

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

ANNA KADLUBCOVÁ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

**INKUBAČNÍ KOMORA S NUCENOU CÍRKULACÍ
A NOTIFIKACÍ STAVU**

INCUBATION CHAMBER WITH FORCED CIRCULATION AND CONDITION NOTIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Kadlubcová

VEDOUCÍ PRÁCE

ADVISOR

Ing. Jiří Sekora

BRNO 2021



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Anna Kadlubcová

ID: 211667

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Inkubační komora s nucenou cirkulací a notifikací stavu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se se senzory pro měření teploty a vlhkosti. Prostudujte metody řízení a regulace. 2) Navrhněte řídicí systém pro inkubační komoru s nucenou cirkulací, který bude umožňovat notifikaci stavu uvnitř komory. 3) Proveďte systémový návrh zařízení a návrh řídicího software. 4) Realizujte navržené zařízení a ověřte jeho funkčnost. 5) Zařízení bude umožňovat nastavení teploty až do 45 °C s přesností na 1 °C, monitorování vlhkosti a možnost připojení přes síť Ethernet (WiFi).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WILSON, Jon S. The digital signal processing handbook: theory, design, and implementation. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010, 1 sv. The electrical engineering handbook series. ISBN 978-1-4200-4604-5.

[2] WILSON, Jon S. Sensor technology handbook: theory, design, and implementation. Boston: Elsevier, c2005, ix, 691 p. Engineering. ISBN 07-506-7729-5.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 28.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje sensorům, zejména teploměřům a vlhkoměřům, způsobu měření a regulace teploty v inkubační komoře. Hlavní část práce se věnuje návrhu, realizaci a testování zařízení. Inkubační komoru lze temperovat na teplotu, kterou lze nastavit v uživatelském rozhraní. Notifikace stavu se zobrazuje na webové stránce přes WiFi síť.

KLÍČOVÁ SLOVA

Arduino, inkubační komora, inkubátor, nucená cirkulace, řízení teploty, senzor teploty, senzor vlhkosti, WiFi, WeMos D1 R1, ESP8266

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with sensors, especially thermometers and hygrometers, the method of measuring and regulating the temperature in the incubation chamber. The main part of the thesis is focused to the design, implementation and testing of the device. The incubation chamber can be tempered to a temperature that can be set in the user interface. Status notification is displayed on the website via WiFi network.

KEYWORDS

Arduino, forced circulation, humidity sensor, incubation chamber, incubator, temperature control, temperature sensor, WiFi, WeMos D1 R1, ESP8266

KADLUBCOVÁ, Anna. *Inkubační komora s nucenou cirkulací a notifikací stavu*. Brno, 2021, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Inkubační komora s nucenou cirkulací a notifikací stavu“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych srdečně poděkovala panu Ing. Jiřímu Sekorovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení, konzultace, trpělivost, ochotu, pomoc, čas, podporu při řešení a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	9
1 Senzory	10
1.1 Rozdělení senzorů	11
1.2 Základní charakteristiky	13
1.2.1 Statické vlastnosti senzorů	14
1.2.2 Dynamické vlastnosti senzorů	16
1.2.3 Ostatní vlastnosti senzorů	17
1.3 Teplotní senzory	17
1.3.1 Odporové kovové senzory teploty	18
1.3.2 Polovodičové senzory teploty	20
1.3.3 Monolitické PN senzory teploty	23
1.3.4 Termoelektrické články	24
1.4 Senzory vlhkosti	25
1.4.1 Odporové senzory vlhkosti	26
1.4.2 Kapacitní senzory vlhkosti	27
1.4.3 Senzory vlhkosti tepelné vodivosti	28
2 Vytápění	29
2.1 Topná tělesa	29
2.1.1 Základní charakteristiky topných těles	29
2.1.2 Rozdělení topných těles	29
2.2 Způsoby vytápění	30
2.2.1 Sálavé teplo	30
2.2.2 Konvekční způsob vytápění	31
2.2.3 Ohřev vody nebo jiného média	32
2.3 Cirkulace vzduchu v buněčných inkubátorech	32
3 Návrh zařízení	33
3.1 Definice požadavků systému	33
3.2 Blokové schéma	33
3.3 Výběr komponentů	34
3.3.1 Senzor teploty	34
3.3.2 Senzor vlhkosti	34
3.3.3 Řídící jednotka	34
3.3.4 Displej	35
3.3.5 Ovládání	35

3.3.6	Vytápění	35
3.3.7	Ventilace	35
3.3.8	Napájení	35
3.4	Programové řešení	36
3.4.1	Firmware řídicího mikrokontroléru	36
3.4.2	Uživatelské rozhraní	39
4	Realizace zařízení	40
4.1	Blokové schéma	40
4.2	Výběr komponentů	41
4.2.1	Mikrokontrolér	41
4.2.2	Snímání teploty a vlhkosti	41
4.2.3	Vytápění	43
4.2.4	Ventilace	44
4.3	Programové řešení	46
4.3.1	Popis firmware	46
4.3.2	Uživatelské rozhraní	51
5	Experimentální ověření návrhu	53
5.1	Měření v laboratoři	53
5.1.1	Měření 1	53
5.1.2	Měření 2	54
5.2	Diskuze výsledků	55
	Závěr	56
	Literatura	57
	Seznam příloh	61
	A Protokol z měření č. 1	62
	B Protokol z měření č. 2	65

Seznam obrázků

1.1	Schéma senzoru	10
1.2	Inteligentní senzor	11
1.3	Statická přenosová charakteristika	15
1.4	Teplotní závislosti odporových senzorů teploty	19
1.5	Platinový odporový teploměr	20
1.6	Závislost odporu termistoru na teplotě	22
1.7	Křemíkový teplotní senzor	23
1.8	Terminologie měřícího řetězce termoelektrického článku	24
1.9	Struktura odporového senzoru vlhkosti	27
2.1	Konvekční způsob vytápění	31
3.1	Blokové schéma zařízení	33
3.2	Vývojový diagram systému	37
3.3	Vývojový diagram menu	38
3.4	Schéma menu	39
4.1	Blokové schéma realizovaného zařízení	40
4.2	Senzory DHT	42
4.3	Výkonový rezistor	43
4.4	Schéma zapojení spínače MOSFET s výkonovým rezistorem	44
4.5	SEPA ventilátor	45
4.6	PWM	45
4.7	ESP8266 D1 R1	46
4.8	Vývojový diagram řízení teploty	48
4.9	Vývojový diagram: webová stránka, nastavení požadované teploty	50
4.10	Sériový monitor	51
4.11	Webová stránka	52
5.1	Graf závislosti teploty na čase při ohřevu na 27 °C	53
5.2	Graf závislosti teploty na čase při ohřevu na 42 °C	54

Úvod

Inkubační komora nebo také inkubátor je zařízení pro regulaci teploty a dalších parametrů v uzavřeném prostoru, čímž se v něm vytváří „ideální“ podmínky. Existují dva základní typy inkubátorů a to neonatologický a laboratorní. Neonatologický inkubátor se používá pro předčasně narozené novorozence a laboratorní se naopak používá pro pěstování buněčných kultur. Inkubační komory se využívají mezi jinými taky pro líheň a odchov zvířat nebo jejich vajíček [9].

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s problematikou měření teploty a vlhkosti v inkubátoru. Dále je v rámci práce seznámení s metodami řízení a regulace vytápění. V neposlední řadě je práce věnována samotnému návrhu a realizaci inkubační komory s nucenou cirkulací a notifikací stavu. Komora by měla být konstruována tak, aby vyhovovala pěstování buněčných kultur *in vivo* nebo umělému odchovu vajíček plazů. Teplota v inkubátoru by měla být možná nastavit s přesností na 1 °C. Zařízení umožní snímání teploty a vlhkosti, které bude protokolovat v podobě webových stránek.

První dvě kapitoly se věnují rešerši v oblasti senzorů a vytápění. Je zde zmíněna definice senzorů, jejich rozdělení, ale i charakteristiky. Jedná se především o senzory snímající teplotu a vlhkost. Dále je popsáno rozdělení a charakteristiky topných těles. Jsou zde blíže popsána elektrická topná tělesa. V další části kapitoly jsou metody vytápění. Na konci je zmínka o buněčných inkubátorech a jejich rozdělení dle konvence neboli cirkulace.

Další část této práce se zabývá vlastním návrhem a realizací experimentálního prototypu inkubační komory. Funkčnost zařízení byla ověřena a byla provedena laboratorní měření. V práci jsem narazila na mnoho slepých uliček, a proto se realizované zařízení liší od původně plánovaného návrhu v semestrálním projektu.

1 Senzory

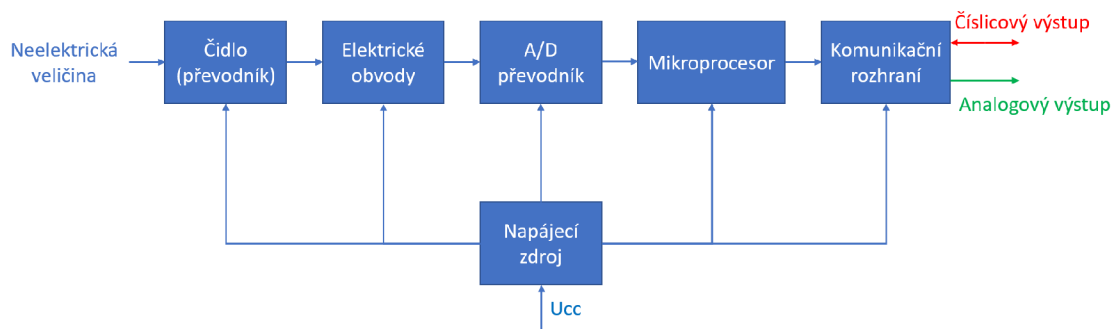
Senzor je často definován jako zařízení, které přijímá a reaguje na signál nebo podnět. Tato definice je velmi široká. Jinak lze senzor popsat jako zařízení, které převádí fyzický jev na elektrický signál nebo jako zařízení určené k měření a snímání požadovaných vlastností fyzikálního, chemického či biologického charakteru. Obecně je senzor definován jako zařízení reagující na podnět, stav prostředí (měřenou veličinu) a převádějící jej na výslednou odezvu nebo informaci (výstupní veličinu). Pojem senzor je ekvivalentní pojmu snímač nebo detektor.

Stav sledované veličiny snímá citlivá část senzoru, která se občas označuje jako čidlo, a zpracovává vyhodnocovací obvod senzoru. Výstupem z vyhodnocovacího obvodu senzoru je kvantitativní, často elektrický signál, který lze zpracovat dalšími řídicími obvody. V obecném principu činnosti senzoru, znázorněném na obr.1.1, si lze všimnout, že senzor snímá měřenou veličinu a dále ji transformuje na signál (napěťový, proudový, číslicový), ten se zesílí a filtruje od vyskytujícího se šumu (šum sítě, šum senzoru, šum zesilovače a parazitní šum). Takto upravený analogový signál je A/D převodníkem převeden na digitální signál. Další úpravu po případné digitalizaci a zpracování už zajišťuje mikrokontrolér.



Obr. 1.1: Obecné schéma principu činnosti senzoru, upraveno z [34] .

Významnou část tvoří senzory polovodičové a z nich pak hlavně mikroelektronické senzory, které jsou mnohdy slučitelné s integrovanými obvody. Tato oblast je zaměřená na jednočipové inteligentní senzory, označované jako SMART převodníky, respektive SMART senzory. Inteligentní senzor (smart senzor) v sobě zahrnuje vlastní čidlo, obvody pro úpravu signálu, A/D převodník, mikroprocesor pro zpracování a analýzu signálu a obvody pro komunikaci s okolím. Schéma smart senzoru je znázorněno na obr.1.2. Strukturu inteligentního senzoru můžeme rozdělit na tři části: vstupní část, vnitřní část a výstupní část. Vstupní část zajišťuje vstup měřených veličin, převádí je na elektrickou veličinu a tu převádí na vhodný, případně i normovaný elektrický signál. Vnitřní část zpracovává vstupní signál, zajišťuje nastavení nulové hodnoty, kompenzaci vlivů okolí, linearizaci v celém rozsahu vstupních veličin, autokalibraci měřicí funkce, autodiagnostické funkce. Výstupní část zajišťuje komunikaci senzoru s následnými zařízeními, signalizaci vlastní funkce a stavu, případně převod číslicového signálu na normalizovaný analogový výstupní signál, signalizaci měřené veličiny.



Obr. 1.2: Schéma principu činnosti inteligentního senzoru, upraveno z [27].

Pro využití běžných senzorů v systémech pro automatizované zpracování dat jsou navrhovány a vyráběny tzv. inteligentní sensorové moduly. Tyto inteligentní moduly s připojenými běžnými senzory jsou funkčně velmi podobné inteligentním sensorům, to znamená mají více přepínatelných vstupů, programovatelné zesílení, řízení a rozhraní umožňující komunikaci s dalšími moduly [11, 15, 23, 27, 29, 41].

1.1 Rozdělení senzorů

Senzory lze dělit podle několika různých hledisek. Schémata klasifikace senzorů se pohybují od velmi jednoduchých až po složitá.

Nejjednodušším dělením je podle typu napájení, a to buď aktivní nebo pasivní. Aktivní senzor je senzor, který funguje jako zdroj energie (nejčastěji elektrické) díky působení snímané veličiny (převod termoelektrický, piezoelektrický, indukční). U pasivních senzorů je na rozdíl od aktivních senzorů nutné napájení. Pasivní senzor je senzor, u kterého je nezbytné elektrickou veličinu (odpor, indukčnost, kapacitu) dále transformovat na analogový napěťový nebo proudový signál, přičemž měřící veličinou je amplituda, kmitočet, fáze aj. [11, 17, 20, 25, 29, 41].

Dělení podle druhu vstupní veličiny na

- teplotní – teplota, tepelný tok, atd.
- elektrické – napětí, proud, odpor, kapacita, atd.
- magnetické – UV záření, IR záření, RTG záření, atd.
- mechanické – měření rychlosti, akcelerace, síly, tlaku, průtoku, atd.
- geometrické – měření polohy, posunutí, atd.
- chemické – koncentrace iontů, pH, atd.
- biologické – koncentrace enzymů, analýza DNA, atd..

Dělení podle druhu výstupní veličiny na

- elektrický signál – senzory odporové, indukčnostní, indukční, kapacitní
- optické veličiny – změna barvy nebo jasu
- mechanické veličiny – posunutí ukazatele.

Výstupní signál lze dále rozdělit na analogový a digitální.

Dělení podle fyzikálního principu na

- odporové
- indukčnosti
- indukční
- kapacitní
- magnetické
- piezoelektrické
- pyroelektrické
- optoelektronické
- optické vláknové
- chemické
- biologické.

Dělení podle principu převodu

Senzory jsou rozděleny podle principu převodu měřené veličiny na veličinu výstupní.

Rozdělujeme senzory s:

- fyzikálním převodem – převod je realizován zvoleným fyzikálním dějem (převod mechanicko-elektrický a jevy termorezistivní, piezoelektrický, Hallův jev, atd.)
- chemickým převodem – převod je založen na chemické reakci probíhající na rozhraní analyt - senzor (adsorpce, absorpce, ...)
- biochemickým převodem – tvoří samostatnou část chemických senzorů, ke své činnosti využívají biologicky aktivní látky.

Dělení podle styku senzoru s měřeným prostředím

- bezdotykové
- dotykové – v robotice se dále dělí na proximální a taktilní.

Dělení podle signálu na výstupu

- napěťové
- proudové
- frekvenční
- s přímým digitálním výstupem.

Dělení podle převodu neelektrické veličiny

Senzory jsou rozděleny podle složitosti převodu měřené veličiny na veličinu výstupní.

Rozlišujeme:

- senzory s jednoduchým převodem – vstup se mění přímo na výstup

- senzory s několikanásobným převodem – vstup se mění na jinou veličinu a tato se pak mění buď na další veličinu nebo na výstup.

Dělení podle výrobní technologie

- | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|
| • elektromechanické | • elektrické | • polovodičové |
| • mechanické | • elektronické | • mikroelektronické |
| • pneumatické | • elektrochemické | • optoelektronické. |

Vlastnosti senzorů lze vzájemně srovnávat na základě kritérií jako přesnost, rozsah, výstupní signál, parazitní vlivy apod. Shrnutím těchto srovnání dostaneme skupiny senzorů, které se od sebe kvalitativně liší.

Vytváříme tak jednotlivé generace. V současnosti rozlišujeme tyto generace senzorů:

- **1. generace:** Sensory, pro jejichž konstrukci se využívá základních fyzikálních jevů.
- **2. generace:** Typické pro tuto skupinu senzorů je využití polovodičů a fyzikálních jevů s polovodiči spojených. Sensory druhé generace se vyznačují výrazně lepšími parametry. Hledají se nové fyzikální jevy, nové materiály. Dochází k částečnému nebo úplnému sloučení elektronické části informačního řetězce s čidlem - vznik hybridních nebo integrovaných senzorů.
- **3. generace:** Rychlý vývoj v optických systémech si žádá dokonalejší senzory. Sensory s možností napojení optických vláken na jiné vlnovody nebo na laserové paprsky souhrnně nazýváme mikroelektromechanickými systémy.

1.2 Základní charakteristiky

Základní charakteristiky určují vlastnosti parametrů senzorů. Tyto charakteristiky jsou dány technologií výroby senzoru a ovlivňují vlastnosti celého měřícího zařízení. Parametry charakterizující základní statické a dynamické vlastnosti senzorů. Statické parametry vyjadřují vlastnosti při neměnném (DC) nebo velmi pomalu měnícím se signálu. Dynamické parametry vyjadřují chování na rychle měnícím se signálu (odezva na skokovou změnu nebo harmonický signál). Lze shrnout takto [11, 29]:

Statické parametry

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| 1. kalibrační křivka | 4. korekční charakteristika |
| 2. citlivost | 5. plný rozsah |
| 3. práh citlivosti | 6. dynamický rozsah |

- | | |
|------------------------|--------------------------------------|
| 7. hystereze | 13. dlouhodobá stabilita (drift) |
| 8. rozlišení | 14. selektivita |
| 9. rychlost odezvy | 15. aditivní a multiplikatívni chyby |
| 10. doba odezvy | 16. linearita |
| 11. signál pozadí | 17. parametry výstupu |
| 12. reprodukovatelnost | |

Dynamické parametry

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1. přechodová charakteristika | 5. šíře frekvenčního pásma |
| 2. frekvenční charakteristika | 6. frekvenční rozsah |
| 3. parametry časové odezvy | 7. rychlost číslicového přenosu |
| 4. časová konstanta | 8. parametry šumu. |

Jako základní požadavky na parametry senzorů může být chápána jednoznačná závislost výstupní veličiny na veličině měřené, velká citlivost senzoru, vhodný průběh základních statických charakteristik, velká přesnost a časová stálost, minimální závislost na vlivech okolního prostředí, minimální zatěžování měřeného objektu, vysoká spolehlivost, velmi nízká pořizovací cena a nízké náklady na provoz a taky jednoduchá údržba a obsluha [19].

1.2.1 Statické vlastnosti senzorů

Statické vlastnosti senzoru popisují jeho chování v časově ustáleném stavu (při kvazistacionárních změnách). Statická přenosová charakteristika (kalibrační křivka) je nejdůležitější charakteristikou, ukazuje vztah mezi měřenou veličinou x a veličinou výstupní y . Vztah je popsán funkcí:

$$y = f(x). \quad (1.1)$$

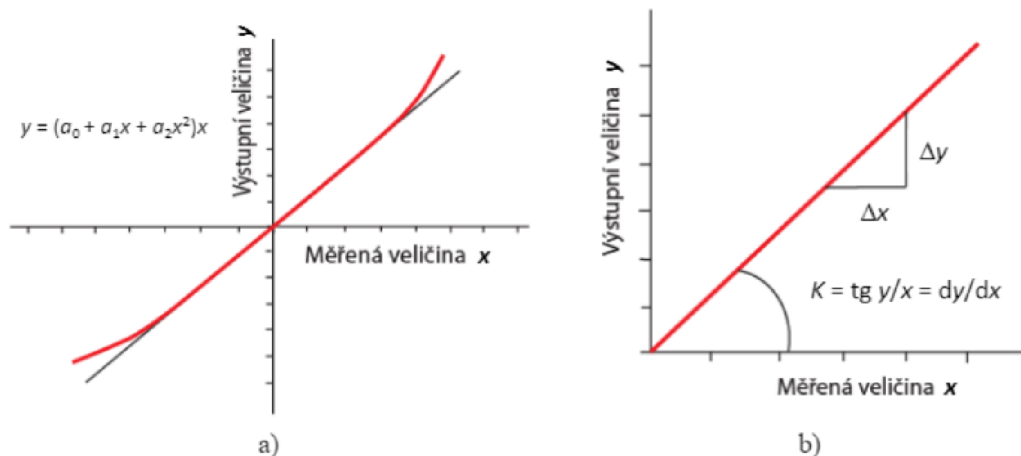
Obecně lze závislost mezi vstupní veličinou x a výstupní veličinou y popsat prostřednictvím polynomu ve tvaru:

$$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n)x \quad (1.2)$$

kde $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ jsou konstanty. Při omezeném počtu členů této rovnice lze například odvodit statické přenosové charakteristiky, viz obr. 1.3a.

Ideální statická charakteristika je dána vztahem $y = Kx$, kde K je citlivost senzoru a současně konstanta přenosové funkce. Citlivost senzoru K , která je definována sklonem charakteristiky (viz obr. 1.3b), v případě ideálního tvaru této charakteristiky je rovna konstantě a_0 :

$$K = a_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (1.3)$$



Obr. 1.3: Příklady statické přenosové charakteristiky: a) ideální tvar charakteristiky, funkce $y = a_0x$ (černě) a funkce $y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)x$ (červeně); b) vyjádření citlivosti podle sklonu charakteristiky, upraveno z [19].

Prah citlivosti (limit detekce, dolní hranice měřicího rozsahu) senzoru je dán hodnotou snímané veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru. Je to nejnižší hodnota měřené veličiny, která může být senzorem detekována.

Korekční charakteristika je rozdíl mezi naměřenými hodnotami a kalibrační křivkou, tudíž slouží k určení chyby, odklonu od předpokladu.

Nejvyšší hodnota měřené veličiny, která může být senzorem detekována je plný rozsah neboli horní hranice měřicího rozsahu.

Dynamický rozsah senzoru je dán intervalem přípustných hodnot snímané fyzikální veličiny, ohraničený prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny. Jinak řečeno je dán intervalem dolní a horní hranicí měřicího rozsahu, tj. mezi limitem detekce a plným rozsahem.

Hystereze je maximální rozdíl ve výstupu při jakékoliv hodnotě měřené veličiny, kdy hodnota je měřena nejdříve při zvyšování a poté při snižování měřené veličiny.

Rozlišitelnost je nejmenší změna snímané veličiny na výstupu, který senzor znamená při změně vstupu. Odpovídající absolutní nebo relativní chybě senzoru.

Rychlost odezvy je určována zejména fyzikálními vlastnostmi senzoru (velikost). Závisí na rychlosti působení měřené veličiny na převodník (na elektrickou veličinu) nebo-li na rychlosti přeměny na elektrické veličiny (většinou elektrony).

Reprodukovatelnost, někdy nazývaná opakovatelnost měření, je dána odchylkou mezi naměřenými hodnotami, které byly měřené při neměnné vstupní veličině a neměnných rušivých vlivech v krátkém časovém sledu.

Dlouhodobá stabilita, drift, je podmíněna změnami citlivosti senzoru v čase. Citlivost obvykle klesá, ale může i přechodně vzrůst. Vždy je proto nutné provádět kontrolu citlivosti a případně provést recalibraci.

Selektivita je schopnost senzoru potlačit interference pronikající do odezvy senzoru, tj. odezva by měla být reakce pouze na přítomnost měřené veličiny, ostatní vlivy by se neměly v odezvě projevit.

Aditivní a multiplikativní chyby. Rozdělení chyb na aditivní a multiplikativní je teoretické členění dle závislosti (chyby aditivní) nebo nezávislosti (chyby multiplikativní) chyby měření Δ_y resp. Δ_x na hodnotě měřené veličiny. Aditivní chyba je způsobená posunem jmenovité lineární charakteristiky. Multiplikativní chyba senzoru je ekvivalentní změně citlivosti senzoru. Statická charakteristika má odlišný sklon od jmenovité charakteristiky.

Linearita je dána odchylkou od ideální lineární (spojité analogové nebo kvantované) charakteristiky, jinak řečeno udává maximální odchylku kteréhokoliv kalibračního bodu od odpovídajícího bodu na ideální statické přenosové charakteristice [11, 19].

1.2.2 Dynamické vlastnosti senzorů

Měřená hodnota fyzikální nebo jiné veličiny se neustále mění s časem. Sensory zařazené v regulačních smyčkách nebo indikující mezní stavy procesu musí být navrženy tak, aby výstupní signál $y(t)$ sledoval s minimálním zkreslením vstupní signál $x(t)$. Dynamické vlastnosti senzoru je nutné znát pro analýzu a syntézu měřících a regulačních systémů. Dynamické chování senzorů lze ve většině běžných případů popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty. Pokud toto zjednodušení nelze provést, je nutno nelineární rovnici po úsecích linearizovat a dynamické chování sledovat v těchto úsecích. Dynamické chování senzoru se v technické praxi vyjadřuje přenosovou funkcí, resp. frekvenční charakteristikou, kterou formálně získáme z přenosové funkce (1.4) dosazením $p = j\omega$. Nevhodné dynamické chování členů měřícího řetězce, zejména snímače, lze upravit pomocí korekčních členů.

$$F(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = K \frac{(1 + pT_1)(1 + pT_2) \dots (1 + pT_m)}{(1 + pt_1)(1 + pt_2) \dots (1 + pt_n)}. \quad (1.4)$$

Přechodová charakteristika je průběh výstupní veličiny v závislosti na čase při skokové změně vstupní veličiny.

Frekvenční charakteristika udává závislost přenosu a fázového úhlu na frekvenci, tj. rozdíl amplitudy a fáze výstupního signálu oproti signálu vstupnímu v závislosti na frekvenci [11, 19].

1.2.3 Ostatní vlastnosti senzorů

K dalším důležitým parametrům senzoru patří posun nuly vlivem teplotního, časového, napájecího a jiného driftu, doba života, kvantizační chyba, apod. Hodnoty těchto parametrů mohou limitovat použití senzorů v některých aplikacích, a proto je třeba u každého typu senzoru hodnotit samostatně vhodnost pro danou aplikaci.

Mimo měřené veličiny na senzor působí také rušivé vlivy (teplota, tlak, vlhkost, radiace, elektrické a magnetické pole, atd.) projevující se v podobě šumu, které se senzor svými technickými parametry a uspořádáním více či méně snaží minimalizovat.

Způsobů a metod potlačení těchto vlivů je celá řada. Často se používají vhodná obvodová řešení, mezi ně patří např. metoda kompenzace, stínění, diferenční metoda, metoda zpětnovazební, metoda sériového zapojení linearizačního členu, metoda filtrace, aj. [19].

1.3 Teplotní senzory

Teplota je fyzikální veličina, která patří mezi základní veličiny SI. Subjektivně je možné chápat teplotu jako pocit chladu, či tepla. Teplota je obecně označení pro tepelný stav hmoty. Teplotní stav tělesa souvisí s průměrnou kinetickou energií částic látky.

Měření teploty patří k jednomu z nejdůležitějších oborů měření, protože je základem řízení řady technologických procesů. Pro stanovení teploty se využívá závislosti fyzikálních veličin na teplotě. Což umožňuje transformaci měřené teploty na jinou fyzikální veličinu. Pro měření teploty jsou stanoveny dvě základní stupnice:

1. Termodynamická – absolutní Kelvinova stupnice [K]. Základním bodem je rovnovážný stav mezi třetími fázemi H_2O (led, voda, pára), $0\text{ °C} = 273,16\text{ K}$.
2. Mezinárodní teplotní stupnice – určena pro praktické použití. Teplota se v ní udává ve stupních Celsia [$^{\circ}\text{C}$].

Teplotní senzor je funkční prvek, jenž je vstupním blokem měřícího řetězce, který je v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Termín senzor teploty je ekvivalentní termínu snímač teploty, čidlo teploty, stejně jako detektor tepelného záření nebo teploměr [11, 21, 29].

Rozdělení snímačů teploty

Snímače pro dotykové měření teploty [11, 35]:

1. elektrické
 - (a) odporové kovové (RTD)
 - (b) odporové polovodičové
 - i. termistory NTC
 - ii. termistory PTC
 - iii. monokrystalické Si
 - (c) polovodičové s PN přechodem (diodové, tranzistorové)
 - (d) termoelektrické
 - (e) krystalové
2. dilatační
 - (a) kapalinové
- (b) plynové
- (c) parní
- (d) bimetalové
3. tlakové
4. speciální
 - (a) akustické
 - (b) šumové
 - (c) magnetické
 - (d) tekuté krystaly
 - (e) teploměrné barvy
 - (f) jiné

Snímače pro bezdotykové měření teploty [33]:

1. senzory infračerveného záření
 - (a) tepelné (termočlávkové bat.)
 - (b) kvantové
 - (c) bolometry
 - (d) pyroelektrické
2. pyrometrické
 - (a) úhrné (širokopásmové) radi-
- ační pyrometry
- (b) jednopásmové pyrometry
- (c) dvoupásmové (poměrové) pyrometry
3. pyrometry nezávislé na emisivitě
 - (a) termovizní systémy

1.3.1 Odporové kovové senzory teploty

Principem odporových kovových teploměrů je teplotní závislost elektrického odporu kovu na teplotě. Kov si jde představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Ve většině případů odpor kovů s teplotou roste. Jediným teplotně závislým parametrem je totiž relaxační čas elektronů $\tau \sim 1/T$. V rozsahu teplot 0 °C až 100 °C roste elektrický odpor v závislosti na teplotě přibližně lineárně dle matematického vztahu:

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (1.5)$$

kde $\alpha[\text{K}^{-1}]$ je teplotní součinitel elektrického odporu, R_0 je odpor teploměru při teplotě 0 °C.

Teplotní součinitel odporu se v technické praxi obvykle definuje jako

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} [K^{-1}] \quad (1.6)$$

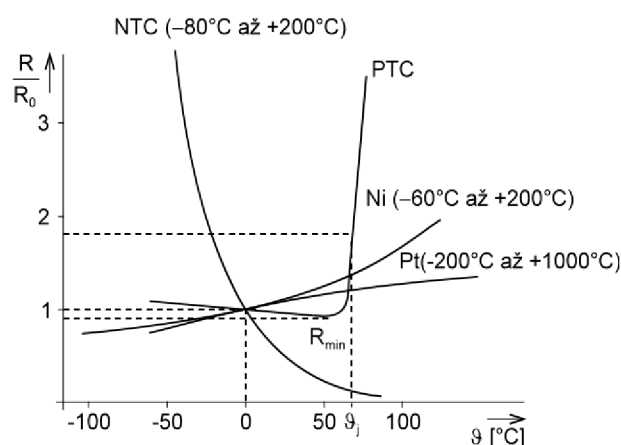
kde R_{100} je odpor teploměru při teplotě 100°C .

Požadavky na použitý materiál jsou malá změna teplotního součinitele odporu s časem, malá hystereze a kovy nesmí reagovat s izolačním nebo ochranným materiálem teploměru. Pro realizaci článku se využívají nejčastěji z čistých kovů platina, nikl, měď, stříbro a zlato a ze slitin stříbro-zlato a platina-iridium. Platina je výhodná pro chemickou stálost, vysokou teplotu tavení a možnost dosažení vysoké čistoty. Pro extrémně nízké teploty od $0,5\text{ K}$ slitiny Rh-Fe, Pt-Co aj..

Odporové senzory jsou obvykle tvořeny vnitřním vedením, stonkem a hlavicí. Vývody čidla mohou být provedeny jako dvou vodičové, třívodičové nebo čtyřvodičové. Čidlo teploty s vnitřním vedením je uloženo ve stonkové hlavici. Tento stoněk slouží jako ochranný nástroj proti poškození.

U těchto senzorů platí, že průchodem měřicího proudu dochází k jejich ohřívání. Senzor pak tedy indikuje vyšší hodnotu teploty, než je ta skutečná. Naopak nízká hodnota proudu vyvolá pouze malou změnu napětí na odporu, což je potřeba kompenzovat větším zesílením, čímž se ale zesiluje i chyba senzoru. Z tohoto důvodu je třeba navrhnout proudové zařízení tak, aby se dosáhlo kompromisu s ohledem na oba případy. Výrobci odporových senzorů teploty udávají tzv. zatěžovací konstantu D , která odpovídá velikosti výkonu podle vztahu 1.7, která vyvolá změnu teploty čidla o 1°C .

$$P = R(t)I^2, \quad (1.7)$$



Obr. 1.4: Teplotní závislosti odporových senzorů teploty, převzato z [33].

kde P je ztrátový výkon $[W]$, I je velikost budícího proudu $[A]$ a $R(t)$ je odpor senzoru $[\Omega]$.

Pro vypočtení velikosti budícího proudu je možno použít vztah 1.8

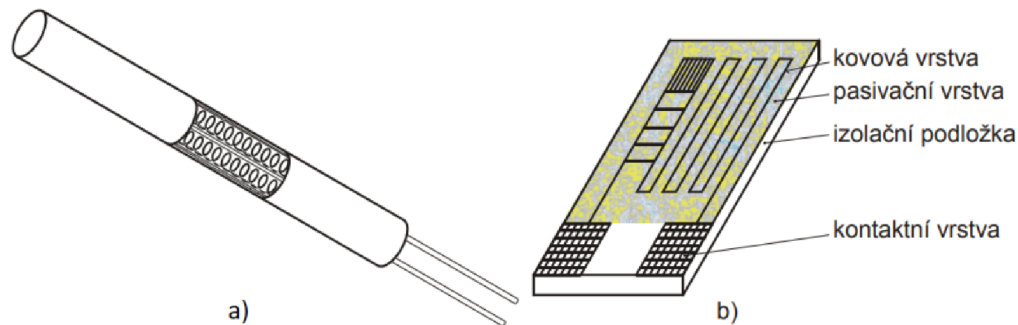
$$I = \sqrt{\frac{D}{R(t)}}, \quad (1.8)$$

kde D je zatěžovací konstanta $[W \cdot K^{-1}]$ [11, 19, 21, 29, 33, 41].

Platinový odporový teploměr

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Měřicí odpor, tvořící základní konstrukční část teploměru, se vyrábí

1. drátkovou technologií,
2. tenkovrstvou technologií,
3. tlustovrstvou technologií.



Obr. 1.5: Platinový odporový teploměr a) drátkový, b) tenkovrstvý, převzato z [33].

Drátkový měřicí odpor je tvořen spirálovitě stočeným platinovým drátkem, zataveným do keramiky, popřípadě do skla (obr. 1.5a). Jiným uspořádáním je platinová vrstva nanesená na keramické podložce (obr. 1.5b). Čistota platiny se pro provozní teploměry posuzuje dle tzv. redukovaného odporu W_{100}

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385. \quad (1.9)$$

Standardní hodnotou Pt senzoru je 100Ω při $0 \text{ }^\circ\text{C}$, ale kromě této hodnoty se vyrábějí Pt senzory $50, 200, 500, 1000$ a 2000Ω [11, 33].

1.3.2 Polovodičové senzory teploty

Odporové polovodičové senzory teploty rozdělujeme na monokrystalické — bez PN přechodu nebo s jedním nebo více PN přechody, a polykrystalické — termistory. Polovodičové odporové senzory využívají, stejně jako kovové odporové senzory, závislost

odporu na teplotě. U polovodičových senzorů je však změna odporu způsobena změnou koncentrace nosičů náboje, která je závislá na teplotě. Teplotní součinitel odporu polovodiče je záporný, přičemž je větší než u kovů.

Polovodičové odporové senzory můžeme dělit na:

- termistory
 - negastory
 - pozistory
- monokrystalické odporové senzory

Termistorové senzory jsou založeny na principu změny rezistivity (měrného odporu) se změnou teploty u kovových oxidů, piezoelektrické keramiky, případně dalších materiálů. Vyznačují se velkou citlivostí a přesností, zejména pro běžné okolní teploty (v tzv. „biologickém rozsahu“ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Rozlišujeme negastory, jejichž odpor s rostoucí teplotou klesá a pozistory, jejichž odpor s rostoucí teplotou naopak roste. Pro měření teploty jsou vhodné jen negastory, pozistory se používají spíše jako dvoustavové senzory, indikující překročení teploty. Obvykle se skládají z kombinace dvou nebo tří oxidů kovů, které jsou slinovány do keramického základního materiálu a mají olovené dráty připájené k polovodičové destičce nebo čipu, které jsou pokryty epoxidem nebo sklem [11, 18, 19, 41].

Negastory NTC termistory

Negastory se vyrábějí v různých provedeních pomocí různých výrobních technologií, lišících se zapouzdřením a vývody. Většinou se vyrábějí práškovou technologií ze směsi oxidů kovů (železa, titanu, manganu, kobaltu apod.). Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Odpor negastoru lze výrobní technologií dobře ovlivnit. Závislost odporu NTC termistoru na teplotě je nelineární a můžeme ji přibližným vztahem popsat

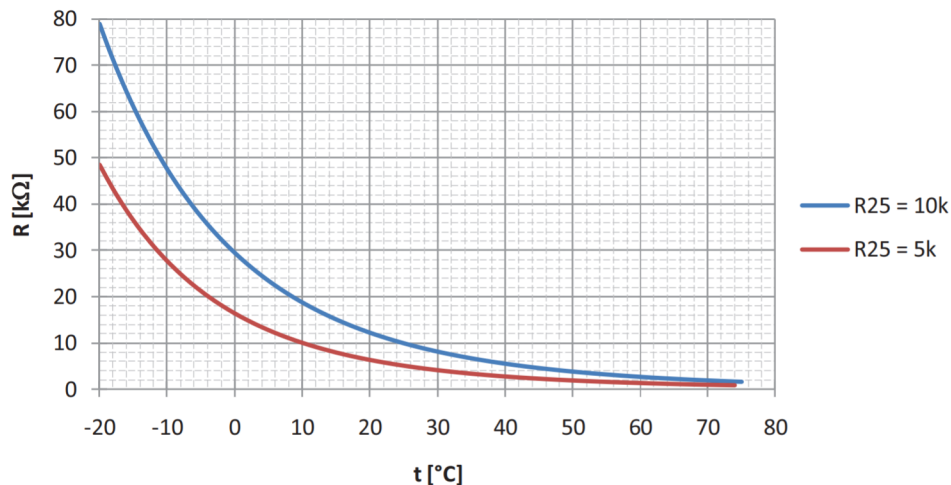
$$R(T) = Ae^{\frac{B(T)}{T}} \quad (1.10)$$

kde je $R[\Omega]$ elektrický odpor, $A[\Omega]$ konstanta závislá na geometrickém tvaru a na materiálu, B [K] parametr závislý na materiálu negastoru a teplotě, T [K] termodynamická teplota.

Derivací funkce $R = f(T)$ dle 1.10 obdržíme vztah pro teplotní součinitel odporu

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (1.11)$$

Z rovnice 1.11 je možné vypočítat průběh závislosti teploty na odporu. Tento průběh je znázorněn na obrázku 1.6. Pro větší názornost jsou zde průběhy tepelné závislosti dvou termistorů s hodnotami $5\text{ k}\Omega$ a $10\text{ k}\Omega$ při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnota



Obr. 1.6: Závislost odporu termistoru na teplotě, převzato z [38].

termistoru je zvolena podle rozsahu teplot, ve kterém hodláme pracovat, a s přihlédnutím k parametrům měřicího můstku tak, aby proud tekoucí termistorem vyvolal dostatečně velkou změnu napětí. Z tohoto důvodu volíme pro práci ve vyšších teplotách vyšší hodnoty termistorů a pro práci v nižších teplotách nižší. Rozsah vyráběných hodnot odporů je 100Ω až $100 \text{ k}\Omega$ [11, 29, 33, 38].

Pozistory PTC termistory

Jedná se o termistory s kladným teplotním součinitelem, vyrobené z polykrystalické feroelektrické keramiky. Odpor pozistoru při zvyšování teploty mírně klesá. Nad Curierovou teplotou se u pozistoru projevuje prudký nárůst rezistivity materiálu v závislosti na teplotě dle obr. 1.4. Po nárůstu o cca 3 řády hodnota odporu pozistoru opět mírně klesá. Pozistory jsou vhodné pro signalizaci překročení dovolené teploty např. elektromotorů, kde jsou zabudovány přímo do vinutí. PTC termistor lze využít také například k omezení proudu obvodem, kdy průchod většího proudu vyvolá ohřátí součástky, která má díky tomu vyšší odpor. Pro měření teploty je možno použít pozitivní termistory jen v omezeném rozsahu teplot a pro orientační účely, protože průběh závislosti odporu na teplotě není většinou popsán přesně rovnicí, ale je uveden jen graficky a tudíž není možno provést přesný převod odporu na teplotu [11, 33, 38].

Monokrystalické odporové senzory

Monokrystalické senzory teploty lze realizovat z křemíku, germania, india včetně jejich sloučenin. Sériově se vyrábějí Si senzory pro měření teploty v rozsahu od $-50 \text{ }^\circ\text{C}$

do + 150 °C. Mají nižší přesnost, avšak jsou vhodné pro konstrukce různých teploměřů, kde není kladen důraz na přesnost.

Monokrystalický Si senzor teploty je z nevlastního polovodiče typu N, tj. s dominantní elektronovou vodivostí. Teplotní závislost rezistivity křemíku je v uvedeném rozsahu teplot dle dotační koncentrace příměsi dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Se zvyšující se teplotou, podobně jako je tomu u kovů, dochází vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů a rezistivita dotovaného polovodiče narůstá, (na rozdíl od nedotovaného, intrinsického polovodiče).

Senzor na obr 1.7 se vyznačuje úzkou tolerancí odporu s dobrými reprodukovatelnými hodnotami teplot. Malé rozměry vedou k velmi krátké době odezvy. Téměř lineární odporová teplotní charakteristika. [26, 11, 33].



Obr. 1.7: Křemíkový teplotní senzor NXP Semiconductors KTY10-6, převzato z [26].

1.3.3 Monolitické PN senzory teploty

Monokrystalické senzory teploty s PN přechody využívají závislosti vlastností PN přechodu diod a tranzistorů na teplotě (změna charakteristik v závislosti na teplotě). S výhodou se využívá měření klidových proudů PN přechodů u tranzistorů (emitor – báze, kolektor – báze). Využívá se jich i pro měření velmi nízkých teplot, např. dioda typu GaAs se může využít pro měření teplot v rozsahu od -272 °C do 177 °C a na bázi křemíku, který patří mezi nejpoužívanější materiál pro tyto účely, pro rozsah -50 °C až 150 °C.

Teplotní závislost PN přechodu v propustném směru je definována na základě voltampérové charakteristiky PN přechodu, který závisí výrazně na teplotě podle Shockleyho rovnice:

$$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1) \quad (1.12)$$

vyplývá vztah

$$U_D = mU_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right) \quad (1.13)$$

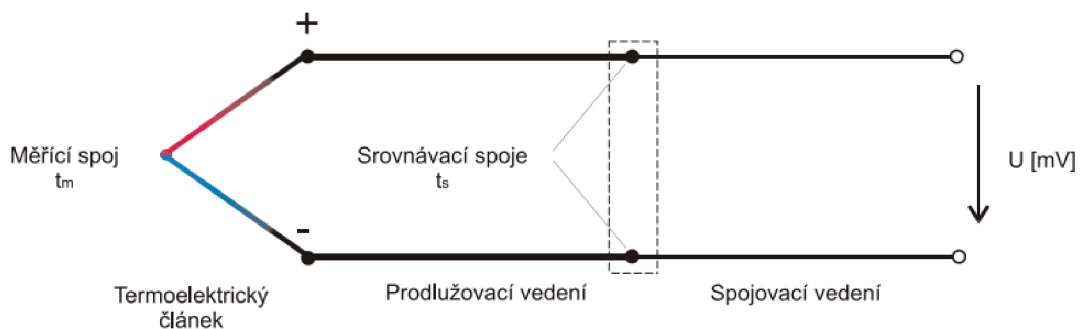
kde U_D je napětí PN přechodu v propustném směru, I_S saturační proud PN přechodu v závěrečném směru, I_D saturační proud PN přechodu v propustném směru, m rekombinační koeficient polovodiče ($1 \leq m \leq 2$), U_T teplotní napětí dané vztahem $U = kT/e$, kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$, C je elementární náboj [$J \cdot C^{-1}$], T termodynamická teplota [K].

Monokrystalické PN senzory teploty můžeme rozdělit na [11, 19, 33]

- **Tranzistorové PN senzory** jsou založeny na obdobném principu jako PN-diody, tj. využívá se teplotní závislosti přechodu báze-emitor na teplotě v propustném směru. Pro zapojení tzv. tranzistorové diody je rekombinační koeficient $m = 1$ a není závislý ani na proudu I_C ani na teplotě T .
- **Integrované PN senzory teploty.** Princip vyráběných integrovaných senzorů, u nichž senzor a elektronický obvod tvoří jediný monolitický prvek.

1.3.4 Termoelektrické články

Termoelektrické články neboli termočlánky pracují na principu převodu tepelné energie na elektrickou. Využívají Seebeckova jevu, podle něhož vzniká mezi vývody termočlánku, složeného ze dvou různých kovů, termoelektrické napětí úměrné rozdílu teploty v místě styku kovové dvojice a teploty srovnávacího konce. Zajistíme-li konstantní teplotu srovnávacího konce, bude napětí na termočlánku úměrné teplotě měřícího konce. Citlivost termočlánku je v řádu $10 \mu V/^\circ C$, lze ji však zvýšit sériovým zapojením více článků. Výhodou je velký teplotní rozsah, ve kterém mohou termočlánky pracovat, proto se používají hojně v průmyslových aplikacích k měření vysokých teplot. Přesnost je v porovnání s jinými systémy nižší, přesto může dosahovat pro nejpřesnější termočlánky až $\pm 0,5 \text{ }^\circ C$. Termočlánky (obr. 1.8) lze také použít jako zdroje proudu, avšak jejich energetická účinnost a výkon jsou malé. Využívá se inverzního jevu k Seebeckovu, a to jev Peltierův, kdy se průchodem proudu vytváří teplotní rozdíl mezi oběma konci vodičů [21].



Obr. 1.8: Terminologie měřícího řetězce termoelektrického článku, převzato z [38].

1.4 Senzory vlhkosti

Vlhkost

Základní vlastností vzduchu je vlhkost, která udává, jaká je hmotnost vodní páry (voda v plynném skupenství – časová a poziční proměnlivost) nacházející se v určitém objemu vzduchu. Je zřejmé, že voda se do okolí nemůže vypařovat neustále. Z tohoto hlediska je možné rozlišovat dva typy vzduchu. Prvním typem je **mokrý vzduch**, ke kterému dochází v případě, že koncentrace par dosáhne určité hranice, takže počet vypařených molekul se rovná počtu molekul zkondenzovaných. V opačném případě může nastat stav **suchého vzduchu**, když vzduch neobsahuje molekuly vody.

Pro vyjádření vlhkosti plynu je nutno znát dvě základní stavové veličiny, tedy teplotu a tlak směsi a také tzv. vlhkostní veličinu. Touto veličinou může být veličina nezávislá na okolním plynu (např. hustota vodní páry neboli absolutní vlhkost, relativní vlhkost), dále také veličiny vyjadřující poměry vodní páry v závislosti na plynu v daném objemu (směšovací poměr, měrná vlhkost aj.) a v neposlední řadě veličiny odvozené z měření (teplota rosného bodu, teplota mezního adiabatického ochlazení apod.). **Rosný bod** je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami, tedy relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %.

Pro vzájemné přepočty mezi jednotlivými vlhkostními veličinami lze při normálním tlaku plynu s chybou kolem 1 % používat stavovou rovnici ideálního plynu. Pro rozdílné tlaky vznikají přídatné chyby a je nutné používat vztahy obsahující kompresibilitní faktory reálného plynu. K měření vlhkosti plynů je pro provozní a meteorologické účely známo asi 20 principů [11, 37, 41].

Přehled vlhkostních veličin

Směšovací poměr r je dán podílem hmotnosti m_v vodní páry a hmotnosti m_a suchého plynu, tj. $r = m_v/m_a$. Nad hladinou vody se označuje r_w a nad hladinou ledu r_t .

Další veličinou je měrná vlhkost q , která je vyjádřena jako podíl hmotnosti vodní páry m_v k celkové hmotnosti vlhkého plynu $m_v + m_a$ v daném objemu plynu.

Hustota vodní páry d_v neboli **absolutní vlhkost** je podíl hmotnosti vodní páry m_v k objemu vlhkého vzduchu V , tedy $d_v = m_v/V$ termín absolutní vlhkost je z doby, kdy byla tato veličina používána pro ethanolové určování vlhkosti absorpčně gravitační metodou.

Veličina zvaná parciální tlak vodní páry e popisuje tlak, který má z celkového tlaku dané směsi vodní pára.

Tlak nasycené vodní páry v čisté fázi nad hladinou vody e_w a nad ledem e_i je funkcí pouze teploty.

Teplota rosného bodu T_d [K] vlhkého plynu o teplotě T [K], celkovém tlaku plynu p a směšovací poměru r je teplota, při které vlhký plyn izobaricky ochlazený se stane nasyceným.

Relativní vlhkost U_w , také RH (Relative Humidity), vlhkého plynu je dána podílem molárního zlomku x_v vodní páry ve vzduchu při dané teplotě T a celkovém tlaku p vlhkého vzduchu k molárnímu zlomku x_{vw} nasycené vodní páry. Tedy relativní vlhkost je dána poměrem absolutní vlhkosti plynu k vlhkosti plynu s nasycenými párami za téže teploty a tlaku [11]. Platí:

$$U_w = (x_v \cdot x_{vw}^{-1})_{p,T} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.14)$$

kde $x_v = n_v(n_v + n_a)^{-1}$ je molární zlomek vodní páry ($x_{v,w}$ je molární zlomek nasycené vodní páry), n_v je látkové množství vodní páry, $n_v + n_a$ je celkové látkové množství plynu.

Senzory

Nedávný vývoj v oblasti polovodičových technologií umožnil vysoce přesné, trvanlivé a nákladově efektivní snímače vlhkosti. Nejběžnější vlhkostní snímače jsou kapacitní, odporové a tepelné vodivosti [41].

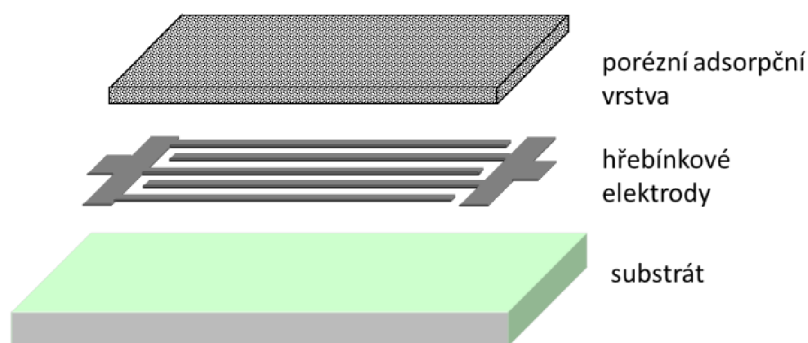
1.4.1 Odporové senzory vlhkosti

Senzory odporové vlhkosti měří změnu impedance, která má obvykle inverzní exponenciální vztah k vlhkosti.

U odporového snímače vlhkosti je možnost jak přímého tak nepřímého měření. Přímé měření se využívá pro pevné a sypké látky, kdy se systémem elektrod změní vodivost látky (Obr. 1.9), která je závislá na její vlhkosti. K měření se užívá střídavé napětí. Tato metoda je výhodná pro měření vlhkosti dřeva, obilí, textilu, apod.

Nepřímé měření je založeno na měření teploty, rozdílu teplot nebo polohy. Nejčastější jsou pro plyny dvě metody — psychometrická a hygrometrická. Psychometrická metoda využívá rozdílu teplot mezi mokřím a suchým teploměrem, z níž lze usoudit vlhkost plynu. Hygrometrická metoda je založena na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost v rovnováze s vlhkostí okolního vzduchu. Změny vlhkosti jsou převáděny na změny odporového článku. Podmínkou této metody je vratnost děje.

Tyto senzory jsou konstruovány z elektrod z ušlechtilého kovu nanesených foto-rezistivním procesem a z povrchu substrátu potaženého vodivou směsí polymer/keramika [19, 41].



Obr. 1.9: Struktura odporového senzoru vlhkosti, převzato z [19].

1.4.2 Kapacitní senzory vlhkosti

Kapacitní senzor vlhkosti funguje na principu změny permitivity dielektrika. Vlhkostní převodníky kapacitního typu využívají toho, že sorpce molekul s velkým dipólovým momentem, jako je voda, vede ke zvýšení dielektrické konstanty polymerních vrstev. Se změnou vlhkosti se změní i vlastnosti dielektrické vrstvy a tím dojde i ke změně kapacity senzoru, která se následně vyhodnotí.

Převodník se skládá z vrstvy vhodného polymerního dielektrika, které se umístí mezi dvě vodivé vrstvy tvořící elektrody. Uspořádání musí dovolovat přístup vlhkosti k polymerní vrstvě. To je důvodem využití tzv. **interdigitální struktury**, která sice umožňuje tvorbu jen malých kapacit, ale nabízí možnost vystavení velké plochy citlivého polymeru působení okolí.

Kapacitní snímače jsou jedinými typy senzorů s plným rozsahem schopným pracovat přesně až k 0% relativní vlhkosti. Vzhledem k jejich nízkoteplotnímu účinku se často používají v širokém rozsahu teplot bez aktivní teplotní kompenzace. Tyto snímače mají nízký teplotní koeficient a mohou fungovat i při vysokých teplotách až do 200 °C. Jsou schopny se plně zotavit z kondenzace a odolat chemickým výparům. Doba odezvy se pohybuje od 30 do 60 sekund při 63% skokové změně.

Termosetové polymerní kapacitní senzory přímo detekují změny relativní saturace jako změnu kapacity senzoru s rychlou odezvou, vysokou linearitou, nízkou hysterezí a vynikající dlouhodobou stabilitou. Relativní sytost je stejná jako relativní vlhkost okolí pod podmínkou, že je snímač vystaven okolní teplotě. Protože tomu tak je téměř vždy, změna kapacity senzoru je pak měřítkem změny relativní vlhkosti [19, 41].

1.4.3 Senzory vlhkosti tepelné vodivosti

Senzory vlhkosti tepelné vodivosti, známé také jako senzory absolutní vlhkosti, měří absolutní vlhkost výpočtem rozdílu mezi tepelnou vodivostí suchého vzduchu a vzduchu obsahujícího vodní páru.

Tyto snímače jsou konstruovány pomocí dvou termistorových prvků se záporným teplotním koeficientem (NTC termistory) v obvodu stejnosměrného můstku. Jeden z prvků je uzavřen v suchém dusíku, zatímco druhý je vystaven prostředí. Rozdíl v odporu mezi dvěma termistory je přímo úměrný absolutní vlhkosti.

Senzory vlhkosti s tepelnou vodivostí se běžně používají v různých zařízeních, včetně sušiček prádla a mikrovlnných trub. Používají se v mnoha průmyslových aplikacích, včetně pecí na sušení dřeva, sušících strojů, farmaceutické výroby, vaření a dehydratace potravin.

Senzory tepelné vodivosti jsou vyrobeny ze skla, polovodičového materiálu, vysokoteplotních plastů a hliníku a jsou velmi odolné vůči chemickým parám. Poskytují lepší rozlišení než kapacitní a odporové snímače při teplotách vyšších než 100 °C. Typická přesnost je +3 g/m³, která se převádí na přibližně ±5 % při 40 °C a ±0,5 % při 100 °C [41].

2 Vytápění

2.1 Topná tělesa

Úkolem otopné plochy je dodat do vytápěného prostoru takové množství tepla a takovým způsobem, aby v něm byla vytvořena tepelná pohoda. Veličiny, které mají hlavní vliv na tepelnou pohodu lze ovlivnit druhem, velikostí a způsobem instalace otopné plochy. Hlavním je pak ovlivnění:

- směru a rychlosti proudění vzduchu ve vytápěném prostoru
- rozložení teplot (teplotní profil) ve vytápěném prostoru
- povrchových teplot okolních ploch vzhledem k jejich sálavému účinku.

Otopné plochy mohou mít formu **otopných těles** (např. stěnové radiátory či konvektory) nebo **integrovaných otopných ploch** (především velkoplošné systémy jako je podlahová, stropní či stěnová otopná plocha, které jsou přímo včleněny ve vytápěném prostoru). Jednotlivé druhy otopných ploch se dále liší způsobem sdílení tepla (různý poměr konvekce a sálání) a umístěním v prostoru (podlahové, stěnové či stropní). Každá z mnoha variant sdílení a umístění má své přednosti a nedostatky, takže nelze říct, že by existovala ideální otopná plocha [3].

2.1.1 Základní charakteristiky topných těles

Charakteristiky otopných těles lze rozdělit na:

- **Geometrické charakteristiky** určují konstrukční řešení otopného tělesa. Určují tak veškeré jeho rozměry a hodnotící parametry stran jeho geometrického uspořádání.
- **Teplotnické charakteristiky** postihují ve svých veličinách především sdílení tepla u otopných těles, eventuálně hodnotící parametry vztahující se k tepelnému výkonu tělesa.
- **Provozní charakteristiky** se zabývají veličinami a kritérii, které vyjadřují hydraulické a provozní vlastnosti otopných těles [4].

2.1.2 Rozdělení topných těles

Stejně jako celé soustavy vytápění, tak i otopná tělesa dělíme na lokální tělesa a tělesa ústředního vytápění. Lokální tělesa přeměňují energii v teplo a toto předávají do vytápěné místnosti, ve které jsou umístěny. Otopná tělesa ústředního vytápění předávají teplo z topného média, přičemž teplo vzniká v centrálním zdroji mimo vytápěné místnosti. V této kategorii rozlišujeme podle způsobu předávání tepla otopná tělesa konvekční a sálavá.

1. Lokální tělesa

Podle paliva rozdělujeme tato tělesa na elektrická přímotopná a akumulární, dále tělesa na spalování plyných, kapalných a pevných paliv.

2. Konvekční tělesa

Podle konstrukčního provedení se rozlišují otopná tělesa článková, desková, trubková a trubková se zákrytem (konvektory). Předávání tepla probíhá převážně konvekcí (prouděním ohřívaného vzduchu kolem otopné plochy tělesa) a částečně sáláním (hlavně čelních rovných ploch).

Elektrická topná tělesa

Elektrické topné těleso je v podstatě kus kovu o určitém elektrickém odporu, který se průchodem elektrického proudu zahřívá. Vždy se volí materiál dlouhodobě odolný a schopný produkovat teplo dle potřebného výkonu. Obvykle užívaný odporový drát vyvíjí teplo buď samostatně, nebo je součástí dalšího materiálu. Proto jsou často topná tělesa tyčová nebo trubková. Vzhledem k jejich celkem snadné výrobě a možnosti tvořit topná tělesa rozličných tvarů se s nimi setkáváme v řadě aplikací [5, 6, 12, 28].

Elektrotepelná zařízení dělíme dle způsobu ohřevu na:

- odporová
- indukční
- dielektrická
- plazmová
- oblouková
- laserová
- elektronová
- ultrazvuková.

2.2 Způsoby vytápění

Předávání tepelné energie do vytápěných prostor [42]:

1. Sálavé teplo (šíření tepla zářením)
2. Konvekční způsob vytápění (cirkulace)
3. Ohřev vody nebo jiného média

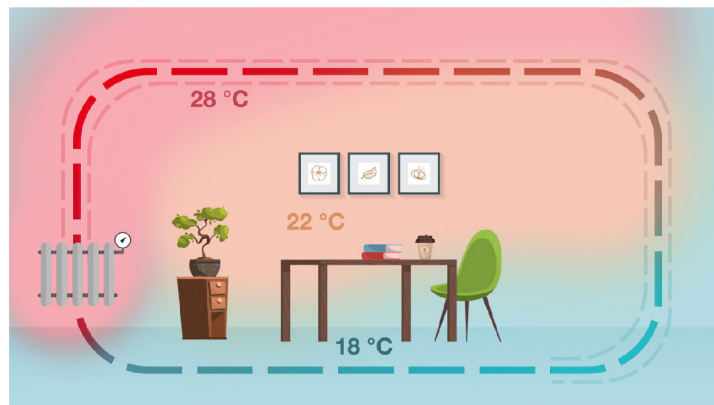
2.2.1 Sálavé teplo

Prvním způsobem přenosu tepelné energie do vytápěného prostoru je tzv. sálavé teplo. Při roztopení topného tělesa dochází k ukládání vyrobené energie do akumulární masy. Ta vyzařuje svoji energii do pláště, z kterého je postupně uvolňována do prostoru. Toto sálavé teplo neprohřívá prvotně vzduch, ale předměty v okolí od kterých je druhotně ohříván. Šíří se od zdroje rovnoměrně všemi směry. Dochází tak k rovnoměrnému rozložení teplot v místnosti. Blíže je více teplo než ve vzdáleném rohu. Vznikají zde **výškové teplotní zóny**. Díky tomu, že sálavé teplo má stejné

fyzikální vlastnosti jako sluneční záření, tak může být průměrná teplota vzduchu v místnosti nižší (20 °C) než u systémů teplovzdušných, a přesto člověku není zima.

2.2.2 Konvekční způsob vytápění

Každé topné těleso určené ke konvekčnímu způsobu vytápění má na svém plášti umístěny přesně nadimenzované nasávací a výdechové mřížky. Krátce po přiložení se nastartuje tzv. **komínový efekt** (obr. 2.1), těleso se zahřívá a pomalu nabíhá do svého plného výkonu. V prostoru topného tělesa se začne zahřívát vzduch. Ten na základě své rozdílné objemové hmotnosti začne cirkulovat – teplý vzduch je vytlačován klesajícím studeným nahoru. Spodní nasávací mřížkou je z vytápěné místnosti samovolně přisáván studený vzduch, který je v prostoru topného tělesa ohříván a opět samovolně odchází horní výdechovou mřížkou. Ve vytápěném prostoru se relativně rychle začne ohřívát vzduch. Tento způsob vytápění se nazývá **přírozená konvekce**.



Obr. 2.1: Konvekční způsob vytápění místnosti, přesněji jde o přírozenou konvekci, převzato z [14].

Druhým způsobem vytápění je tzv. **nucená konvekce**. Ta je založena na stejném principu jako předchozí způsob vytápění, ale je navíc doplněna ventilátorem a teplovzdušnými kanály. Díky nim je možné vyprodukované teplo transportovat izolovaným potrubím do dalších prostor. I v tomto případě je nutno mít na paměti, že vzduch musí neustále cirkulovat. Proto je nutné zabezpečit návrat stejného množství vzduchu ke zdroji tepla. Nevýhodou tohoto systému je značná cirkulace vzduchu a tzv. **vodorovné teplotní zóny**. Ty způsobují výrazné teplotní rozdíly mezi stropem a podlahou.

2.2.3 Ohřev vody nebo jiného média

Na topné těleso je možno osadit teplovodní výměník, který je napojen na otopnou soustavu v objektu. Po zatopení je část tepelného výkonu tělesa vyzářena do prostoru a část je využita k ohřevu vody v teplovodním výměníku. Tento způsob ohřevu vody za určitých podmínek snižuje náklady na celkové vytápění objektu.

2.3 Cirkulace vzduchu v buněčných inkubátorech

Ve vědecké oblasti i klinické praxi je používáno velké množství různých typů buněčných inkubátorů. Rozdělení buněčných inkubátorů podle cirkulace vzduchu [10]:

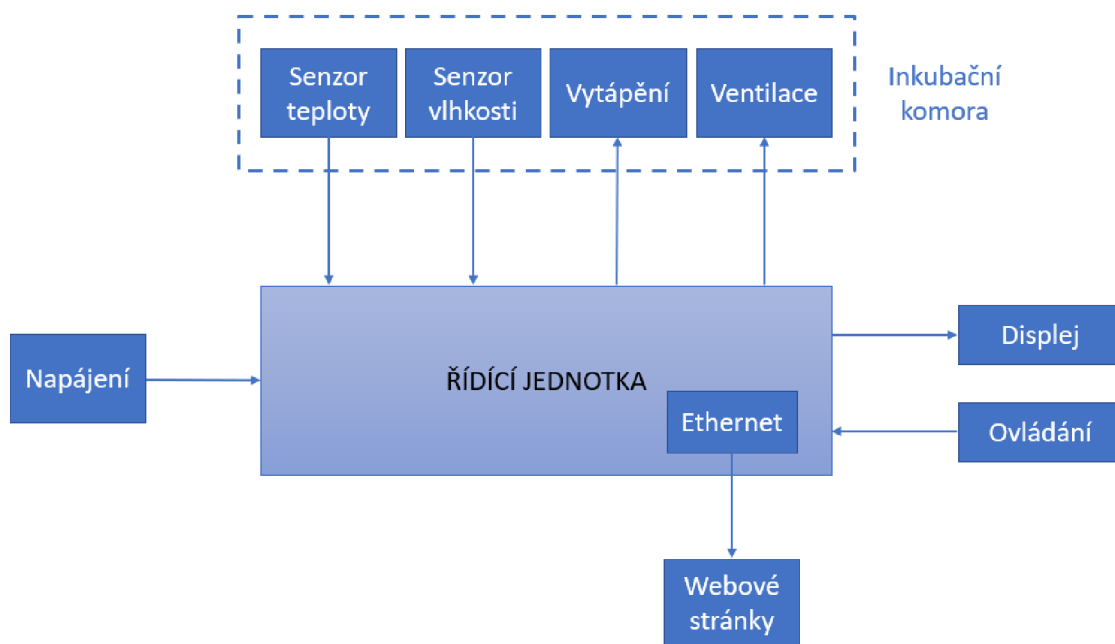
- **Inkubátory s přirozenou cirkulací vzduchu** — princip je založen na gravitačním proudění vzduchu v elektricky vyhřívané komoře buněčného inkubátoru.
- **Inkubátory s nucenou cirkulací vzduchu ventilátorem** — princip činnosti je založen na proudění vzduchu pomocí ventilátoru, který zajišťuje vytvoření spirálovitě stoupajícího vzduchu uvnitř komory buněčného inkubátoru. Tento proces simuluje přírodní děje a zajišťuje optimální prohřívání buněčných kultur. Inkubátory s nucenou cirkulací mohou být modifikovány o přídavné chlazení a regulaci vlhkosti.
- **Inkubátory s nucenou cirkulací vzduchu s vysokou relativní vlhkostí** — princip činnosti je založen na jemném gravitačním proudění pracovního plynu v elektricky vyhřívané komoře při vysoké relativní vlhkosti. Tento systém nahrazuje práci ventilátoru, který může díky vibracím zapříčinit kontaminaci vzorku. Využívají se pro výzkum a v oblasti in vitro fertilizace.

3 Návrh zařízení

3.1 Definice požadavků systému

Zařízení by mělo plnit funkci inkubační komory s nucenou cirkulací a notifikací stavu. Je třeba navrhnout řídicí systém pro inkubační komoru s nucenou cirkulací, který bude umožňovat notifikaci stavu uvnitř komory. Potom systémový návrh zařízení a návrh řídicího software. Bude možno zařízení realizovat a ověřit jeho funkčnost. Zařízení má umožňovat nastavení teploty až do 45 °C s přesností na ± 1 °C, monitorování vlhkosti a možnost připojení přes síť Ethernet nebo WiFi za účelem protokolování hodnot.

3.2 Blokové schéma



Obr. 3.1: Blokové schéma navrhovaného zařízení.

Popis schématu

Zařízení je připojeno k napájecímu zdroji. Stav inkubační komory je snímán senzorem teploty a senzorem vlhkosti umístěnými v prostředí komory. Podmínky vnitřního prostředí jsou regulovány vytápěním pomocí topného tělesa a ventilací pomocí malého ventilátoru. Vše je řízeno programem sestaveným pro řídicí mikrokontrolér

(v tomto případě se jedná o platformu Arduino). Jednotka mikrokontroléru je připojena na síť Ethernet prostřednictvím WiFi, kde odesílá informace o stavu na webové stránky.

Pro obsluhu inkubační komory je vstupem řídicí jednotky ovládání, které obsluhuje menu. V menu jde nastavit požadovanou teplotu, zobrazit aktuální hodnoty a vypnout zařízení. Výstupem pro obsluhu komory je displej a webové stránky.

3.3 Výběr komponentů

3.3.1 Senzor teploty

Jako senzor teploty je zvolen elektrický odporový teploměr o rozsahu teplot 10 až 45 °C s přesností na 1 °C. Je preferován digitální teploměr s komunikací přes I2C sběrnici (možnost zapojení více teploměrů do jedné sběrnice). Požadovanými parametry jsou rychlá odezva, málo vodičů pro připojení, kompatibilita s platformou Arduino, malé rozměry, napájecí napětí 3-6 V a stupeň krytí IP57 pro možnost dezinfekce komory. Většina digitálních teploměrů už je spojena i s vlhkoměrem, a proto je preferován jeden senzor pro měření obou veličin. V úvahu lze brát např. senzory DHT11, HTU21D, DHT12, DHT22, DS18B20.

3.3.2 Senzor vlhkosti

Jako senzor vlhkosti je zvolen elektrický odporový vlhkoměr o rozsahu vlhkosti 20 až 90 % RH s přesností na 5 % RH. Je preferován digitální vlhkoměr s komunikací přes I2C sběrnici (možnost zapojení více vlhkoměrů do jedné sběrnice). Požadovanými parametry jsou rychlá odezva, málo vodičů pro připojení, kompatibilita s platformou Arduino, malé rozměry, napájecí napětí 3-6 V, stupeň krytí IP57 pro možnost dezinfekce komory. Většina digitálních teploměrů už je spojena i s vlhkoměrem, a proto je preferován jeden senzor pro měření obou veličin. V úvahu lze brát např. senzory DHT11, HTU21D, DHT12 nebo DHT22.

3.3.3 Řídicí jednotka

Byla zvolena platforma Arduino. Takže výběr je omezen na modely této platformy. Vývojová deska by měla mít alespoň 10 digitálních I/O pinů, z nichž alespoň 2 bude možné použít jako PWM výstupy pro řízení výkonu periférii, analogové piny nejsou podmínkou, 16 MHz krystalový oscilátor, USB konektor, napájecí konektor, ICSP čtečku a resetovací tlačítko. Mohly by to být desky Arduino UNO a vyšší.

3.3.4 Displej

Displej by měl mít alespoň 2 řádky 2×16 znaků s řadičem pro přehlednější zobrazení menu, ale vhodnější by byl displej 4×16 znaků pro zobrazení v tomto případě celého menu. Komunikace přes I2C sběrnici, což uvolní větší množství pinů. Pomocí displeje se bude zobrazovat menu a bude se nastavovat parametry. Jako možnost můžeme uvažovat IIC I2C Display LCD 1602 nebo model v provedení LCD 2004A.

3.3.5 Ovládání

Ovládací prvek musí dovolovat alespoň tři různé pozice, aby se mohlo pohybovat v menu a aby šlo zvolit konkrétní možnost. Uvažovat se může o klávesnici, tlačítkách nebo rotačním enkodéru.

3.3.6 Vytápění

Pro vytápění bude použita odporová elektronická součástka. V úvahu připadá buď polyimid-kaptonová vodivá fólie o rozměrech 150×100 mm, připevněná na boční straně pláště nebo výkonový odporový rezistor. Polyimidová kaptonová folie je film s elektricky vodivou uhlíkovou vrstvou pro vyhřívání, temperování a další technické aplikace. Nejčastěji se vyrábějí s povrchovou rezistivitou 60, 100 nebo $120 \Omega/cm^2$. Další možností by bylo použití výkonového rezistoru. Na topném tělese bude přiložen chladič pro ochranu součástky a rychlejší distribuci tepla [30].

3.3.7 Ventilace

V komoře bude nucena cirkulace tvořena malým ventilátorem o rozměrech maximálně 25×25 mm. Řízení bude přes PWM režim, aby nedocházelo k příliš silnému proudění vzduchu uvnitř komory, a tím k víření a kontaminaci preparátu. Ventilátor bude umístěn na boční stěně pláště nad topným tělesem pro větší efektivitu cirkulace a rozložení teplého vzduchu v komoře.

3.3.8 Napájení

Pro napájení Arduino desky je doporučeno 7 až 12 V, ale limitní hodnota je 6 až 20 V (u vyšších hodnot je nutno sledovat, zda se zařízení nepřehřívá). Napájení může být řešeno více způsoby nebo dokonce kombinovaně. Nabízí se napájení z baterie (např. 9 V), přes USB kabel (např. z počítače) nebo přes PoE (Power over Ethernet), což by zabránilo přerušování snímání a odesílání dat na webové stránky v případě, když dojde k výpadku dodávky proudu. Napájení typu PoE umožňuje ethernetovým kabelům napájet zařízení připojená k síti přes existující datová připojení [1, 7].

3.4 Programové řešení

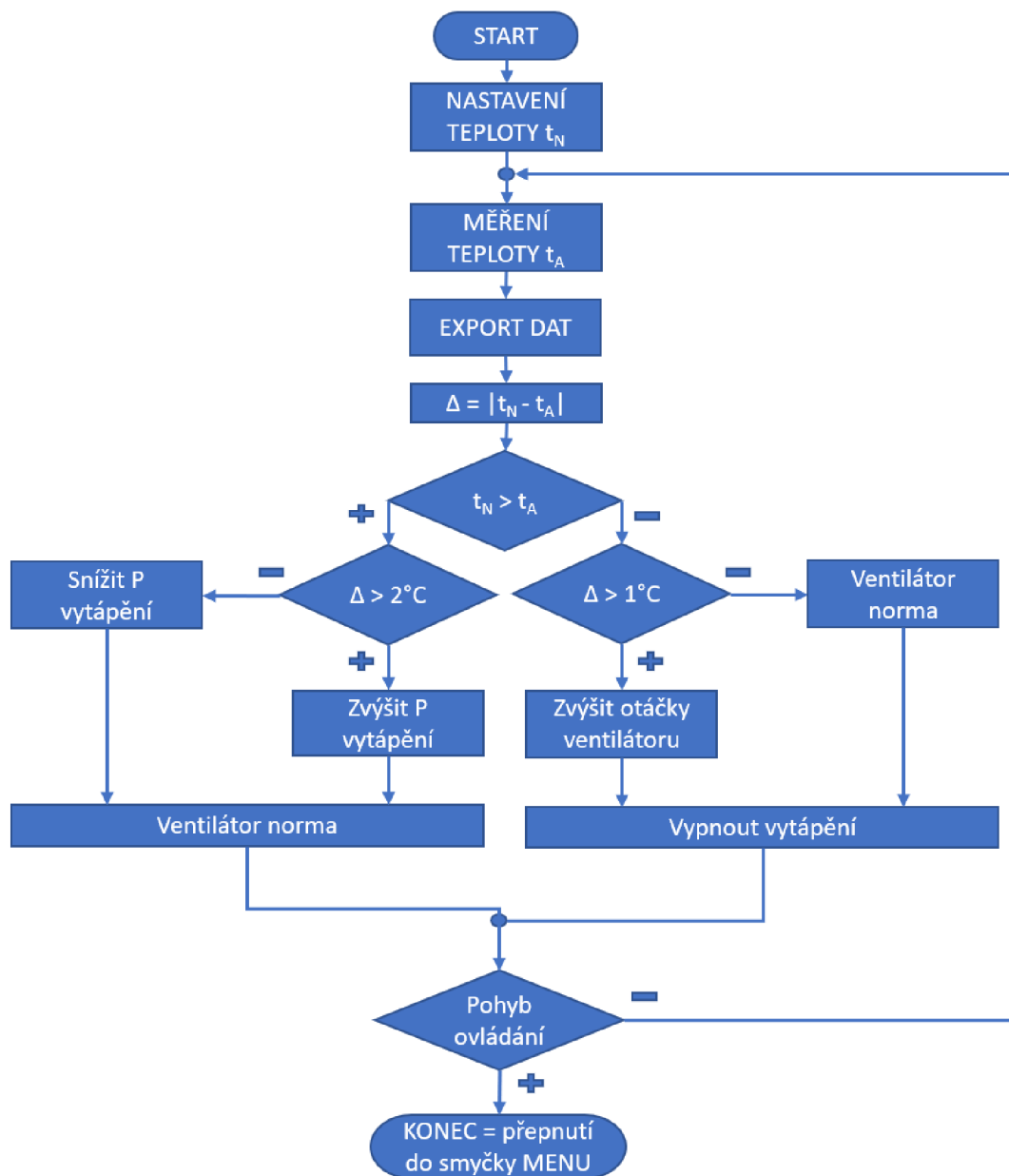
Správný proces inkubační komory by měl udržovat uvnitř optimální podmínky prostředí nastavené uživatelem. Udržování stálé teploty v zařízení je náročný proces, který se nejlépe provádí prostřednictvím automatizace. K automatickému udržování teploty na požadované hodnotě se využívá elektronická regulace pomocí mikrokontroléru.

3.4.1 Firmware řídicího mikrokontroléru

Program je rozdělen do dvou částí, a to regulace teploty a obsluhy zařízení. Pro zapnutí a správnou funkci zařízení je nutná interakce uživatele. Uživatel připojí zařízení ke zdroji napájení, čímž se program spustí. Po inicializaci zařízení uživatel pomocí uživatelského rozhraní nastaví požadovanou hodnotu teploty, na kterou chce komoru temperovat. Vývojový diagram uvedený na obr. 3.2 představuje hlavní smyčku programu, která reguluje teplotu.

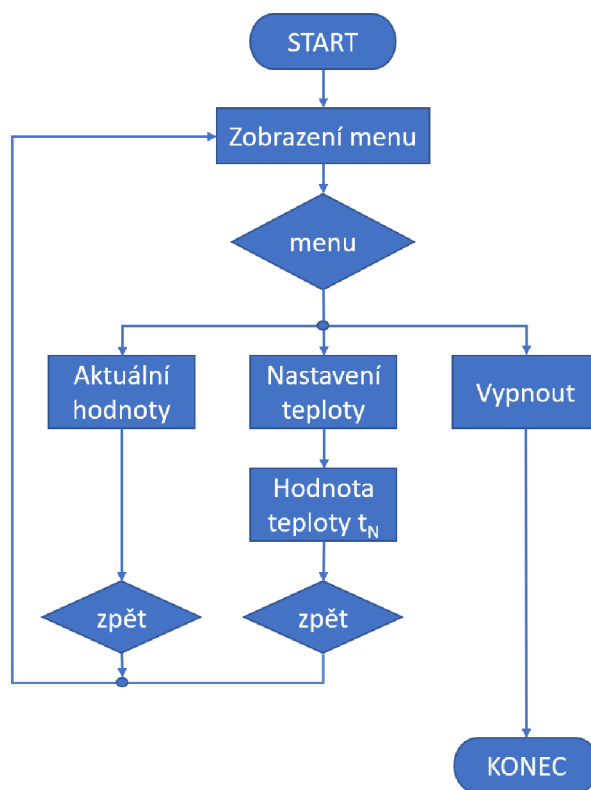
Hlavní smyčka

Po spuštění programu si uživatel v menu zvolí požadovanou hodnotu teploty t_N , kterou má zařízení udržovat. Potom se spustí nekonečný cyklus, který začíná měřením aktuální teploty t_A uvnitř komory. Následuje export dat na webové stránky a výpočet rozdílu Δ naměřené a aktuální teploty. Následně program porovnává, zda je nastavená teplota větší než teplota aktuální (potřeba ohřát prostředí), pokud ano a zároveň je rozdíl $\Delta > 2$ °C, tak systém zvýší výkon vytápění, pokud je naopak rozdíl $\Delta < 2$ °C, tak systém sníží výkon vytápění. Otáčky ventilátoru zůstávají v normě pro cirkulaci ohřátého vzduchu. V případě, že je nastavená teplota menší než teplota aktuální (potřeba ochladit vzduch) a současně je rozdíl $\Delta > 1$ °C, tak systém zvýší otáčky ventilátoru natolik, aby nedošlo ke kontaminaci vzorků, pokud je naopak rozdíl $\Delta < 1$ °C, tak systém ponechá otáčky ventilátoru v normě. Topné těleso se sepne na menší výkon, aby se prostředí ochladilo. Pak systém vyhodnotí, zda zaznamenal pohyb ovládacího prvku, pokud ano, přepne se do paralelní smyčky, pokud ne, proces se po určené době od spuštění dřívějšího procesu opakuje s původně zadanou hodnotou.



Obr. 3.2: Vývojový diagram systému, P je výkon, t_N je nastavená teplota, t_A je aktuální teplota a Δ je rozdíl teplot.

Vedlejší smyčka - obsluha menu



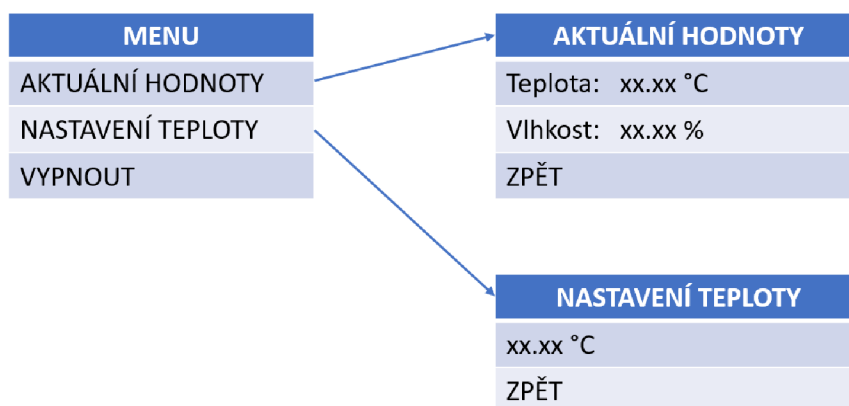
Obr. 3.3: Vývojový diagram menu, t_N je nastavena teplota.

Další část programu tvoří paralelní smyčka (obr. 3.3) zajišťující obsluhu menu a komunikaci s uživatelem. Pokud systém zaznamená stisk tlačítka ovládaní, přepne se z hlavní smyčky do vedlejší, a tím se tato smyčka spustí. Po spuštění se na displeji zobrazí nabídka menu, kde si uživatel může vybrat, jak chce dále postupovat. Na výběr jsou v nabídce aktuální hodnoty, nastavení teploty a vypnutí celého zařízení. Výběrem aktuálních hodnot se uživatel dostane do podnabídky menu, kde se zobrazují aktuální hodnoty teploty a vlhkosti, je tam i možnost vrátit se zpět do hlavní nabídky menu. Výběrem nastavení teploty se uživatel dostane do podnabídky menu, kde nastaví požadovanou hodnotu teploty t_N z daného rozsahu teplot, pokud bude hodnota teploty změněna, tak hlavní smyčka bude dále pracovat s touto novou hodnotou, dokud se opět nezmění. I v této podnabídce menu je možnost vrátit se zpět do hlavní nabídky menu. Výběrem možnosti vypnout bude uživatel vyzván k odpojení zařízení od zdroje napájení, program se ukončí a zařízení se vypne.

3.4.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní zařízení je tvořeno ovládacím prvkem a displejem. Uživatel komunikuje pomocí nabídky menu. Všechno ostatní je automatizováno a řízeno mikrokontrolérem. Program smyčky řídicí obsluhu menu je popsán v sekci firmware řídicího mikrokontroléru.

Uživatel má v menu tři možnosti jako na obr. 3.4, a to zobrazení aktuálních hodnot, nastavení požadované hodnoty teploty nebo může zařízení vypnout. Zvolením aktuální hodnoty se vypíší hodnoty teploty a vlhkosti. Naopak zvolením nastavení teploty, uživatel zadá požadovanou hodnotu teploty a vrátí se zpátky do menu. Když chce uživatel vypnout zařízení, zobrazí se upozornění, ať odpojí zařízení od zdroje napájení a program se ukončí.

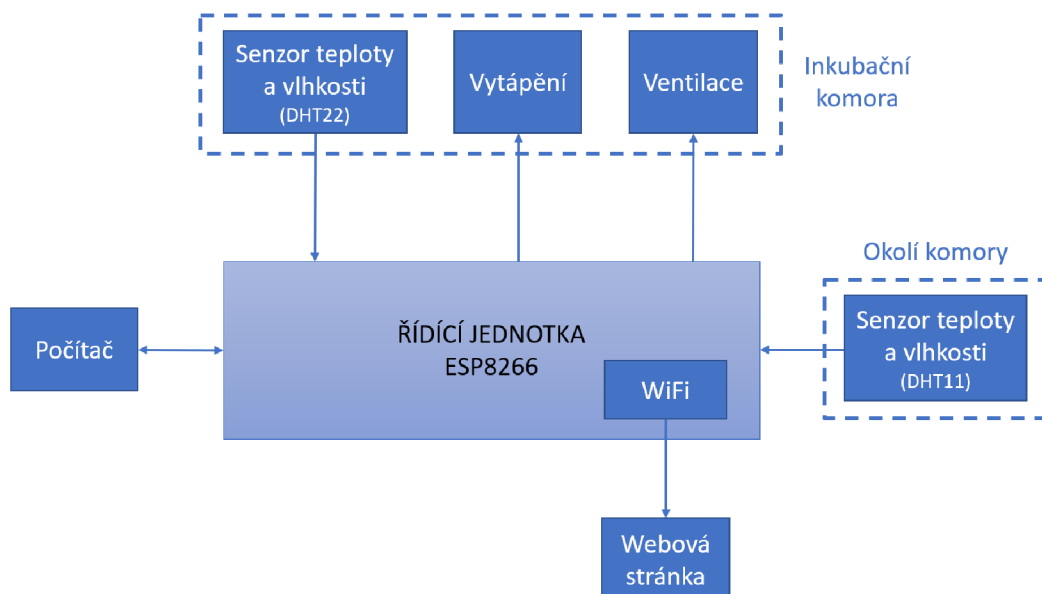


Obr. 3.4: Schéma menu

4 Realizace zařízení

Realizace se oproti návrhu zařízení liší. Práce byla postupně rozšiřována o nové komponenty a nové části kódu. Byl dodržován postup dle návrhu zařízení, ale u realizace monitorování a možnosti připojení přes síť Wifi nastal problém s kompatibilitou součástek. Celé funkční zařízení pro temperování teploty v komoře s ovládáním rotačním enkodérem a zobrazením menu na displeji bylo postaveno na desce Arduino Uno, ke které se opakovaně nedařilo připojit modul ESP-01 s čipem ESP8266 pro komunikaci přes WiFi a to ani po vyřešení kompatibility napětí logiky (5 V vs. 3,3 V). Proto bylo nutné rozhodnout, která funkce má přednost a po domluvě s vedoucím bylo upřednostněno protokolování před menu. Pro samotnou realizaci tak byla zvolena deska WeMos D1 R1 s čipem ESP8266, kde je funkčnost komunikace po síti WiFi bezproblémová. I za použití převodníku úrovní není dosud možná komunikace s displayem, neboť čip ESP8266 v současné době nepodporuje knihovnu `LiquidCrystal_I2C` pro obsluhu displeje.¹

4.1 Blokové schéma



Obr. 4.1: Blokové schéma realizovaného zařízení.

¹Jedná se o poměrně novou platformu cílenou především pro konstrukci zařízení typu IoT, jehož soubor knihoven a aplikační rozsah se teprve rozrůstá. Z toho důvodu není kromě některých knihoven dostupná kompletní dokumentace čipu.

Popis schématu

Zařízení je připojeno k počítači a za účelem sestavení programu je kompatibilní s prostředím Arduino IDE. Jednotka je napájena z počítače a komunikuje po sériové lince. Uživatel zadává požadovanou teplotu přes sériový monitor, který komunikuje s čipem ESP8266. Stav inkubační komory je snímán digitálním senzorem teploty a vlhkosti DHT22 umístěným uvnitř komory. Podmínky uvnitř komory jsou regulovány vytápěním pomocí topného tělíska a ventilací pomocí mikro ventilátoru (distribuce tepla v prostoru komory). Digitální senzor DHT 11 měří teplotu a vlhkost okolí komory, pro lepší vyhodnocení a regulaci teploty uvnitř. Vše je řízeno programem, který je sestaven pro řídicí jednotku mikrokontroléru. Součástí tohoto programu je i odesílání dat o aktuálním stavu na webové stránky přes WiFi komunikaci.

Pro obsluhu inkubační komory je vstupem sériový monitor v počítači, ve kterém lze měnit teplotu temperace komory. Výstup je tvořen právě sériovým monitorem a webovou stránkou, kde se zobrazují aktuální data.

4.2 Výběr komponentů

4.2.1 Mikrokontrolér

WeMos D1 R1, tato deska postavená na WiFi modulu ESP8266 v sobě kombinuje podporu WiFi a velký výpočetní výkon. Všechny piny této desky však pracují s napětím 3.3 V a připojením 5 V datových pinů se může modul ESP zničit [2]. Podrobnější popis v části 4.3.1 Popis firmware na straně 46.

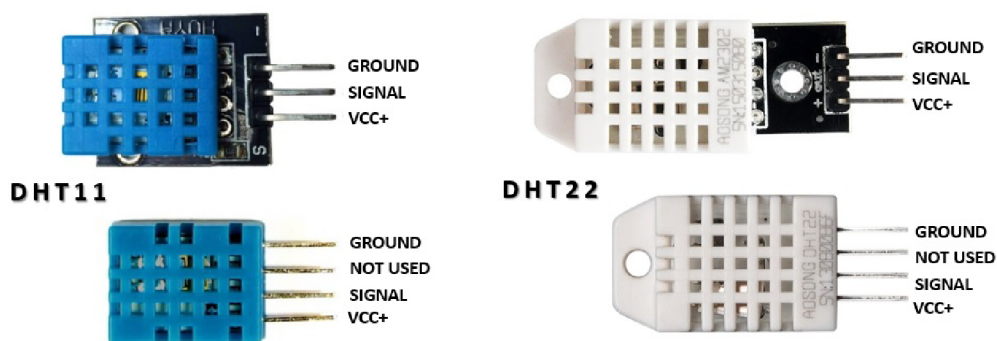
4.2.2 Snímání teploty a vlhkosti

Pro snímání teploty byly použity digitální senzory DHT11 a DHT22, které se liší hlavně svojí přesností měření. V průběhu vývoje byl odzkoušen i digitální senzor Dallas DS18B20. Jeho výhodou jsou malé rozměry a možnost zapouzdření TO-92, které umožňuje dezinfekci vnitřní části komory, ve které by se nacházel. Oproti tomu senzory DHT snímají nejenom teplotu, ale i vlhkost [36].

DHT11 a DHT22

Senzory se vyrábějí samostatně nebo jako moduly, které na desce již mají integrovaný rezistor. Některé tyto moduly mají pevný otvor pro šroub.

Na obrázku 4.2 jsou znázorněny piny jednotlivých senzorů, jedná se o signálovou zem (ground), data (signal) a napájecí napětí (vcc+). Typy senzoru jsou na první pohled odlišitelné, protože jsou různé barvy i velikosti. Z tabulky 4.1 je patrné, že



Obr. 4.2: Senzory teploty a vlhkosti DHT11 a DHT22, převzato z [39].

senzor DHT22 má větší rozsah měření teploty a vlhkosti a je přesnější, což se odráží v ceně tohoto senzoru.

Tab. 4.1: Tabulka parametrů digitálních senzorů DHT

	DHT11	DHT22
Rozsah měření vlhkosti	20-90 % RH	0-100 % RH
Přesnost měření vlhkosti	± 5 % RH	± 2 % RH
Rozsah měření teploty	0-50 °C	-40-80 °C
Přesnost měření teploty	± 2 °C	$\pm 0,5$ °C
Napájení	3,3-5,5 V	3,3-6 V

Senzory DHT11 a DHT22 detekují přítomnost vodní páry měřením elektrického odporu mezi dvěma elektrodami. Složka citlivá na vlhkost je substrát schopný zadržovat vlhkost s elektrodami nanesenými na povrch. Když je voda absorbována substrátem, ze substrátu se uvolňují ionty, což zvyšuje vodivost mezi dvěma elektrodami. Změna odporu mezi dvěma elektrodami je úměrná relativní vlhkosti. Čím vyšší je relativní vlhkost, tím nižší je odpor mezi dvěma elektrodami, zatímco čím nižší je relativní vlhkost, tím větší je odpor mezi oběma elektrodami.

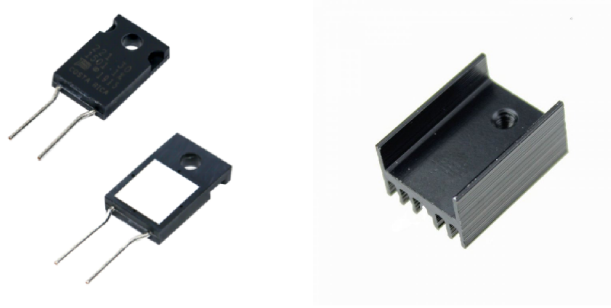
Pokud jde o teplotu, snímač DHT ji měří díky přítomnosti na něm namontovaném teplotním senzoru NTC (termistor). Po odstranění plastového pouzdra, které chrání senzor, jsou vidět dvě elektrody aplikované na substrát na jedné straně tiskového obvodu, zatímco na druhé straně je integrovaný obvod (IC), který má za úkol převést měření odporu na relativní vlhkost. Kromě toho tento IC obsahuje uvnitř kalibrační koeficienty a řídí přenos dat mezi snímačem DHT a vnější stranou.

Pokud je snímač DHT namontován na základně a vycházejí z něj pouze 3 piny,

bude na něm již 10 k Ω pull-up rezistor. Ten musí být mezi signálním vedením a napájením 5 V, aby se zajistilo, že úroveň signálu zůstane ve výchozím nastavení vysoká. Pokud je naopak senzor samotný (ten se 4 výstupními piny a bez základny), bude se muset přidat pull-up rezistor [40].

4.2.3 Vytápění

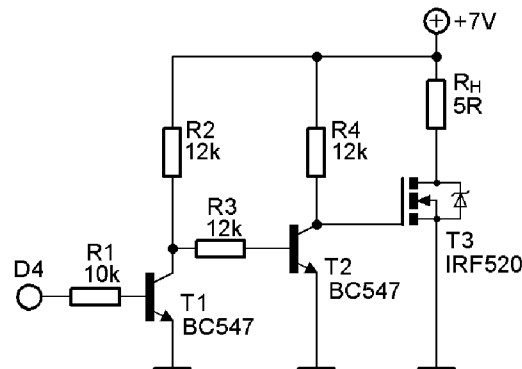
Jako způsob vytápění byl zvolen výkonový rezistor řízený spínačem MOSFET. Jak je zobrazeno na obrázku 4.3, samotný rezistor je v pouzdře TO-220, pro správnou funkci je však k němu připevněn lisovaný chladič typu „H“ pro pouzdro TO-220, který je rozměrově o něco větší. Chladič má mnohem větší povrch než je funkční plocha výkonového rezistoru (na obrázku 4.3 je zobrazena funkční plocha jako bílý čtverec), díky čemu lépe distribuuje tepelnou energii do prostředí. Toto topné těleso má velmi dobrou účinnost, avšak díky upevněnému chladiči má delší setrvačnost, na což se musí brát ohled u regulace teploty v komoře.



Obr. 4.3: Vlevo je výkonový rezistor PWR221T-30, vpravo je lisovaný chladič model H TO-220, převzato z [22, 24] .

Topné těleso má maximální povolený výkon 2,25 W bez chladiče a až 30 W s chladičem. V tomto případě bude těleso napájeno z externího zdroje napětím 7 V, odpor této součástky je 5 Ω , takže protékající proud činí 1,4 A. To odpovídá výkonu 9,8 W (a nutnosti použít chladič). Hodnota napětí, resp. výkonu byla stanovena empiricky jako kompromis mezi dobou vytápění a nežádoucí setrvačností chladiče, která by neumožňovala regulaci v požadavcích zadání. Pro lepší regulaci teploty v komoře bude výkonový rezistor spínán v režimu PWM (více na straně 44 v části Ventilace a na straně 47 v části Řízení teploty) přes spínač s tranzistorem MOSFET [24].

Schéma zapojení výkonového rezistoru řízeného spínačem MOSFET je na obrázku 4.4. Vstupní část je tvořena připojením k digitálnímu pinu D4 řízeného v režimu PWM mikrokontroléru, rezistor $R1 = 10\text{ k}\Omega$ slouží jako předřadný rezistor pro T1 a reguluje proud do báze. Rezistor $R2 = 12\text{ k}\Omega$ slouží jako pull-up a $R3 = 12\text{ k}\Omega$ jako předřadný pro bázi T2. Rezistor $R4 = 12\text{ k}\Omega$ je pull up pro spínací T3. Tranzistor T3 je typu MOSFET, IRF520, a je zapojen jako spínač mezi zátěž a zem. Tranzistor je řízený napětím a je pomocí T2 zemněn.



Obr. 4.4: Schéma zapojení spínače MOSFET s výkonovým rezistorem.

Pokud je na vstupu (D4) přivedena logická 1 libovolné napěťové úrovně TTL (zde se jedná o napětí 3.3 V), tranzistor T1 je otevřen a přizemňuje T2. Tranzistor T2 se uzavře a pull-up $R4$ přivádí na gate T3 napětí. T3 se otevře a vede proud zátěží, kterou představuje R_H .

Naopak, v případě, že je na vstup tranzistoru T1 přivedena logická 0 (LOW), je koncový T3 uzavřen. K polovodičovému řízení bylo přistoupeno z důvodu řízení výkonu pomocí PWM (nebylo by možné využít např. relé).

4.2.4 Ventilace

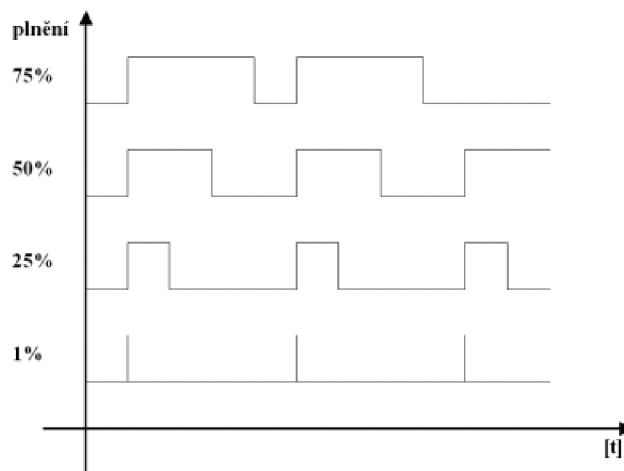
Pro realizaci zařízení byl vybrán bezkartáčkový mikro ventilátor SEPA o rozměrech $10 \times 10 \times 2\text{ mm}$, model MF 10A03A. Jeho napájecí napětí je 3.3 V, maximální proud 50 mA, pracovní teplota je od $-10\text{ }^\circ\text{C}$ do $+60\text{ }^\circ\text{C}$. Maximální průtok je 0,76 l/min [8].

Požadovaná hodnota průtoku vzduchu, při které nedochází k víření buněk v nekrytém preparátu, je 0.2 l/min, což je 22 % z maximálního průtoku ventilátoru [13]. V komoře bude prováděná trvalá nucená cirkulace řízená pomocí PWM se střídou 22 %, tímto způsobem dosáhneme v komoře průtoku vzduchu 0.2 l/min. Ventilátor bude umístěn v blízkosti topného tělesa, v ideálním případě nad něj pro lepší distribuci tepla v komoře.



Obr. 4.5: SEPA mikro ventilátor model MF 10A03A, převzato z [8] .

Pulsně šířková modulace (PWM, Pulse Width Modulation) je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Ekvivalent hodnoty analogového signálu je vytvořen pomocí střídavy. Jde tedy o signál s konstantní periodou T , kde se mění střída napětí (tj. poměr délky impulzu ku délce mezery uvažovaný v jedné periodě). Střída se uvádí někdy jako poměr, kdy je nutné uvést, které číslo představuje impulz a které mezeru. Někdy se střída vyjadřuje procentuálně, kde 100 % představuje ideální poměr 1:0, 50 % poměr 1:1 atd. [32].



Obr. 4.6: Pulsně šířková modulace, převzato z [32].

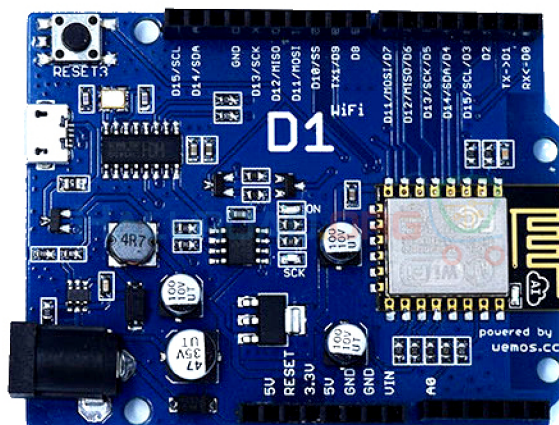
4.3 Programové řešení

Celý program lze rozdělit na tři základní části a těmi jsou komunikace po sériové lince pro nastavení požadované teploty, samotné řízení teploty uvnitř komory a notifikace stavu na webové stránce. Všechny části jsou řízeny firmwaré řídicího mikrokontroléru. Pro správnou funkčnost však je nutná interakce uživatele.

Uživatel musí předem do kódu zadat SSID, neboli název WiFi sítě, a přístupové heslo této sítě. (Pro úpravu kódu je potřeba mít v počítači nainstalováno Arduino IDE, vývojové prostředí, které je nutno správně nastavit a doinstalovat všechny knihovny a čip ESP8266.) Takto připravený kód se uloží do paměti desky připojené ke správnému portu *COM#* (*#* je číslo použitého portu). Poté uživatel otevře sériový monitor, kde může změnit přednastavenou teplotu temperování komory v rozsahu od 15 °C do 45 °C. Ze sériového monitoru zjistí IP adresu, na které je dostupná webová stránka. Pro zobrazení webové stránky stačí zadat tuto adresu do webového prohlížeče.

4.3.1 Popis firmware

Zařízení bylo původně laděno na mikrokontroléru Arduino Uno, jak již bylo zmíněno na straně 41, konečná realizace je na modelu WeMos D1 R1 s čipem ESP8266. Firmware byl psán v Arduino IDE v jazyce Wiring, který je díky své komplexnosti a rozšířenosti brán jako samostatný programovací jazyk.



Obr. 4.7: Mikrokontrolér ESP8266 D1 R1, převzato z [16] .

Wemos D1 R1 (obrázek 4.7) je Wifi vývojová deska, založená na ESP8266EX. Tato deska obsahuje rozložení pinů téměř jako Arduino UNO. Všechny I/O piny mají přerušování, PWM, I2C a 1-Wire, mimo pin D0. Deska může být napájena přes USB

port nebo pomocí externího napájení 7-12 V přes DC Power Jack. Deska pracuje na napětí 3.3 V a případné připojení 5 V datových pinů může modul zničit. Skládá se z 11 digitálních pinů a 1 analogového pinu. Velikost programovací paměti (Flash paměť) je 4 MB a velikost datové RAM je 96 kB[31].

Řízení teploty

Po připojení zařízení k počítači se spustí na mikrokontroléru uložený program, pro jakoukoliv změnu programu je potřeba spustit Arduino IDE, kód přepsat, zkompilovat a nahrát do desky.

Po spuštění programu se připojí potřebné knihovny, nadefinují se všechny potřebné proměnné a nastaví se výchozí hodnoty. Topné těleso a ventilátor jsou řízeny v PWM režimu. Ventilátor je nastaven na hodnotu 56.²

```
#define vytop_pin  D4
#define vetrak_pin  D5
int vytapeni = 0;
int ventilator = 56;
int nastavenaTeplota = 20;
```

Ve funkci *setup()* se inicializují senzory DHT a datové piny pro vytápění a ventilaci se nastaví do režimu výstupní. Tato smyčka proběhne po spuštění programu pouze jednou. V hlavní smyčce *loop()*, která se opakuje do nekonečna, probíhá čtení ze senzorů DHT a řízení temperování komory. Taktéž je zde přijímání dat nastavené teploty ze sériové linky, která je důležitá pro celý algoritmus řízení teploty.

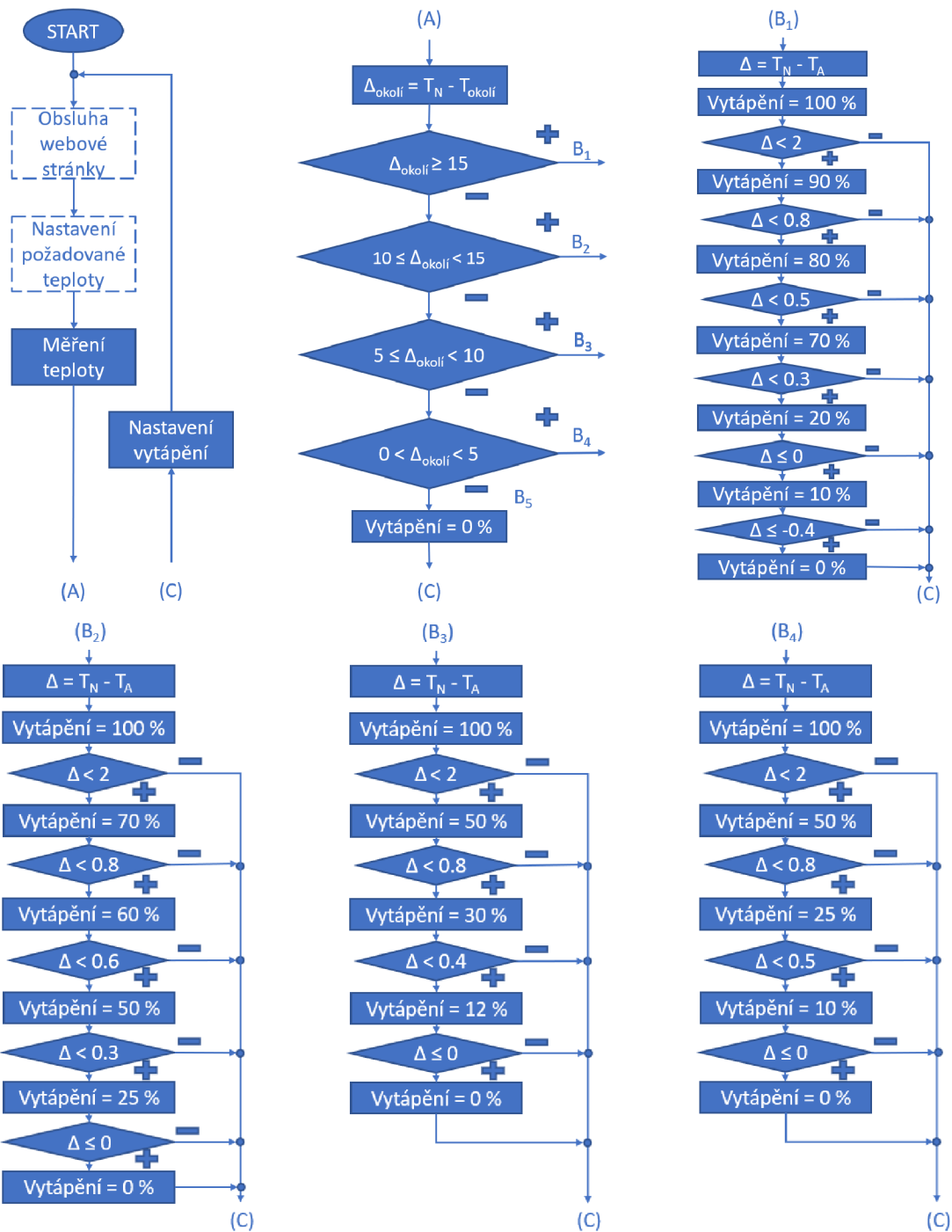
Na základě těchto parametrů je řízen celý algoritmus temperování komory. Na začátku se provede výpočet *delta0koli*, což je rozdíl teploty nastavené a okolní, a pak výpočet hodnoty *delta*, což je rozdíl teploty nastavené a aktuální.

```
delta0koli = nastavenaTeplota - teplota0koli;
delta = nastavenaTeplota - teplotaAktualni;
```

Další část je řízená fuzzy logikou z důvodu přesnosti dosažené hodnoty, tzn. že se hodnota výkonu vytápění dynamicky mění podle hodnot *delta0koli* a *delta*, což jsou rozdíly teplot. U temperování je brán ohled na rozdíl teploty okolí komory vůči požadované teplotě uvnitř komory, pokud je rozdíl větší, zvětšuje se i výkon topného tělesa. Vývojový diagram a parametry pro konkrétní situace jsou na obrázku 4.8.

Obecně je zařízení laděno tak, že teplota v komoře bude nastavena na vyšší hodnotu než je teplota okolí této komory, v opačném případě algoritmus pouze zapne ventilaci, ale teplotu neovlivní (teplota v komoře bude pravděpodobně stejná jako teplota prostředí kolem komory).

²PWM má 8bitové řízení, tedy $0.22 * 255 = 56.1$.



Obr. 4.8: Vývojový diagram řízení teploty, kde T_N je nastavená teplota, $T_{okolí}$ je teplota okolí komory, T_A je aktuální teplota, $\Delta_{okolí}$ je rozdíl teploty nastavené a okolní, Δ je rozdíl teploty nastavené a aktuální. B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 jsou smyčky, které se spustí každá pro danou podmínku v části A tohoto diagramu.

Program má celkově pět módů regulace, které jsou závislé na teplotě prostředí, ve kterém se inkubační komora nachází. Tyto módy a jejich parametry pro řízení temperování jsou popsány na obrázku 4.8 jako B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 .

Mód B_1 se spustí pokud je nastavená teplota (T_N) o $15\text{ °C} \geq$ teplota okolí komory (T_{okoli}). V tomto případě je topné těleso spínané na vysoký výkon (70-100 %) až do doby, když je aktuální teplota v komoře (T_A) o $0,3\text{ °C} < T_N$. Mód je jedinečný taky tím, že vytápění spíná i po překročení T_N , protože je předpokládáno, že prostředí odebírá značnou část tepelné energie. Topné těleso je vypnuto až ve chvíli, kdy systém naměří hodnotu o $0,4\text{ °C}$ větší než je T_N .

Mód B_2 se spustí pokud je $T_N \geq 10\text{ °C}$ a zároveň $< 15\text{ °C}$ jak T_{okoli} . V tomto případě je topné těleso spínané na vysoký výkon, ale hodnoty jsou menší než v módě B_1 . Po překročení T_N je topné těleso vypnuto.

Mód B_3 se spustí pokud je $T_N \geq 5\text{ °C}$ a zároveň $< 10\text{ °C}$ jak T_{okoli} . V tomto případě je topné těleso spínané na 50 % střidu, kdy je T_A o $2\text{ °C} < T_N$. Pokud je T_A o $0,8\text{ °C} < T_N$, tak je vytápění spínané střidou pouze 30 %.

Mód B_4 se spustí pokud je $T_N > 0\text{ °C}$ a zároveň $< 5\text{ °C}$ jak T_{okoli} . V tomto případě je topné těleso spínané na nižší výkon než je tomu v módě B_3 .

Poslední mód B_5 se spustí pokud je $T_N \leq T_{okoli}$. V tomto případě bude na výstup přivedena hodnota pro střidu 0 %, tudíž se vytápění nespne a komora nebude vytápěna.

Webová stránka

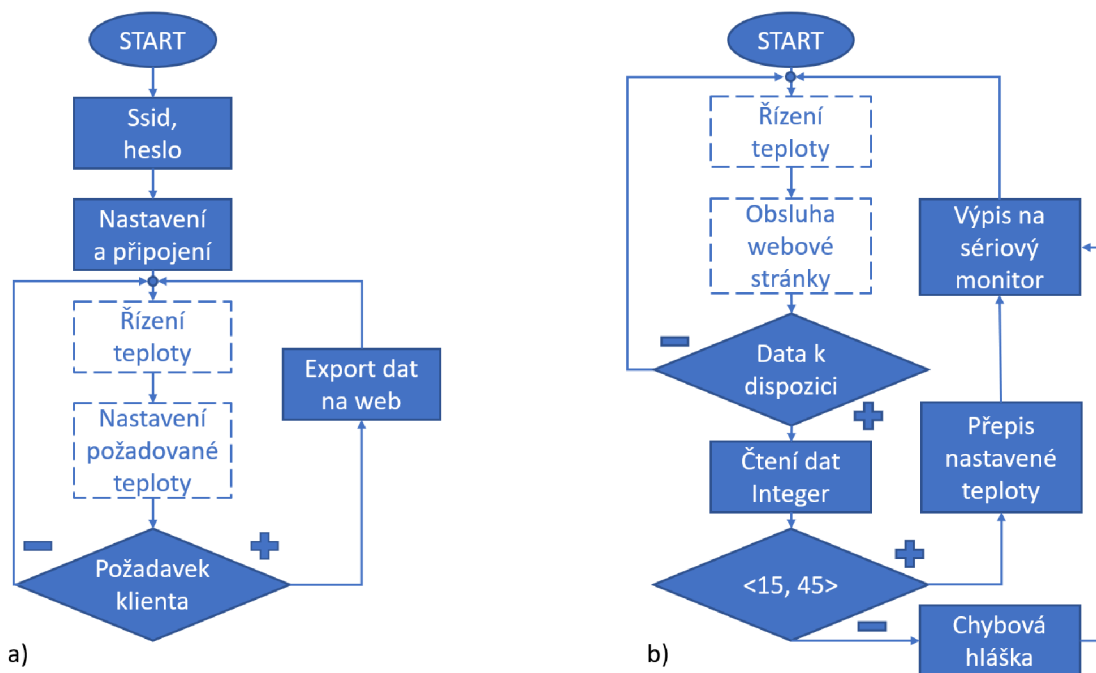
Vývojový diagram této smyčky je na obrázku 4.9 a). Na začátku je inicializace, tj. načtení knihoven, definování proměnných, seřízení časového pásma a nastavení serveru na port 80. Dále je nutno vložit do kódu název WiFi sítě a heslo.

```
const char* ssid = "navezWIFIsite";
const char* password = "heslo";
```

Ve smyčce *setup()* je připojení k WiFi síti a inicializace funkce času. Informace o připojování, IP adrese a spuštění *http serveru* se zobrazují na sériovém monitoru. Ve smyčce *loop()* je převod dat do formátu *String* pro zobrazení na webové stránce a obsluha žádosti *server.handleClient()* z webové stránky.

```
server.send(200, "text/plain", hlavicka + zapis);
```

Tato funkce po zavolání odešle na IP adresu, ze které požadavek přišel, aktuální data o stavu inkubační komory. Všechny žádosti se archivují a zobrazují se jako protokol v časovém sledu.



Obr. 4.9: Vývojový diagram a) smyčka obsluhy webové stránky, b) smyčka nastavení požadované teploty.

Nastavení požadované teploty

Vývojový diagram této smyčky je na obrázku 4.9 b). Na začátku jsou definované proměnné pro čtení ze sériového monitoru a pro požadovanou teplotu, která je na začátku nastavená na 20 °C. Ve smyčce *setup()* se nastaví rychlost pro komunikaci na sériové lince na 115200 Bd. Následně ve smyčce *loop()* probíhá čtení ze sériové linky, tento vstup je ošetřen podmínkami tak, že lze zadat pouze hodnotu z intervalu 15 až 45.

```
while (Serial.available()) {
    delay(500);
    vstup = Serial.parseInt();
    ...
}
```

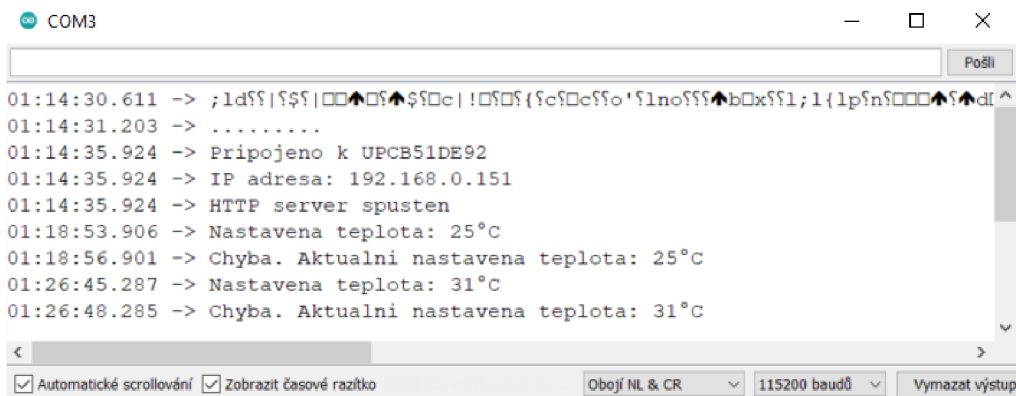
Po změně hodnoty nastavené teploty se tato informace zobrazí na sériovém monitoru a pokud je na vstupu cokoliv jiného než hodnota z rozmezí 15 až 45, tak se zobrazí chybová hláška a bude vypsaná aktuální nastavená hodnota.

4.3.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je tvořeno sériovým monitorem a webovou stránkou, kde se zobrazuje aktuální stav inkubační komory.

Sériový monitor

Sériový monitor lze zobrazit v Arduino IDE na počítači. Je potřeba nastavit rychlost komunikace na 115200 Bd, aby se navázalo spojení s čipem ESP8266. V horní části okna sériového monitoru je řádek, kterým lze komunikovat s mikrokontrolérem. Cokoliv je do řádku napsáno a odesláno, bude přijato na desce v příslušné části kódu. U monitoru si jde zvolit, zda chce uživatel zobrazit časové razítko a zda se řádky mají automaticky scrollovat.



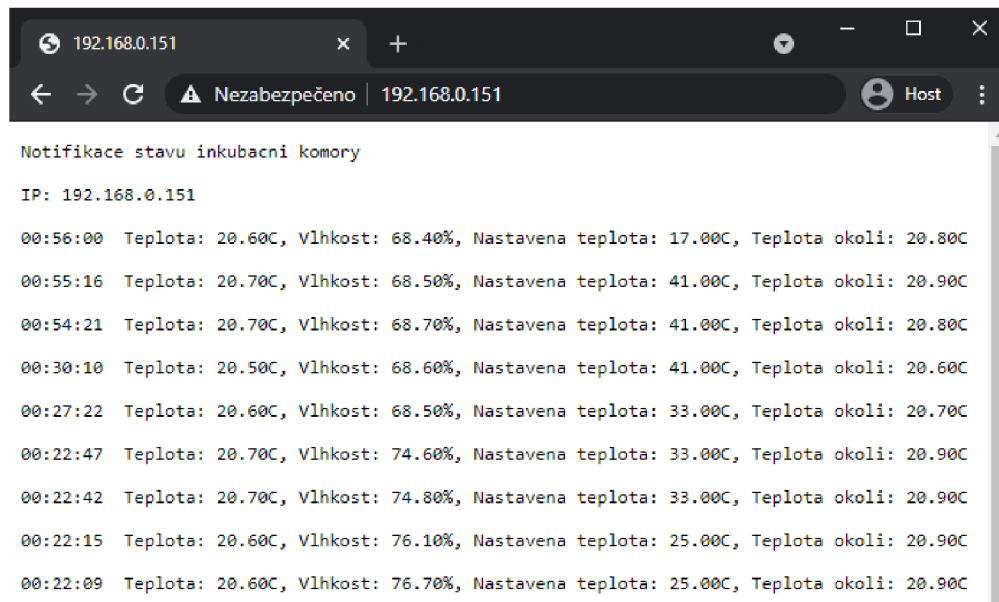
Obr. 4.10: Sériový monitor vývojového prostředí Arduino.

Na obrázku 4.10 lze shora dolů sledovat reset desky, načítání připojení k WiFi síti, připojení ke konkrétní síti, vypsání IP adresy, spuštění webové stránky, nastavení teploty, chybovou hlášku u zadání hodnoty, která nebyla z daného rozmezí, přenastavení teploty, na kterou chceme komoru temperovat a znovu chybovou hlášku. Funkce časového razítka i automatického scrollování je zapnuta.

Webová stránka

Pro zobrazení webové stránky je potřeba zadat do webového prohlížeče IP adresu, která se zobrazí na sériovém monitoru. Tato stránka zobrazuje aktuální stav inkubační komory a kdykoliv uživatel odešle požadavek, tj. načte znova tuto stránku, tak se data aktualizují. Na stránce se ukládají všechny požadavky, což ve výsledku vytvoří protokol o stavu inkubační komory v čase. Jak je znázorněno na obrázku 4.11 stránka má hlavičku s názvem a IP adresou, dále už je záznam s časovým razítkem a vypsánymi hodnotami potřebnými pro řízení komory. Aktuální hodnoty se

zapisují nahoře, aby bylo vše důležité na jednom místě a uživatel nemusel hledat v záznamech.



Obr. 4.11: Webová stránka zobrazující aktuální stav inkubační komory a okolí.

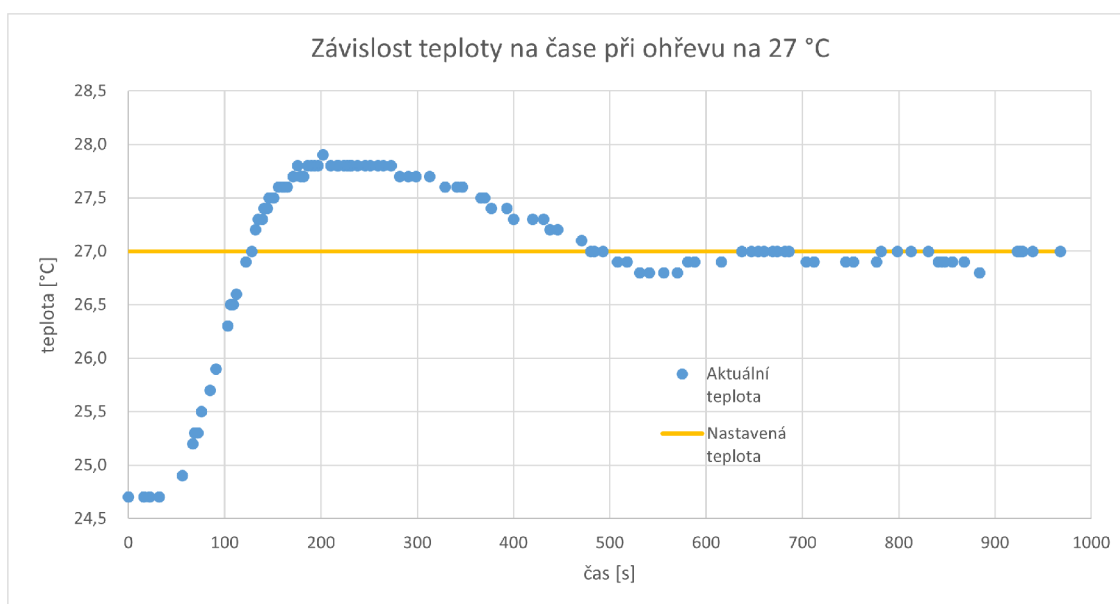
5 Experimentální ověření návrhu

Ověření řídicího firmware proběhlo na modelu komory, který tvořila uzavíratelná skleněná nádoba o objemu 200 ml. V době měření byla tato nádoba na izolační podložce a ve volném prostoru, aby se co nejlépe přiblížila reálným podmínkám. Periferie zařízení byly do nádoby vedeny víčkem. Komponenty se vzájemně nedotýkaly. Hodnota napětí pro externí napájení spínače vytápění bylo zvoleno empiricky tak, aby hodnota byla v daném rozmezí co nejnižší, ale stačila pro vytápění na nejvyšší požadovanou hodnotu teploty. Mezi jinými to vede k velmi pomalému ohřevu, což může být řešeno právě zvýšením napájení výkonového rezistoru.

5.1 Měření v laboratoři

5.1.1 Měření 1

Testování zařízení probíhalo v laboratoři při pokojové teplotě, což byla $T_{okoli} \doteq 24 \text{ }^\circ\text{C}$. Jako první byl testován ohřev na teplotu blízkou pokojové teplotě, tzn. $T_N = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Protokol z měření je v příloze A. Průběh ohřevu a stabilizace teploty je znázorněn na grafu 5.1. Ohřev na teplotu $27 \text{ }^\circ\text{C}$ trval 112 s, první hodnota v protokolu ještě



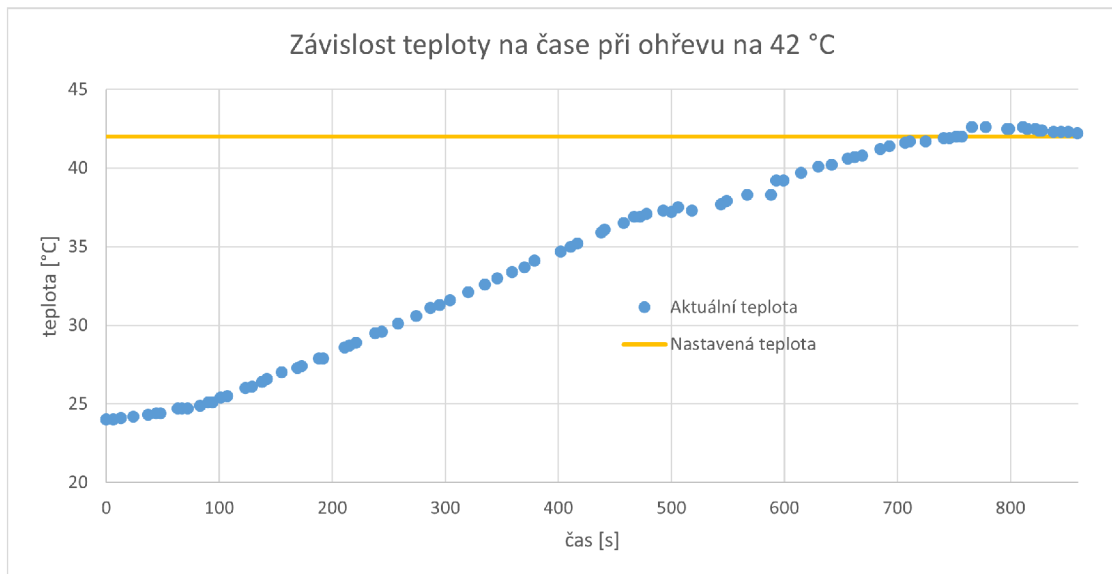
Obr. 5.1: Graf závislosti teploty na čase při ohřevu na $27 \text{ }^\circ\text{C}$.

nemá $T_N = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, takže čas je počítán až od další hodnoty. Křivka má patrný oscilační charakter. K překročení přesnosti vyhřívání (ze zadání práce přesnost na $1 \text{ }^\circ\text{C}$) však nedošlo a teplota se stabilizovala v čase 565 s. Z tvaru křivky v grafu 5.1 je

patrné, že topné těleso má značnou setrvačnost, protože dle diagramu řízení teploty na obrázku 4.8 víme, že jde o mód B_4 , který při dosažení a přesažení T_N topné těleso nespíná a přesto teplota dále rostla. V protokolu v příloze A je zaznamenán výpadek datového signálu ze senzoru DHT22 v čase 13 : 58 : 48, což je dle osy grafu čas 47 s.

5.1.2 Měření 2

Testování zařízení probíhalo v laboratoři při pokojové teplotě, což byla $T_{okoli} \doteq 24 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále byl testován ohřev na velmi vysokou teplotu, zvolena byla $T_N = 42 \text{ }^\circ\text{C}$ (ze zadání práce zařízení má temperovat do teploty $45 \text{ }^\circ\text{C}$). Protokol z měření je v příloze B. Průběh ohřevu teploty v komoře je znázorněn na grafu 5.2. Ohřev na teplotu $42 \text{ }^\circ\text{C}$ trval 752 s, první hodnota v protokolu ještě nemá $T_N = 42 \text{ }^\circ\text{C}$, takže čas je počítán až od další hodnoty. V protokolu v čase 12 : 45 : 51 je zaznamenána $T_A = 40.3 \text{ }^\circ\text{C}$, která je značně oddálena od hodnot snímaných v časovém běhu před a po ní, z tohoto důvodu tato hodnota nebyla zařazena do vyhodnocení dat pro graf. Řídící program však tyto odlehlé hodnoty ošetřeny nemá. Dle časové osy grafu 5.2 byla tato hodnota naměřena v čase 588 s, ve stejném místě lze sledovat vychýlení hodnot T_A , pravděpodobně způsobené chvilkovým snížením výkonu topného tělesa.



Obr. 5.2: Graf závislosti teploty na čase při ohřevu na $42 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tvar křivky v grafu 5.2 má ze začátku téměř lineární průběh, protože mód B_1 splňuje první podmínku až do hodnoty $T_A = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, což znamená, že vytápění je sepnuto střídou 100 %. V průběhu měření měl plášť komory teplotu přibližně stejnou jako byla teplota v komoře. V protokolu v příloze B je zaznamenán výpadek datového signálu ze senzoru DHT11 v čase 12 : 38 : 25.

5.2 Diskuze výsledků

Řešení této bakalářské práce splňuje požadavky ze zadání práce, avšak není ideální. Samotný program řídící temperování komory by mohl mít ošetřeny chyby měření senzorů (ojedinělé vzdálené hodnoty). Podmínky pro řízení vytápění fuzzy logikou by šlo upravit tak, aby nedocházelo k tak velkému oscilačnímu zkreslení.

Uživatelské rozhraní původně navržené i odzkoušené, s ovládáním rotačním enkodérem menu na displeji, bylo přehlednější i uživatelsky přívětivější. Uživatel by nebyl nucen využívat vývojové prostředí Arduino přes počítač a zařízení by bylo mnohem kompaktnější. Navíc pokud by se použil jiný zdroj napájení, byla by tato komora přenosná a závislá jen na napájení a připojení k WiFi síti. Další možností by bylo nastavení požadované teploty přes webovou stránku a uživatel by měl všechny informace na jednom místě s možností ovládání komory z jakéhokoliv zařízení s webovým prohlížečem.

Problémů, na které jsem narazila během tvoření práce, je více. Kapacita zobrazených dat na webové stránce je omezená. Protokol tištěný z webové stránky nepřekročí čtyři listy formátu A4, protože kapacita proměnné, do které se to v programu ukládá, je omezena a po naplnění se smaže. V průběhu ověřování funkčnosti zařízení a tvoření fuzzy logiky jsem zjistila, že senzor, který se nachází v komoře, se po čase nahřeje na stejnou teplotu, jaká je v komoře, a po přemístění do chladnějšího prostředí, měří zkreslené hodnoty, tzn. vyšší než reálně jsou. V průběhu testování jsem taky zjistila, že dlouhodobý ohřev vzduchu výrazně snižuje vlhkost vzduchu v komoře (což je logické), avšak zaznamenala jsem, že ohřev suchého vzduchu byl rychlejší než ohřev vzduchu s vyšší vlhkostí.

Jako klady mého řešení shledávám měření teploty uvnitř komory a teploty prostředí, ve kterém se komora nachází, pro vyhodnocení způsobu vytápění. S tím je spojeno řízení teploty v různých módech nastavení parametrů. Velkou výhodou je samozřejmě komunikace přes WiFi síť a zobrazování dat na webové stránce.

Závěr

Bakalářská práce se věnuje tématu inkubační komory s nucenou cirkulací a notifikací stavu, dále hardwarovému a firmwarovému návrhu systému, realizaci zařízení a ověření funkčnosti.

V úvodní části je řešeno na téma senzorů, vytápění a cirkulace v komoře. Cílem bylo seznámení se s problematikou měření teploty a vlhkosti v inkubátoru a možnosti řešení vytápění zařízení. Tento úkol byl realizován postupně, v první kapitole jsou shrnuty senzory obecně a samostatně senzory teploty a vlhkosti. Ve druhé kapitole je diskutováno vytápění od topného tělesa až ke způsobům vytápění.

Další část se věnuje samotnému návrhu zařízení. Návrh je realizován dle předem stanovených požadavků a obsahuje blokové schéma zařízení, popis bloků a programové řešení. Tento návrh ve finále nebyl plně realizovatelný, a proto se realizace zařízení v některých částech původního návrhu liší.

Systém byl nejprve realizován dle původního návrhu s uživatelským rozhraním tvořeným rotačním enkodérem a displejem. Řízení teploty a obsluha menu byly realizovány a odzkoušeny na desce Arduino Uno, bohužel se k tomuto zařízení opakovaně nedařilo připojit modul ESP-01 pro komunikaci přes WiFi síť. Projekt byl přehodnocen a dále byl realizován jiným způsobem na desce WeMos D1 R1 s čipem ESP8266. Návrh byl realizován na čipu ESP8266 se senzory DHT11, DHT22, výkonovým rezistorem PWR221T-30 a mikro ventilátorem SEPA.

V poslední části je ověřována funkčnost zařízení. Na straně 53 jsou výsledky měření v laboratoři a jejich vyhodnocení v diskuzi výsledků na straně 55. Jak je v diskuzi zmíněno, problémů které nastaly v průběhu realizace a ověřování, je celá řada, ale řešení má i své klady. Měření teploty uvnitř komory a teploty prostředí, ve kterém se komora nachází, pro vyhodnocení způsobu vytápění. S tím je spojeno řízení teploty v různých módech nastavení parametrů. Velkou výhodou je samozřejmě komunikace přes WiFi síť a zobrazování dat na webové stránce.

S ohledem na dosažené výsledky lze konstatovat, že zadání práce bylo splněno.

Literatura

- [1] ARDUINO UNO REV3. In: ARDUINO: ARDUINO store [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3?queryID=undefined>>.
- [2] Arduino WEMOS D1 UNO. HWKITCHEN [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <<https://www.hwkitchen.cz/wemos-d1-uno-wifi-esp8266-ota-ch340g/>>
- [3] BAŠTA, Jiří. *Otopné plochy - úvod do problematiky: Teplotnické chování otopné plochy a pohoda prostředí*. In: TZB info [online]. ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí, 10.2.2006 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <<https://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/3052-otopne-plochy-uvod-do-problematiky>>.
- [4] BAŠTA, Jiří a Roman VAVŘIČKA. *Otopné plochy (I): Charakteristiky otopných těles*. In: TZB info [online]. ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí, 13.2.2006 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <<https://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/3060-otopne-plochy-i-charakteristiky-otopnych-teles>>.
- [5] BAŠTA, Jiří a Roman VAVŘIČKA. *Otopné plochy (II): Druhy otopných těles*. In: TZB info [online]. ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí, 15.2.2006 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <<https://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/3064-otopne-plochy-ii-druhy-otopnych-teles>>.
- [6] BURBAKI, N. *Elektrotepelná zařízení*. PowerWiki: Elektroenergetika [online]. Katedry elektroenergetiky, FEL, ČVUT, 2008, 19.10.2005 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/00EET_Eletrotepelny0hrev>.
- [7] *Co je to PoE?*: NETGEAR Support. NETGEAR [online]. 08.05.2020 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <<https://kb.netgear.com/cs/209/Co-je-to-PoE-Power-over-Ethernet>>.
- [8] Conrad: SEPA MF_10A03A-ST Axial fan [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.conrad.com/p/>
- [9] DOLEŽAL, Antonín. *Středočeský vlastivědný sborník: Počátky historie kojeneckých inkubátorů*. 22. Hradec Králové: Středočeské muzeum v Roztokách u Prahy, 2004. ISSN 0862-2043.

- [10] DMITRIEV, RI, AV ZHDANOV, GV PONOMAREV, DV YASHUNSKY a DB PAPKOVSKY. *Intracellular oxygen-sensitive phosphorescent probes based on cell-penetrating peptides*. Anal Biochem. 2010, 398(1), 24–33.
- [11] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [12] *Elektrická topná tělesa*. Energie pro lidi: Úspora pro Váš domov [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <<https://www.energiepro lidi.cz/blog/technologie/elektricka-topna-telesa/>>.
- [13] FABIANOVÁ, Katarína *Monoklimatická inkubační komora - řízení koncentrace plynů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 80 s. a VIII s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Sekora.
- [14] FOUCZECH - topenářský expert. *Jak funguje konvenční vytápění?* In: YouTube [online]. 9.5.2019 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <<https://i.ytimg.com/vi/B9jW8pDoHT4/maxresdefault.jpg>>.
- [15] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 4th Edition. New York Heidelberg Dordrecht London: Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [16] Hallroad.org: WeMos D1 R1 WiFi ESP8266 [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://hallroad.org/wemos-d1-mini-wifi-development-board-esp8266-in-pakistan-en.html>
- [17] HRUŠKA, František *Senzory. Fyzikální principy, úpravy signálů, příklady použití. Učební texty*. 2.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, září 2011, s.202. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [18] HUBÁLEK, Jaromír. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy* [online]. In: . Brno: UMEL FEKT VUT [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <<https://docplayer.cz/40625897-Mikrosenzory-a-mikroelektromechanicke-systemy.html>>.
- [19] HUBÁLEK, Jaromír. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy* [online]. In: . Brno: UMEL FEKT VUT, 2012, s.139 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <<https://docplayer.cz/33524871-Mikrosenzory-a-mikroelektromechanicke-systemy.html>>.
- [20] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, 540 s. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.

- [21] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [22] Laskarduino: *Chladič lisovaný H TO-220* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/chladic-lisovany-h-to-220--cerny/>
- [23] MARTINEK, Roman. *Inteligentní senzor. Senzory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/senzory/inteligent.html>.
- [24] Mouser electronics: Bourns PWR221T-30 Power Resistor [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/new/bourns/bournspwr221t-30/>
- [25] NĚMEC, Václav. *Senzory v mechatronických soustavách. Informační web nejen pro žáky oboru strojírenství - mechatronika* [online]. Podbořany, 2015 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: https://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-mn-s-10_senzory_uvod.pdf.
- [26] NXP Semiconductor: *KTY81 Silicon temperature sensors*. [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: [https://www.nxp.com/part/KTY81#/>](https://www.nxp.com/part/KTY81#/).
- [27] ORLÍKOVÁ, Soňa. *Inteligentní senzory*. UAMT FEKT VUT Brno, 2003. Dostupné také z: <http://old.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2003/1/Orlikova.ppt>.
- [28] *Otopná tělesa: Rozdělení otopných těles* [online]. In: . 2016 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: [https://docplayer.cz/>](https://docplayer.cz/).
- [29] PENHAKER, Marek, Jan KUBÍČEK, Barbora HRVOLOVÁ a Martin IMRAMOVSKÝ. *Snímače a senzory v biomedicíně*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3104-6.
- [30] POLYIMID-KAPTONOVÁ VODIVÁ FÓLIE 60R. PS electronic, s.r.o. [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <http://www.pselectronic.cz/k5602-044-polyimid-kaptonova-vodiva-folie-60r-26x20cm.html>
- [31] Proto Supplies: *WiFi procesor ESP8266 D1 R1* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://protosupplies.com/product/esp8266-di-wifi-with-uno-footprint/>
- [32] Pulzně šířková modulace - PWM [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: http://352lab.vsb.cz/Podklady/06_pic-html/od5/od5_8.htm

- [33] RIPKA, Pavel. *Senzory tepelných veličin*. ČVUT: Moodle: Senzory a měření [online]. Praha: FEL ČVUT, 2014 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/785/mod_resource/content/1/09_teploata%20text%20.pdf>
- [34] Senzory v mechatronických soustavách. *Informační web nejen pro žáky oboru strojírenství - mechatronika* [online]. Podbořany [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-mn-s-10_senzory_uvod.pdf>.
- [35] *Snímače teploty*. In: Automatizace [online]. Integrovaná střední škola, Nová Paka, Kumburská 846 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <<http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20teploty.pdf>>.
- [36] *Teplovní senzor digitální DALLAS DS18B20*. Drátek.cz [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1187-teplotni-senzor-digitalni-dallas-ds18b20.html>
- [37] Vlhkost vzduchu [online]. Katedra Fyziky PřF OU. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <<http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/vlhkost.htm>>.
- [38] VOŽDA, Michal *Mikroprocesorem řízené měření a regulace teploty*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 65 s. a XV s. příloh. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Sekora
- [39] WEBMASTER. *DHT11 and DHT22 sensors: Measure humidity and temperature with Raspberry Pi*. Meccanismo complesso [online]. 16.10.2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.meccanismocomplesso.org/wp-content/uploads/2020/10/Sensori-DHT11-e-DHT22.jpg>
- [40] WEBMASTER. *DHT11 and DHT22 sensors: Measure humidity and temperature with Raspberry Pi*. Meccanismo complesso [online]. 16.10.2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.meccanismocomplesso.org/en/>
- [41] WILSON, Jon, ed. *Sensor technology handbook*. Editor Jon S. WILSON. Burlington: Elsevier, c2005. Newnes. ISBN 0-7506-7729-5.
- [42] *Způsoby vytápění: Předávání tepelné energie do vytápěných prostor*. In: Kamnářství Blatná s.r.o. [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <<https://kamnarstvi-blatna.cz/zpusoby-vytapeni/>>.

Seznam příloh

A Protokol z měření č. 1	62
B Protokol z měření č. 2	65

A Protokol z měření č. 1

Notifikace stavu inkubacní komory

IP: 192.168.43.166

14:14:09 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:13:40 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:13:30 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:13:27 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:13:24 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 34.50%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:45 Teplota: 26.80C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:29 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:17 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:09 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:06 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:12:02 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:11:52 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:11:34 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:11:20 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:11:03 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:10:58 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:10:34 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:10:26 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.10C
14:09:53 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:09:45 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.10C
14:09:27 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:09:23 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 34.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:09:15 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:09:10 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:09:01 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:08:55 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:08:48 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:08:38 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:08:17 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:07:49 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:07:42 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:07:31 Teplota: 26.80C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:07:17 Teplota: 26.80C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:07:02 Teplota: 26.80C, Vlhkost: 35.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:52 Teplota: 26.80C, Vlhkost: 35.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:39 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:29 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 35.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:14 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:05 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 33.90%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:06:01 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 35.00%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:05:52 Teplota: 27.10C, Vlhkost: 35.00%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C

14:00:27 Teplota: 27.50C, Vlhkost: 36.80%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 24.00C
14:00:25 Teplota: 27.40C, Vlhkost: 36.80%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:22 Teplota: 27.40C, Vlhkost: 36.90%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:20 Teplota: 27.30C, Vlhkost: 36.90%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:16 Teplota: 27.30C, Vlhkost: 37.00%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:13 Teplota: 27.20C, Vlhkost: 37.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:09 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 37.10%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
14:00:03 Teplota: 26.90C, Vlhkost: 37.30%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:59:53 Teplota: 26.60C, Vlhkost: 37.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:59:50 Teplota: 26.50C, Vlhkost: 37.50%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:59:47 Teplota: 26.50C, Vlhkost: 37.60%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:59:44 Teplota: 26.30C, Vlhkost: 37.60%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:59:32 Teplota: 25.90C, Vlhkost: 37.70%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:59:26 Teplota: 25.70C, Vlhkost: 37.70%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:59:17 Teplota: 25.50C, Vlhkost: 37.80%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:59:13 Teplota: 25.30C, Vlhkost: 37.70%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:59:10 Teplota: 25.30C, Vlhkost: 37.80%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:59:08 Teplota: 25.20C, Vlhkost: 37.80%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:58:57 Teplota: 24.90C, Vlhkost: 36.50%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:58:48 Teplota: nanC, Vlhkost: nan%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:58:33 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 37.50%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:58:23 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 37.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.90C
13:58:17 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 37.40%, Nastavena teplota: 27.00C, Teplota okoli: 23.80C
13:58:01 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 37.40%, Nastavena teplota: 20.00C, Teplota okoli: 23.80C

B Protokol z měření č. 2

Notifikace stavu inkubační komory

IP: 192.168.43.166

12:50:14 Teplota: 42.30C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:50:08 Teplota: 42.30C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:50:01 Teplota: 42.30C, Vlhkost: 27.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:49:51 Teplota: 42.40C, Vlhkost: 27.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:49:48 Teplota: 42.40C, Vlhkost: 27.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:49:45 Teplota: 42.50C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:49:38 Teplota: 42.50C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:49:34 Teplota: 42.60C, Vlhkost: 39.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:49:22 Teplota: 42.50C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:49:20 Teplota: 42.50C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:49:01 Teplota: 42.60C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:48:49 Teplota: 42.60C, Vlhkost: 27.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:48:40 Teplota: 42.00C, Vlhkost: 27.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:48:35 Teplota: 42.00C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:48:29 Teplota: 41.90C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:48:24 Teplota: 41.90C, Vlhkost: 27.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:48:08 Teplota: 41.70C, Vlhkost: 27.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:47:54 Teplota: 41.70C, Vlhkost: 27.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:47:50 Teplota: 41.60C, Vlhkost: 27.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:47:36 Teplota: 41.40C, Vlhkost: 27.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.50C
12:47:28 Teplota: 41.20C, Vlhkost: 27.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:47:12 Teplota: 40.80C, Vlhkost: 27.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:47:05 Teplota: 40.70C, Vlhkost: 28.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:46:59 Teplota: 40.60C, Vlhkost: 28.10%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:46:45 Teplota: 40.20C, Vlhkost: 28.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.60C
12:46:33 Teplota: 40.10C, Vlhkost: 28.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:46:18 Teplota: 39.70C, Vlhkost: 28.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:46:02 Teplota: 39.20C, Vlhkost: 28.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:45:56 Teplota: 39.20C, Vlhkost: 28.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:45:51 Teplota: 40.30C, Vlhkost: 29.50%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:45:30 Teplota: 38.30C, Vlhkost: 29.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.70C
12:45:12 Teplota: 37.90C, Vlhkost: 29.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:45:07 Teplota: 37.70C, Vlhkost: 29.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:44:41 Teplota: 37.30C, Vlhkost: 29.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:44:29 Teplota: 37.50C, Vlhkost: 30.10%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:44:23 Teplota: 37.20C, Vlhkost: 30.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:44:16 Teplota: 37.30C, Vlhkost: 30.50%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:44:01 Teplota: 37.10C, Vlhkost: 31.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:43:55 Teplota: 36.90C, Vlhkost: 31.10%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:43:50 Teplota: 36.90C, Vlhkost: 31.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:43:41 Teplota: 36.50C, Vlhkost: 31.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C
12:43:24 Teplota: 36.10C, Vlhkost: 31.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okolí: 23.80C

12:43:21 Teplota: 35.90C, Vlhkost: 31.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:43:00 Teplota: 35.20C, Vlhkost: 32.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:42:54 Teplota: 35.00C, Vlhkost: 32.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:42:45 Teplota: 34.70C, Vlhkost: 32.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:42:22 Teplota: 34.10C, Vlhkost: 33.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:42:13 Teplota: 33.70C, Vlhkost: 33.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:42:02 Teplota: 33.40C, Vlhkost: 33.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:41:49 Teplota: 33.00C, Vlhkost: 34.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:41:38 Teplota: 32.60C, Vlhkost: 34.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:41:23 Teplota: 32.10C, Vlhkost: 35.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:41:07 Teplota: 31.60C, Vlhkost: 35.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:40:58 Teplota: 31.30C, Vlhkost: 36.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:40:50 Teplota: 31.10C, Vlhkost: 36.30%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:40:37 Teplota: 30.60C, Vlhkost: 36.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:40:21 Teplota: 30.10C, Vlhkost: 37.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.70C
12:40:07 Teplota: 29.60C, Vlhkost: 37.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:40:01 Teplota: 29.50C, Vlhkost: 38.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:39:44 Teplota: 28.90C, Vlhkost: 38.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.80C
12:39:38 Teplota: 28.70C, Vlhkost: 38.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:39:34 Teplota: 28.60C, Vlhkost: 39.10%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:39:15 Teplota: 27.90C, Vlhkost: 39.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:39:11 Teplota: 27.90C, Vlhkost: 39.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:38:56 Teplota: 27.40C, Vlhkost: 40.50%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:38:52 Teplota: 27.30C, Vlhkost: 40.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 23.90C
12:38:38 Teplota: 27.00C, Vlhkost: 41.20%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:38:25 Teplota: 26.60C, Vlhkost: 41.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: nanC
12:38:21 Teplota: 26.40C, Vlhkost: 41.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:38:12 Teplota: 26.10C, Vlhkost: 41.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:38:06 Teplota: 26.00C, Vlhkost: 42.10%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.00C
12:37:50 Teplota: 25.50C, Vlhkost: 42.40%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.10C
12:37:44 Teplota: 25.40C, Vlhkost: 42.50%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.10C
12:37:37 Teplota: 25.10C, Vlhkost: 42.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.10C
12:37:33 Teplota: 25.10C, Vlhkost: 42.60%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.10C
12:37:26 Teplota: 24.90C, Vlhkost: 42.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.20C
12:37:15 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 42.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.20C
12:37:10 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 42.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.30C
12:37:06 Teplota: 24.70C, Vlhkost: 43.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:51 Teplota: 24.40C, Vlhkost: 43.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:47 Teplota: 24.40C, Vlhkost: 43.00%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:40 Teplota: 24.30C, Vlhkost: 42.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:27 Teplota: 24.20C, Vlhkost: 42.70%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:16 Teplota: 24.10C, Vlhkost: 41.50%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:09 Teplota: 24.00C, Vlhkost: 41.90%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:36:03 Teplota: 24.00C, Vlhkost: 41.80%, Nastavena teplota: 42.00C, Teplota okoli: 24.40C
12:35:39 Teplota: 23.90C, Vlhkost: 40.50%, Nastavena teplota: 20.00C, Teplota okoli: 24.30C