeden byl veden skrz plášť zařízení a druhý procházel pláštěm a tělesem senzoru. Umístění zásuvky bylo zvoleno na horní straně modelu tak, aby bylo snadno přístupné.

3.3.4 Vzájemné uchycení tělesa senzoru a pláště

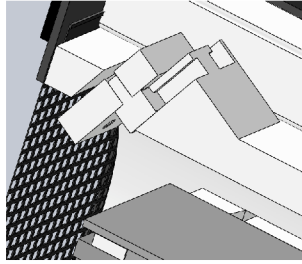
Na tělese senzoru byly vymodelovány "nožičky", jejichž úkolem bylo vytvořit prostor pro kabely a pro H-můstek. V průběhu modelování pláště byly tyto "nožičky" využity také k vymezení pozic a kolmostí stěn tělesa senzoru vůči plášti. Dále fungovaly jako přídržný mechanismus zdroje elektrické energie.

3.3.5 Řešení ochranné sítě

Ochranná síť zařízení je jeden z důležitých bezpečnostních prvků - zabraňuje fyzickému vstupu do pracovního prostoru zařízení. Přímý fyzický kontakt s potencionálně nebezpečnými komponenty musí být obsluze znemožněn, neboť chladič celého zařízení může dosáhnout teplot vyšších než 50 °C, povrch ochlazované odrazové plochy bodu mrazu a současně hrozí úraz elektrickým proudem. 3D tisk ochranné sítě je specifický podle typu tiskárny.

3.3.6 Řešení optického mechanismu

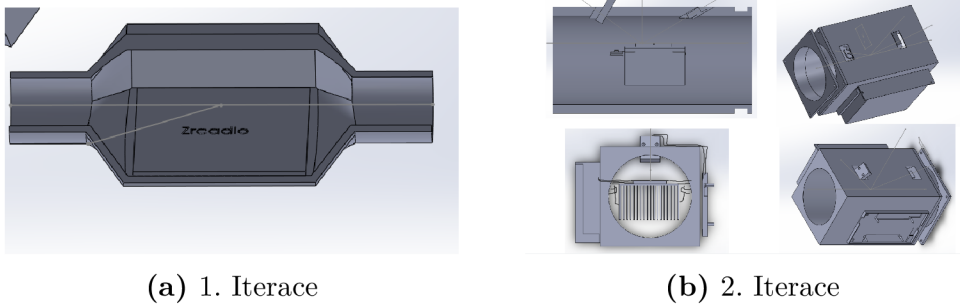
U optických mechanismů je nutné kompenzovat nepřesnosti senzoru způsobené nedokonalostmi sériové výroby. V tomto případě byl tento nedostatek kompenzován vytvořením drážek pro kameny držící optický senzor. Kameny v drážkách musí mít speciální tolerance znemožňující náhodný posun senzoru a zároveň musí disponovat jistou vůlí pohybu. Za tímto účelem byla zvolena přechodná tolerance drážek vůči kamenům.



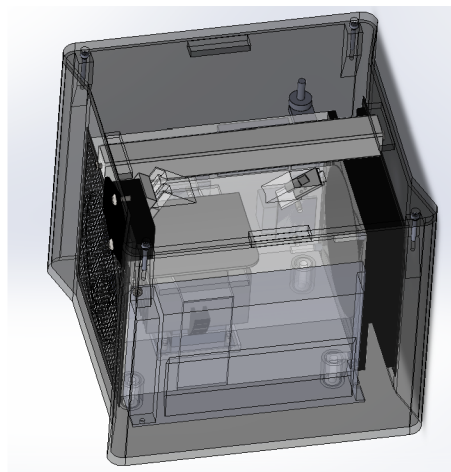
Obrázek 3.14: Ukázka řešení Optického mechanismu

3.3.7 Kompenzace pnutí

Jak již bylo uvedeno v 3.3 design tvaru pláště zařízení byl částečně vynucený uložením jednotlivých komponent. To ale mělo nečekané následky. Tvar "V" v rozích pláště způsobil pnutí zařízení a odchylku od plánovaných rozměrů na takové úrovni, že musel být kompenzován dodatečnou vnitřní příčkou.



Obrázek 3.15: Ukázka modelování



Obrázek 3.16: Finální model

3.4 3D tisk

K tvorbě jednotlivých dílů zařízení byla použita soukromá 3D tiskárna Ender 3 a současně bylo využito služeb laboratoře TUL "Bastlírna", která disponuje tiskárnami Prusa.

3.4.1 Zakázková výroba

Z počátku byla snaha vytisknout všechny díly na soukromé 3D tiskárně. To se ale vzhledem k nastalým problémům (defekt základní desky) stalo nereálné. Proto byla část výroby dílů zadána laboratoři "Bastlírna".

V rámci výběru filamentu byly voleny tyto druhy:

ABS pro držák chladiče, z důvodu vysoké teploty měknutí.

PLA pro výrobu pláště zařízení, víka zařízení, USB krytky, kamenů, ochranných sítí. Důvodem byla recyklovatelnost filamentu, v případě poškození.

PETG pro těleso senzoru, za účelem nutnosti minimalizace pnutí a lepší pevnosti. V rámci výplně tělesa byl zvolen styl "adaptive cubic" s 60 % výplní. Plášť zařízení, těleso senzoru a víko zařízení byly vyrobeny v rámci zakázky v laboratoři univerzity TUL. Tisk zakázky trval 113 hodin, bylo při ní spotřebováno 1,7 kg materiálu a stála 2218 Kč.

3.4.2 Vlastní výroba

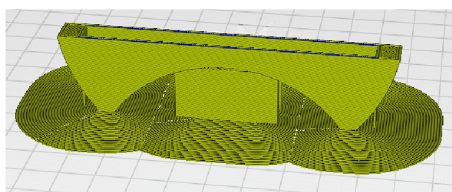
Jak je uvedeno v předchozím bodě, část výroby byla realizována na modifikované 3D tiskárně Ender 3.

Pro přípravu výrobního kódu byl použit program Ultimaker Cura a pro vlastní tisk filament PLA a ABS.

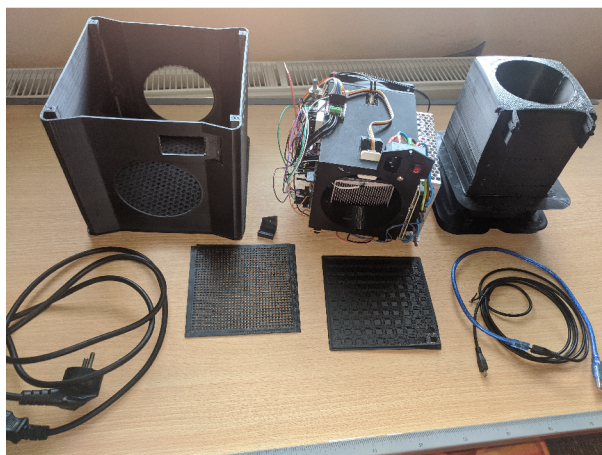
Pro tisk z PLA bylo zvoleno stoupání 0.16 mm s počáteční vrstvou 0.32 mm. Výplň byla nastavena na 40% a teplota tisku 225 °C.

Pro tisk z ABS bylo zvoleno stoupání 0.32 mm s počáteční vrstvou 0.32 mm. Výplň byla nastavena na 100% a teplota tisku 250 °C.

Vzhledem k charakteru tisknutých dílů držáku a kamenů byl ještě pozměněn průtok filamentu na 110%. Účelem této změny bylo vytvořit přesah, který se dal později zmenšit na přechodné uložení.



Obrázek 3.17: Ukázka modelu držáku chladiče v programu Cura



Obrázek 3.18: Ukázka nepovedených dílů a zapojené těleso senzoru

3.5 Zapojení

3.5.1 Obecné informace o zapojení

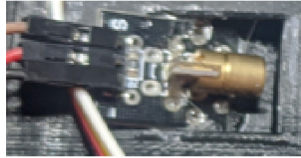
Zařízení bylo zapojeno a konstrukčně ochráněno v souladu s normou ČSN 33 2000-4-41 ED.3:413.1 – Zařízení třídy ochrany I. Při elektrickém zapojení byly jednotlivé vodiče naddimenzovány tak, aby vyhovovaly proudové zátěži jimi procházející. Pro silové rozvody 230V AC byly zvoleny vodiče průřezu 2mm^2 se značením dle normy ČSN EN 60446 Základní a bezpečnostní zásady při obsluze strojních zařízení – Značení vodičů barvami nebo číslicemi. Pro 12V silové rozvody byly zvoleny průřezy 1.5mm^2 a značení podle téže normy. Logické obvody byly barevně rozlišeny a zaznamenány do dokumentace. V rámci bezpečnosti byl zvolen typ krytí IP 20, vstupní otvory byly zaslepeny jednoduchou plastovou sítí.

3.5.2 Problémy s dokumentací komponent

Zprovoznění periferií bylo značně komplikované z hlediska velkých nedostatků v dokumentaci jednotlivých modulů. Specificky se jednalo o moduly KY-008 (laser), H můstek BTS7960 a teplotní senzor BMP280.

3.5.3 KY-008 laser

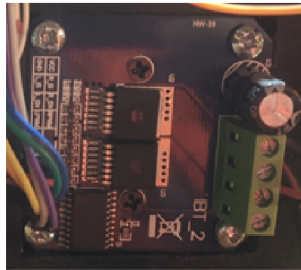
Během měření s KY-008 se na foto senzoru objevily nestability. Laser, díky neaktivní kompenzaci teploty ztrácel jas a při chlazení jas sílil. Změny byly tak výrazné, že bylo prakticky nemožné se zařízením měřit bez mnohaminutového ustalování teploty. Řešením byla oprava zapojení laseru. Ačkoliv v dokumentaci byl obvod zapojen bez kompenzačního rezistoru, po připojení kompenzačního rezistoru na 5V rozvodnou větev došlo k ustálení laseru a stabilita jasu se výrazně zlepšila. Dalšího zlepšení bylo dosaženo oddělením laseru od měřicí komory průhlednou lepicí páskou. V původní dokumentaci toto chybělo, viz příloha dokumentace eplanu KY-008.



Obrázek 3.19: KY-008

3.5.4 BTS7960

H-můstek BTS7960 vykazoval nedostatky ve funkcích ochrany a zápisu dat. Zásadním nedostatkem H-můstku bylo, že nereagoval na PWM o nulové hodnotě, což zapříčinilo, že v aktivním režimu protékal nepatrný proud (setiny ampér). Vady ochrany a řízení byly úspěšně odstraněny nebo kompenzovány. H-můstek vykazoval při aktivním stavu nepatrný únik proudu. Tento problém byl způsoben nesprávným zapojením integrovaných obvodů od výrobce a nebylo možné s ním nic udělat. Tato závada byla zaznamenána do přílohy Projektová dokumentace.



Obrázek 3.20: BTS7960

3.5.5 BMP280

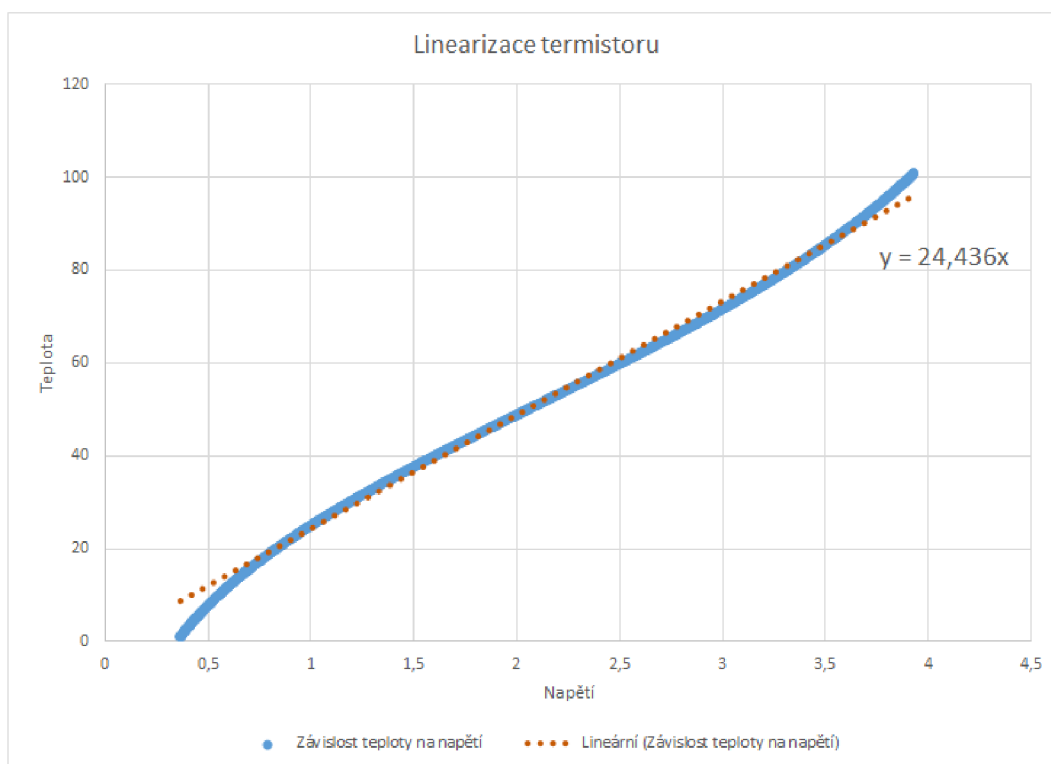
Ačkoliv byl senzor BMP280 na základě dostupné dokumentace zvolen jako vhodný pro tento typ zařízení, vykazoval následně poruchy při vlastní činnosti. V průběhu testování přístroje pro přímé měření rosného bodu docházelo k nečekaným reakcím, například: zařízení bez problémů komunikovalo za pomoci I2C sběrnice desítky hodin a následně po spuštění ventilátoru pro ochlazení senzor BMP280 přestával komunikovat. Vzhledem k tomu, že tento problém nebyl v dokumentaci řešen, bylo nutné tuto závadu odstranit systematickou metodou vylučování možných příčin. Jako první byla řešena EMC kompatibilita ventilátoru v okolí senzoru. Tento potenciální zdroj rušení byl experimentálně odstíněn za pomoci hliníkové fólie. Vzhledem k tomu, že závada i nadále přetrvávala, byl následně učiněn pokus s kompenzací poklesu napětí při spuštění ventilátoru kondenzátorem. Až po několika dalších testech senzoru bylo zjištěno, že pokud je senzor BMP280 plně připojený k napájení a I2C sběrnici, tak i při mírném výkyvu napětí u něho dojde k přepnutí do režimu spánku. To dále způsobí zastavení komunikace přes sběrnici. Řešením bylo připojit pin CS, držící výběr zařízení pro SPI a tím pádem i aktivní režim, na rozvod 3.3V (logické hodnoty pravda).



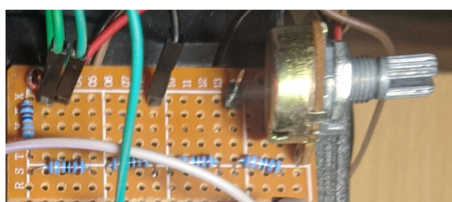
Obrázek 3.21: BMP280

3.5.6 Volba děliče pro NTC a výroba dělicího můstku

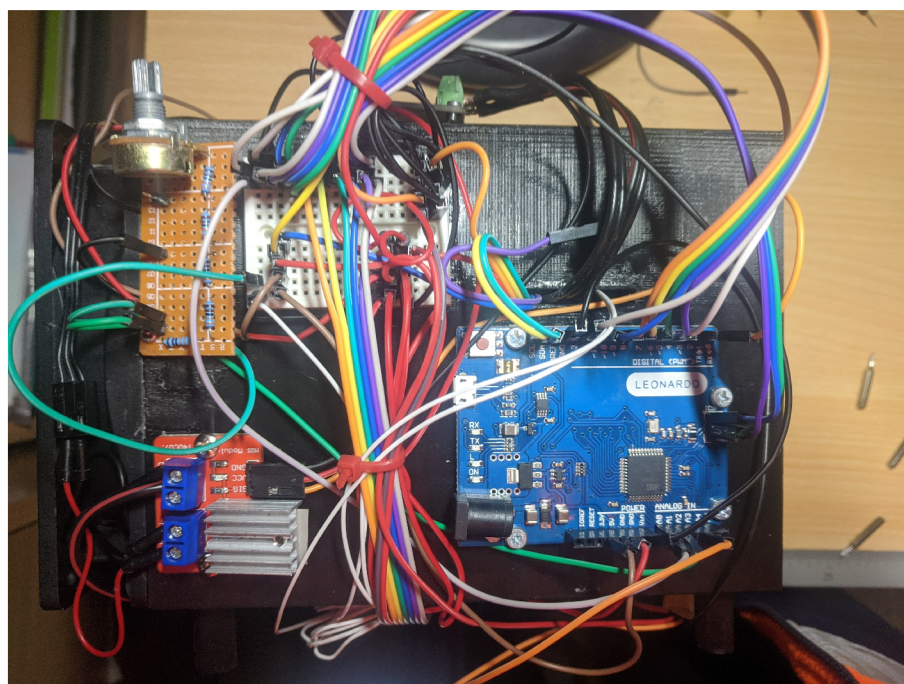
Dle teorie viz. 2.2.6 bylo nutné spočítat rezistor dělicího můstku. Po výpočtu dle vzorce 2.3 byla stanovena ideální rezistence odporu R_s na 32814Ω . Po ověření v tabulkovém procesoru byla tato hodnota méně lineární, nežli u 25000Ω , které byly určeny z praktické poučky viz. 2.3. Proto byla zvolena 2. varianta toho řešení. Z grafu bylo vyplynulo, že převodní poměr mezi naměřeným napětím (x) a teplotou (y) je $y = 24,436x$. Pro výrobu odporového děliče bylo zvoleno 5 $3,3k \Omega$ odporů společně s jedním $10k \Omega$ potenciometrem. Důvodem tohoto řešení byla optimalizace umístění jednotlivých vodičů a možnost korekce odporu děliče napětí bez nutnosti demontáže celého zařízení. Obvod byl seřízen multimetrem na požadované hodnoty.



Obrázek 3.22: Linearizace děliče napětí - zdroj: Příloha Tabulka Linearizace termistoru



Obrázek 3.23: Dělič napětí



Obrázek 3.24: Ukázka zapojení celého zařízení

3.6 Firmware Arduina

3.6.1 Postup vývoje

Vestavěný systém Arduino v zařízení pro přímé měření rosného bodu plní nejdůležitější kontrolní funkce, zajišťující správný provoz celého zařízení. Vestavěný systém Arduino byl naprogramován tak, aby svým provozem připomínal PLC komunikující s nadřazeným systémem. V tomto případě byl nadřazený systém PC. Vestavěnému systému Arduino byly přiřazeny funkce umožňující ovládání základních periferií a bezpečnosti. Řešení regulace, přechodových stavů a analýzy dat byly přenechány nadřazenému systému. Firmware vestavěného systému Arduino by rozdělén na segmenty pinout (mapa zapojení jednotlivých vstupů a výstupů), definice referenčních hodnot pro interní komunikaci zařízení, návod na sériovou komunikaci, rychlosti jednotlivých pracovních cyklů, zpracování vstupní komunikace, ovládání H-můstku a segment zpětné vazby komunikace. Zdrojový kód

obsahuje zbytky kódu pro použití relé za účelem zvýšené bezpečnosti zařízení. Tato funkce byla později nahrazena zvýšenou ochranou z pozice H-můstku. Kód pro relé byl ponechán z důvodu dalšího možného vývoje zařízení. Pro nahrání kódu bylo využito 50% paměti mikropočítače a obsazenost výstupů činila 55%.

```

1  if (READBUFFERSEGMENTED[6] == 1) {
2  if (thermo.readRTDAsync(rtd)) {
3    Internaltemp = thermo.temperatureAsync(rtd,RNOMINAL,RREF);
4  } // Internaltemp = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
5  };
6  if (READBUFFERSEGMENTED[7] == 1) {
7  };
8  //PWM rizeni - 490 Hz (piny 3 a 11: 980 Hz)
9  // pozn - pri pripojeni pinu 3 a 11 deska zamrzne
10 Hbridge_control(READBUFFERSEGMENTED[8]...
11 , READBUFFERSEGMENTED[9]...
12 , safety_current_left_on, safety_current_right_on);
13 Fan_control(READBUFFERSEGMENTED[10]); Hbridge FAN
14 //////////////////////////////////////
15 //// REPORT SEGMENT
16 // nacti hodnoty ze senzoru svetla
17 WRITEBUFFER = WRITEBUFFER +...
18 String(analogRead(IN_SENZOR_SVETLA)) + String(';');
19 // nacti hodnoty ze senzoru ěprostedí
20 WRITEBUFFER = WRITEBUFFER +...
21 String (ENV_TEMP, 6) + String(';'); //zápis teploty
22 WRITEBUFFER = WRITEBUFFER +...
23 String (ENV_PRES, 6) + String(';'); //zápis tlaku

```

Zdrojový kód 3.1: Ukázka kódu Arduina

3.6.2 Oprava knihovny a komunikace

Ani programování vestavěného systému Arduino se neobešlo bez problémů. Vestavěný systém Arduino odpovídal v rámci komunikace UART na příkaz jednou za sekundu a k tomu převodník MAX31865 blokoval každý cyklus 75 ms zpožděním. Řešením zmíněného sekundového zpoždění komunikace se stalo snížení timeout času pro sériovou linku. Vestavěný systém Arduino měl ve výchozím nastavení timeout 1000. Vzhledem k tomu, že tento detail nebyl v dokumentaci společnosti Arduino Software nijak poznamenán, trvala jeho náprava více jak měsíc. Další zmíněný problém, tentokrát s blokací cyklů, byl vystopován ke knihovně Adafruit pro MAX31865. Po vzoru [28] byla modifikována knihovna tak, aby fungovala neblokujícím způsobem, což zvýšilo takt snímání a odesílání dat na 60Hz. Oproti předchozímu stavu to bylo skoro pětinasobné zlepšení. Zdrojový kód knihovny viz. Příloha Projekt_rosný_bod_1.

3.7 C# Vývoj

Primárním účelem konzolové aplikace "Rosný bod konzola" byl vývoj funkcí umožňující řízení zařízení, vytvoření základních struktur a prostoru pro implementaci budoucího stavového automatu, vyřešení pojistných funkcí a základní implementace regulátoru. Později, během vývoje WPF aplikace byly tyto funkce znova použity a rozšířeny.

3.7.1 Certifikát

Z důvodu vývoje zmíněných aplikací v jazyce C# bylo nutné absolvovat kurz C# od společnosti Sololearn. V průběhu 3 týdnů byl kurz na jazyk C# dokončen a paralelně s tím byla nastudována učebnice programování v C# [23]. Výsledkem tohoto studia bylo získání znalostí dostatečných pro vývoj zmíněných aplikací.



Obrázek 3.25: Certifikát

3.7.2 Implementace komunikace

Komunikace s vestavěným systémem Arduino byla rozdělena do 3 částí.

- Třída SerialCOM byla implementována jako dědičná třída, třídy sériové komunikace. Obsahuje pomocné funkce pro čtení, zápis, řešení ukončení

komunikace, detekci Arduina [24] uvnitř registrů Windows 10 a identifikaci zařízení schopných sériové komunikace uvnitř registrů Windows 10. [25]

- Třída Serial Analyzer byla vytvořena k řešení převodů dat sériové linky na jednotlivé proměnné.
- Část hlavního procesu Main, pro syntetizaci jednotlivých požadovaných příkazů.

3.7.3 Rozbor sériové komunikace mezi zařízeními

Sériová komunikace byla vyřešena formou full duplex. Vestavěný systém Arduino posílá dynamicky tvořené stringy do počítače a z počítače se posílají staticky tvořené matice charů zpátky do mikropočítače. Znak ";" byl zde použit jako oddělovač mezi jednotlivými proměnnými.

Příklad komunikace z Arduina

```
1111;320;22.990000;1010.075600;509;972;22.72
```

1. 4 proměnné typu CHAR jsou bezpečnostní bity, které se vrací zpět do PC.
2. INT definující napětí na na fotorezistoru
3. FLOAT definující venkovní teplotu
4. FLOAT definující venkovní tlak v HPa
5. INT výstup ze senzoru proudu
6. INT výstup z linearizovaného NTC senzoru
7. FLOAR Výstup z PT 100

Příklad komunikace z PC

```
11111111;020;0;255
```

1. 4 proměnné typu CHAR jsou bezpečnostní bity, které se posílají z PC.
2. CHAR - povolení cyklu pro BMP280
3. CHAR - povolení cyklu pro MAX31865
4. CHAR - povolení cyklu pro H-můstek
5. UINT8 - PWM chlazení
6. UINT8 - PWM zahřívání
7. UINT8 - PWM ventilátoru

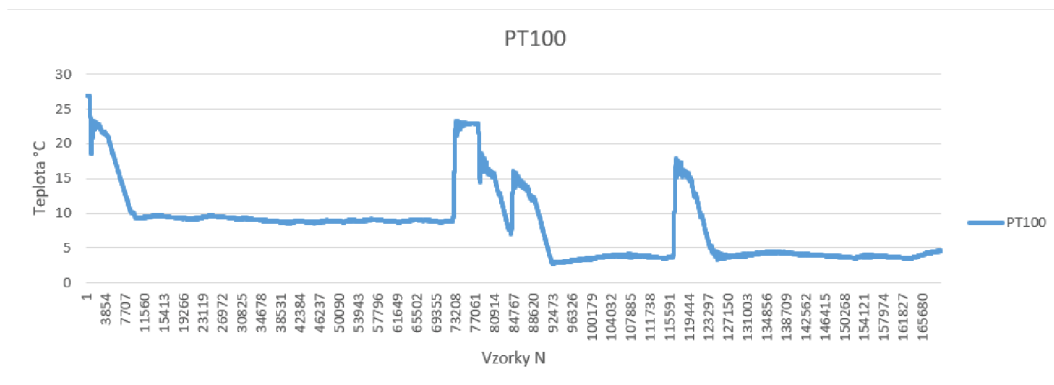
3.7.4 Regulátor

Implementace regulátoru byla vyřešena po vzoru přednášek TPR - PID s upínáním a kompenzací proti přetečení integrální složky.

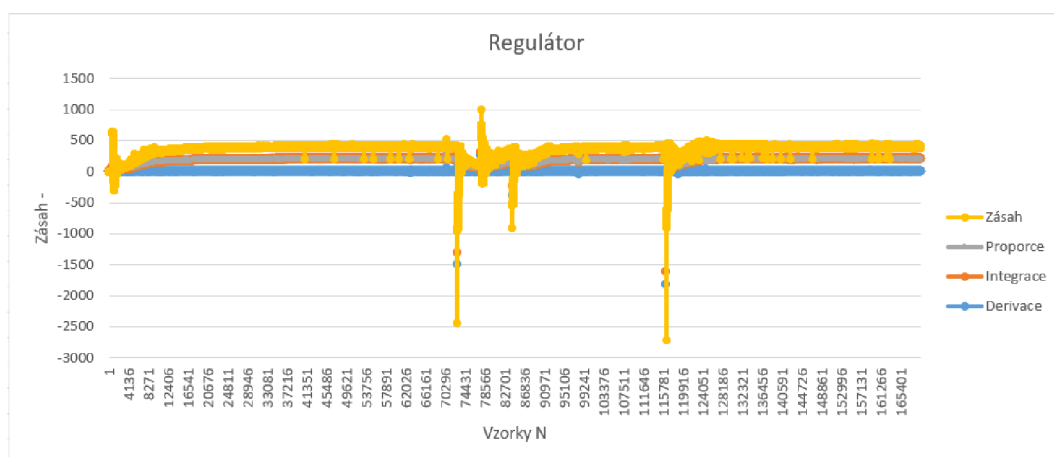
V průběhu vývoje aplikace byl problém se vzorkovací frekvencí zařízení. To komplikovalo regulaci systému a citelně snižovalo schopnost zařízení provádět měření. Praxe říká, že regulátor by měl mít přibližně desetinásobnou rychlost vůči ustálení dynamického systému, to na počátku vývoje nebylo možné.

Později, když byl problém se vzorkovací frekvencí vyřešen, bylo nastavení konstant regulátoru optimalizováno na jednotlivé druhy měření. Regulátor PID pro řízení v automatickém režimu byl nastaven na hodnoty $r_0 = 80$, $T_i = 14$, $T_d = 0,002$. Vzhledem k tomu, že automatické měření se chovalo jako dolnoprostupní filtr a zmírňovalo nestability systému, bylo toto nastavení regulátorových konstant vhodné.

Pro manuální režim byly zvoleny konstanty PID regulátoru $r_0 = 55$, $T_i = 14$, $T_d = 0,002$, které minimalizovaly překmit žádané hodnoty. Globálně byly výstupní hodnoty zásahu regulátoru omezeny v rozsahu od 1 do -0,04. Hraniční hodnota zásahu -0,04 byla nastavena za zajištění účelem bezpečnosti Peltierova článku. Úplná eliminace záporného zásahu nebyla provedena z důvodu kompenzace námrazy za extrémních podmínek.



Graf 3.1: Kontrolovaná veličina



Graf 3.2: Interní proměnné regulátoru - zdroj: Příloha

3.8 WPF aplikace

Vývoj WPF aplikace byl nejdůležitější a nejsložitější částí projektu. Databinding, práce s vlákny procesoru a blokace dat byly výzvou, a to jak z časového, tak znalostního hlediska. V učebnici programování C# [23], ani Sololearn nebyly tyto problematiky popsány do hloubky.

3.8.1 Vývoj WPF aplikace

WPF aplikace byla vytvořena dle norem programování. V průběhu programování WPF aplikace byly použity balíčky NuGet, které usnadnily vytváření grafů a implementovali Change Notify pro základní datové typy.

UI aplikace bylo rozděleno do 4 částí.

- Automatické měření
- Výsledky měření
- Manuální měření
- Softwarové konstanty

Uvnitř aplikace v záložce automatického měření a manuálního měření byl vytvořen "realtime" graf naměřených teplot Peltierova článku a dále několik textových polí, které vypisovaly teploty okolí, atmosférický tlak, hodnoty na fotorezistoru a vnitřní teploty na povrchu měřené plochy.

Automatické měření

Obsahuje ikonu "spustit měření", aktivující druhé vlákno aplikace, regulátor a funkci "findmode", která ve dvou režimech snižuje teplotu měřeného povrchu. V náběhovém segmentu ve výchozím nastavení zařízení provádí 0,3 °C kroky, při nichž vyhledává rosný bod. V případě nalezení rosného bodu provede záznam o překročení hranice jasové úrovně. Od rosného bodu se následně vzdálí zahřátím měřené plochy. Dále začne měřit měřícím krokem 0,05 °C a cyklus opakuje, dokud ho uživatel nevypne. Zařízení v automatickém režimu dokáže vychladit povrch až do -2 °C, ale z bezpečnostních důvodů bylo toto nastavení omezeno na 1 °C. Po stisknutí tlačítka "zastavit měření" zařízení deaktivuje funkci "findmode", nastaví regulátor na vnější teplotu okolí a vyčká do stabilizace teploty měřeného povrchu. Následně se vypne funkce regulátoru a zařízení vyčká 60 vteřin do vychlazení chladiče na 40 °C. V případě, že není dosaženo této teploty za 60 vteřin, tak se aktivuje tepelná pojistka a zařízení dochladí.

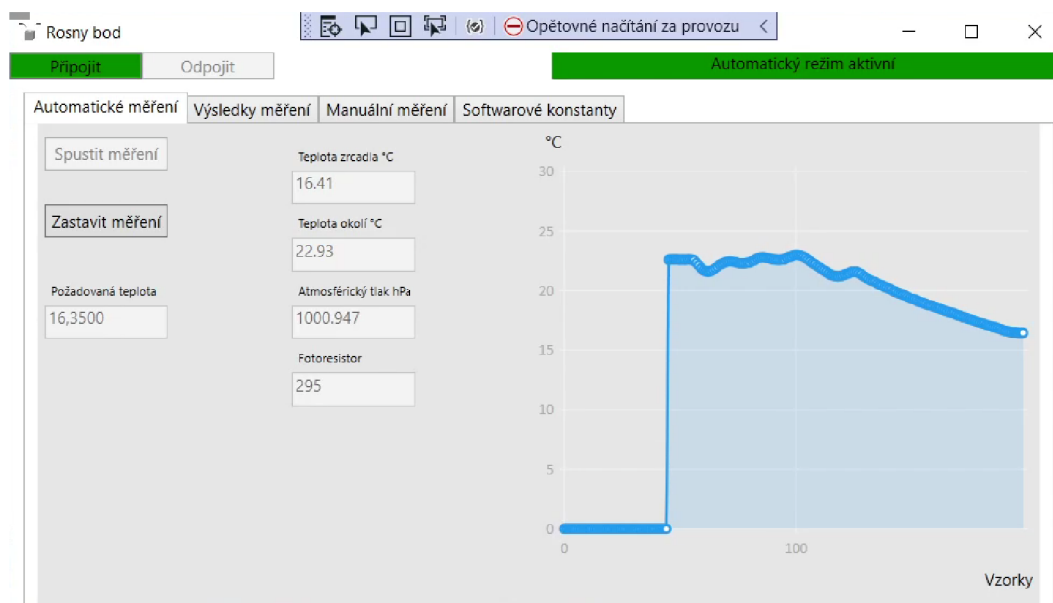
Softwarové konstanty

Softwarové konstanty jsou rozděleny do tří částí. Části přístupné bez hesla, část přístupná s heslem (viz. příloha návod k obsluze) a nepřístupná data. Část bez hesla obsahuje přímý zápis do sériové adresy, možnost debug logu, obsahujícího

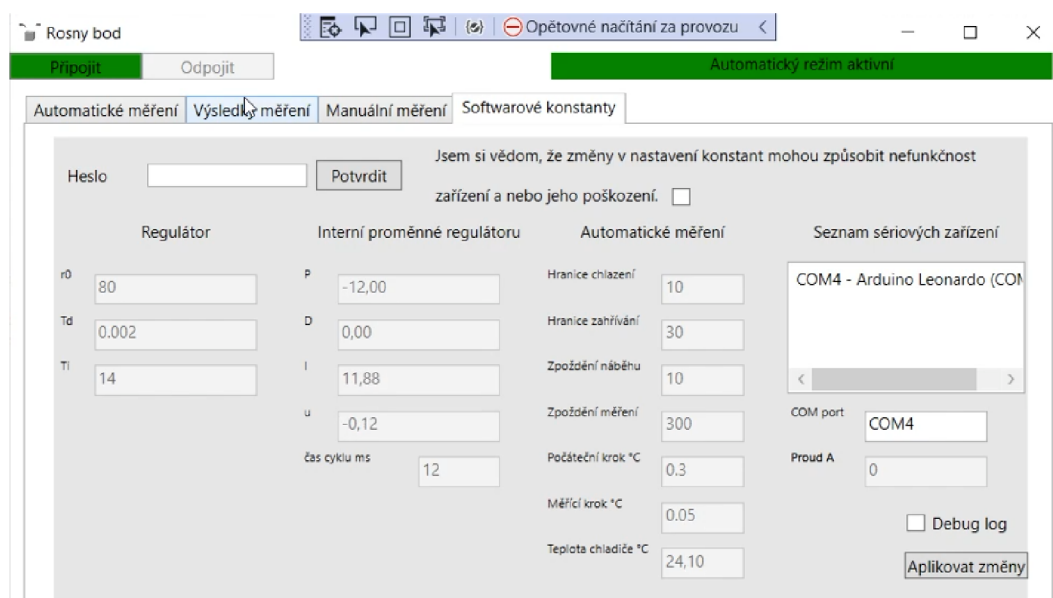
nej důležitější proměnné programu a možnost manuálně spustit ventilátor zařízení.

Část přístupná s heslem disponuje možností nastavování chování regulátoru, světelnou hranicí chlazení a zahřívání, zpoždění kroků, náběhovým a měřicím krokem.

Nepřístupná data obsahují interní proměnné regulátoru, finální regulační zásah a rychlost pracovního cyklu. Dále elektrický proud procházející Peltierovým článkem a teplotu chladiče zařízení.



Obrázek 3.26: Ukázka aplikace 1



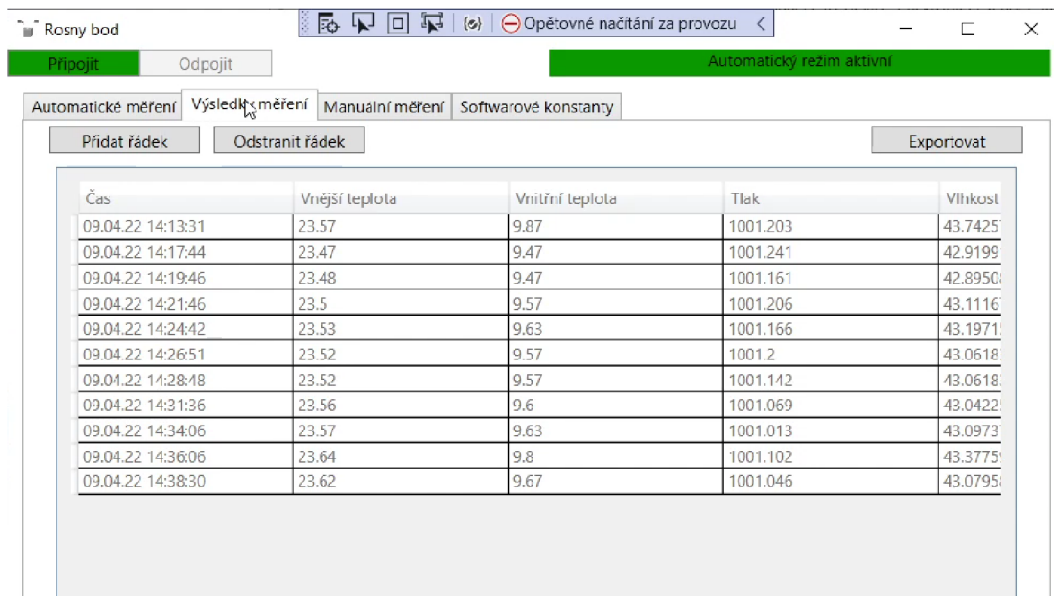
Obrázek 3.27: Ukázka aplikace 3

Manuální měření

Oproti automatickému měření má manuální měření o jednu položku navíc. Umožňuje uživateli přímo zapisovat hodnoty do textového bloku "požadované teploty". Uživatel tak může zvolit teplotu vpisovanou do regulátoru a měřit manuálně. Manuální měření nedovolí uživateli přesáhnout teplotu okolí (nepředpokládá se, že bude zařízení vystaveno 100% relativní vlhkosti) a zároveň teplotě nižší než 1 °C. Důvodem vytvoření manuálního režimu bylo zpřesnění měření, protože automatický režim trpí jistou nedokonalostí (hysterezí) z důvodu nestálosti světelného pozadí (řádově se jedná o 0.5% relativní vlhkosti).

Výsledky měření

V záložce výsledky měření je záznamová tabulka, která se dá upravovat v neaktivním režimu měření. Dají se do ní přidávat a odebírat naměřená data a exportovat do csv tabulky. V průběhu manuálního měření se přidání řádku mění na manuální záznam hodnot, který automaticky dopočítává relativní vlhkost.



Čas	Vnější teplota	Vnitřní teplota	Tlak	Vlhkost
09.04.22 14:13:31	23.57	9.87	1001.203	43.7425
09.04.22 14:17:44	23.47	9.47	1001.241	42.9199
09.04.22 14:19:46	23.48	9.47	1001.161	42.8950
09.04.22 14:21:46	23.5	9.57	1001.206	43.1116
09.04.22 14:24:42	23.53	9.63	1001.166	43.1971
09.04.22 14:26:51	23.52	9.57	1001.2	43.0618
09.04.22 14:28:48	23.52	9.57	1001.142	43.0618
09.04.22 14:31:36	23.56	9.6	1001.069	43.0422
09.04.22 14:34:06	23.57	9.63	1001.013	43.0973
09.04.22 14:36:06	23.64	9.8	1001.102	43.3775
09.04.22 14:38:30	23.62	9.67	1001.046	43.0795

Obrázek 3.28: Ukázka aplikace 2

Aplikace obsahuje 2 hlavní části. Main, který zprostředkovával komunikaci s uživatelem a 2. vlákno, řešící veškerou komunikaci, logiku, aktualizaci grafů a bezpečnost.

```
1 // Pokud doslo k uspesnemu navazani komunikace
2 if (ComPort.SerialLink.IsOpen)
3 {
4     ReadyForDisconnect = false;
5     // pokud je pusten pouze jeden thread
6     if (ThreadActive == false)
```

```

7  {
8  Connect_to_device.Background = Brushes.Green;
9  Disconnect_from_device.Background = Brushes.LightGray;
10 // Po pripojeni spust komunikaci
11 ComPort.SerialComWrite("11111111;001;001;000");
12 Thread workerThread2 = new Thread(() =>
13 {
14 //zablokovani pusteni dalsiho threadu
15 ThreadActive = true;
16 while (ReadyForDisconnect == false)
17 {
18 // Vezmi jeden prichozí string
19 string IncomingString = ComPort.SerialComRead();
20 if (ComPort.unexpected_termination)
21 {
22 ComPort.SerialLink.Close();
23 App.Current.Dispatcher.Invoke(() =>
24 {
25 Auto_Messuring_Results.Items.Refresh();
26 for (int x = 0; x < graphsize - 1; x++)
27 {
28 PointsPT100.RemoveAt(0);
29 PointsPT100_2.RemoveAt(0);
30 }
31 for (int x = 0; x < graphsize - 1; x++)
32 {
33 PointsPT100.Add(new ObservablePoint(x, TemperaturesList.ElementAt(x)));

```

Zdrojový kód 3.2: Ukázka založení vlákna

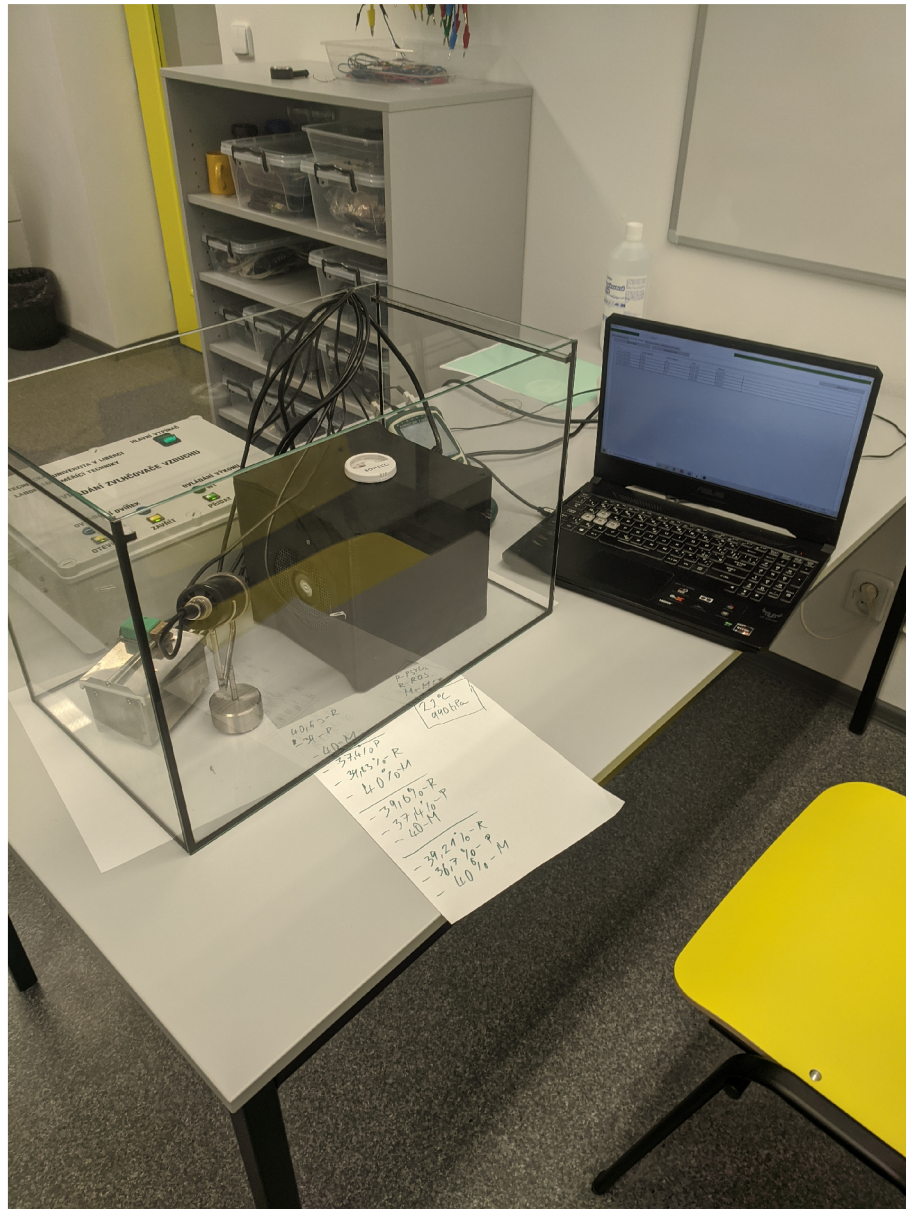
3.9 Závěrečné měření

Závěrečné měření bylo provedeno 21.04.2022, v laboratoři měření neelektrických veličin, v budově "H" TUL, za účasti vedoucího práce Ing. Jiřího Jelínka, Ph.D.

Pro závěrečné měření vlhkosti byla použita, jako reference, kalibrovaná psychrometrická sonda ALMENO s tolerancí 1% relativní vlhkosti. Dále bylo použito zařízení pro zvlhčování vzduchu, systém klimatizace, prototyp zařízení pro přímé stanovení rosného bodu a akvárium s víkem.

Původně byl v kontrolním měření použit i mechanický vlhkoměr Boneco Hygrostat - A7057. Hodnoty naměřené mechanickým vlhkoměrem byly prohlášeny v celém rozsahu za chybné, a proto nebyly uvedeny.

Měření bylo provedeno při okolní teplotě 22 °C a tlaku vzduchu 990 hPa



Graf 3.3: Pracovní stanoviště

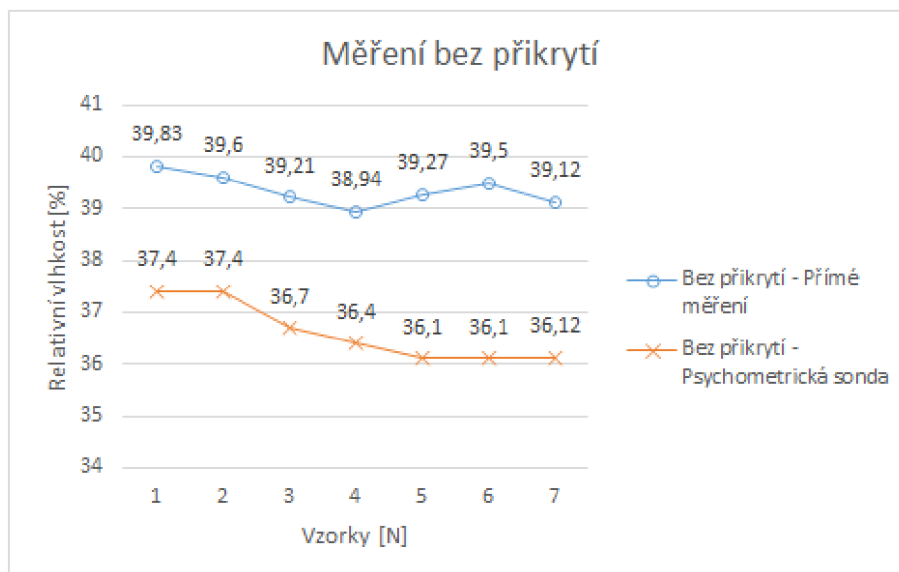
Měření s víkem akvária.



Graf 3.4: Graf naměřených hodnot s přikrytým akváriem

Během závěrečného měření prototypem přístroje a psychometrickou sondou v uzavřeném akváriu bylo dosaženo průměrné absolutní odchylky 1,47% relativní vlhkosti. Měřený rozsah byl od 35 % do 90 % relativní vlhkosti s teplotou okolí v rozsahu od 25 °C do 33 °C a tlakem vzduchu 990 hPa.

Měření bez víka akvária.



Graf 3.5: Graf naměřených hodnot bez přikrytého akvária

Během měření s nezakrytým akváriem bylo dosaženo průměrné absolutní odchylky 2,57% relativní vlhkosti.

3.9.1 Shrnutí měření

Vzhledem k naměřeným průměrným absolutním rozdílům relativní vlhkosti 1,47 % a 2,57 % považuji zařízení pro přímé stanovení rosného bodu za schopné správně měřit relativní vlhkost a detekovat rosný bod.

Graf "s přikrytým akváriem" obsahuje záznam měření hodnot vlhkostí z obou zařízení. Můžeme si v něm povšimnout, že dochází ke skokům naměřené relativní vlhkosti. Tyto vady byly vytvořeny kompenzačními funkcemi zařízení, dále se do záznamu promítla porucha řídicího programu. Zařízení (viz. 3.5.3) vzhledem k nestálosti jasu laseru při změnách okolní teploty muselo tento problém kompenzovat, což vynutilo návrat na teplotu okolí, obnovení referenční hodnoty světelného pozadí a opět klesnout na rosný bod. Další problém byl způsoben, tepelnou pojistkou, kdy se předpokládalo, že za normálního provozu zařízení nestoupne teplota měřené plochy na víc než 30 °C, což způsobilo aktivaci tepelné pojistky. Tento problém byl v průběhu měření opraven.

V grafu "bez přikrytého akvária" si můžeme povšimnout mírného snížení vlhkosti za pomoci systému klimatizace. Zvýšenou odchylku oproti referenčnímu měřidlu si můžeme vysvětlit vnějšími vlivy, například přítomností osob v okolí zařízení.

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, vytvořit a otestovat prototyp zařízení pro přímé stanovení rosného bodu. Vedlejším úkolem a současně motivem práce bylo vytvoření zařízení rozšiřující výuku MNV.

Práce se v teoretické části zabývala metodami měření vlhkosti vzduchu viz. 2.1.2 a nepřímými metodami stanovení rosného bodu viz. 2.1.6.

V praktické části byl navržen postup pro přímé stanovení rosného bodu viz. 3.2, proveden rozbor problematiky optické detekce orosené plochy viz. 3.1.1, navržen prototyp zařízení pro přímé stanovení rosného bodu viz. 3.2.3, zvolen mikropočítač. Dále vytvořen software pro komunikaci s uživatelem, pro zpracování dat viz. 3.2.1, 3.8, a k přístroji byla vytvořena dokumentace, viz. příloha.

V laboratořích MNV bylo provedeno měření viz. 3.9 za účelem otestování přesnosti a funkčnosti zařízení. Zařízení dokázalo úspěšně změřit vlhkost s průměrnou odchylkou 2,6% relativní vlhkosti.

Vedlejší cíl této práce, navržení softwaru a zařízení tak, aby mohlo být použito jako učební pomůcka, byl úspěšný. Zařízení bylo dále zařazeno jako učební pomůcka pro výuku MNV.

Zhodnocení oproti konvenčním přístrojům stejného typu:

Výroba a konstrukce zařízení stála 8 074 Kč. V porovnání s ostatními zařízeními pro přímé měření rosného bodu, jejichž cena se pohybuje od 55 900 Kč do 130 700 Kč bylo toto zařízení 7 až 16x levnější, navíc bylo vytvořené z normálně dostupných komponent. Konvenční přístroje dosahují přesnosti do 1% relativní vlhkosti a disponují rozsahem teplot od -40 °C do 90 °C rosného bodu. Přestože prototyp zařízení pro přímé měření rosného bodu dosahuje 2,6x horších tolerancí při menším rozsahu teplot (od 1 °C do 40 °C), dokáže spolehlivě měřit relativní vzdušnou vlhkost, je relativně levný, lehce opravitelný a lze ho využít při měření v laboratořích.

Bakalářská práce tak splnila svůj cíl.

Literatura

- [1] KUBERA, Miroslav, NEČAS, Tomáš a BENEŠ, Vojtěch. *Voda v atmosféře* [online]. Únor, 2020 [cit. 13. 4. 2022]. Dostupný z: <https://e-manuel.cz/kapitoly/plyny/vyklad/voda-v-atmosfere/>.
- [2] KRÍŽ, Milan. *Kapacitní měření vlhkosti* [online]. Listopad 19, 2019 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.ekotechnika.com/clanky/kapacitni-mereni-vlhkosti-princip-mereni-jak-funguje/>.
- [3] TEKÁČ, Viktor. *Stanovení vodní páry v odpadních plynech proudících potrubím* [online]. Květen, 2007 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://adoc.pub/stanoveni-vodni-pary-v-odpadnich-plynech-proudicich-potrubim.html>.
- [4] HANZAL, Josef. *Vlhkoměry Vývoj* [online]. Leden, 2004 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vlhkomery.html-0>.
- [5] LIŠKOVÁ, Miluše. *Měření vlhkosti vzduchu Úkol měření* [online]. 2016 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://docplayer.cz/3154125-Mereni-vlhkosti-vzduchu-ukol-mereni.html>.
- [6] SPERLICH, Volker. *Mollierův h-x diagram* [online]. 2002 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Feuchte_Luft_h-x-Dia.jpg.
- [7] *Rosný bod stlačeného vzduchu a jeho měření* [online]. Leden, 2019 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/poradna/mereni-teploty-rosneho-bodu/>.
- [8] NAVE, Rod. *Relative Humidity* [online]. 2017 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html>.
- [9] MALÍ, Petr. *Optika*. Karolinum, Praha, 2. edition, 2014. ISBN: 978-80-246-2793-9.
- [10] LEPIL, Oldřich, BEDNAŘÍK, Milan a ŠIROKÁ, Miroslava. *Fyzika: sbírka úloh pro střední školy*. Prometheus, Praha, 3 edition, 2003. ISBN: 978-80-7196-266-3.

- [11] SÁNDOR, Zátonyi. *Lom* [online]. 2005 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F%C3%A9ny%C3%B6r%C3%A9s.jpg>.
- [12] CIDDOR, Philip E. *Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared* [online]. *Applied Optics*, 35(9):1566, Březen 1996. 1996 [cit. 13.4.2022]. DOI: 10.1364/AO.35.001566.
- [13] STATE, Alfred. *How is heat transferred in a Peltier / Thermoelectric module* [online]. Červen, 2017 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://thermoelectricsolutions.com/how-is-heat-transferred-peltier-module/>.
- [14] *Peltier element* [online]. Červenec, 2006 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=923323>.
- [15] JERMÁŘ, Jakub. *Tranzistorový jev* [online]. 2018 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/TRANZISTOR/POPIS.HTM>.
- [16] KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>.
- [17] PATINGS, Ingrid. *Laserpointer law in Europe* [online]. [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.rapexlasers.eu/laserpointers/law>.
- [18] *Pt100 teplotní sonda Pixsys BF 6x100 3m* [online]. [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.logitron.cz/images/0/d624551bc02ce419/2/pt100-teplotni-sonda-pixsys-bf-6x100-3m.jpg>.
- [19] HEATH, Steve. *Embedded systems design*. Newnes, Oxford ; Boston, 2 edition, 2003. ISBN: 978-0-7506-5546-0.
- [20] *Embedded World 2016 - ST STM32 Nucleo F411RE T6 mit ARM Cortex M4* [online]. Únor, 2016 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Embedded_World_2016,_Stm32_Nucleo.jpg.
- [21] YIDA Kwee. *UART vs I2C vs SPI - Communication Protocols and Uses* [online]. Zář, 2019 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/>.
- [22] Hensen, Gutten pá. *Diferencial signal* [online]. Zář, 2021 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Differential_signal_transmission.svg.
- [23] VIRIUS, Miroslav. *Programování v C#: od základu k profesionálnímu použití*. Grada, Praha, 2021. ISBN: 978-80-271-1216-6.
- [24] *How to auto-detect Arduino COM port?* [online]. Březen, 2011 [cit. 19.4.2022]. Dostupný z: <https://stackoverflow.com/a/5397732>.
- [25] *Getting Serial Port Information*[online]. Květen, 2010 [cit. 19.4.2022]. Dostupný

- z: <https://stackoverflow.com/a/2876126>.
- [26] National instruments corp. *PID Theory Explained*[online]. [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>.
- [27] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1., Nauka o materiálech, 1. díl*, volume 2007. Scientia, Praha, 2007. ISBN: 978-80-86960-26-5.
- [28] *MAX31865 Library Removing Delay*[online]. Zaří, 2020 [cit. 13.4.2022]. Dostupný z: <https://forum.arduino.cc/t/max31865-library-removing-delay-changing-to-non-blocking-method/672925/3>.

Seznam příloh

1. EPLAN - ELEKTRODOKUMENTACE
2. NÁVOD K OBSLUZE A ÚDRŽBĚ
3. PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE
4. VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE
5. 1x CD s výpočty, záznamy měření, zdrojovými kódy pro aplikaci a soubory pro výrobu