



České vysoké  
učení technické  
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

Diplomová práce

Systém pro monitorování vnitřního prostředí  
budov založený na kombinovaných senzorech

Bc. Jan Berg

Školitel: Ing. Jakub Svatoš, Ph.D.  
Obor: Inteligentní budovy  
2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Berg** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484283**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Systém pro monitorování vnitřního prostředí budov založený na kombinovaných senzorech**

Název diplomové práce anglicky:

**A system for monitoring of the buildings indoor environment based on combined sensors**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte modulární systém pro monitorování vnitřního prostředí budov. Systém se bude skládat z modulární jednotky obsahující typické senzory pro měření kvality vnitřního prostředí jako je např. koncentrace CO<sub>2</sub>, teplota, vlhkost, tlak, a případně další a nadřazeného systému, se kterým bude komunikovat po ethernetu. Nadřazený systém bude umožňovat zobrazení aktuálních dat a zároveň statistiku a historii v čase. Součástí práce bude i jednoduchá kalibrace navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ripka, P., Ďaďo, S., Kreidl, M., Novák, J.: Senzory (opr. dotisk). Skripta ČVUT FEL, Praha 2007
- [2] Placko D.: Fundamentals of Instrumentation and Measurement, ISTE 2007, ISBN 1-905209-39-8
- [3] Northrop, R.B.: Introduction to Instrumentation and Measurements, CRC 2005, 0-8493-3773-9
- [4] P. Chen and Z. Lu, "A Web-Based Indoor Environment Monitoring System Using Wireless Sensor Networks," 2013 International Conference on Computational and Information Sciences, 2013

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jakub Svatoš, Ph.D. katedra měření FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **16.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce zimního semestru 2024/2025**

\_\_\_\_\_  
Ing. Jakub Svatoš, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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



## Čestné prohlášení

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

V Mohelnici dne 31. 12. 2023

.....

Jan Berg



## Poděkování

Poděkování patří vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubovi Svatošovi, Ph.D., za ochotu, vstřícnost a odbornou pomoc, kterou mi věnoval při vypracování této práce. Dále děkuji své rodině a přátelům, kteří mě v průběhu studia a při zpracování diplomové práce kontinuálně podporovali.

V Mohelnici dne 31. 12. 2023

.....

Jan Berg





## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá komplexním návrhem a realizací modulárního systému pro monitorování vnitřního prostředí budov. Hlavním cílem práce je vytvoření a kalibrace monitorovacího systému, včetně interpretace naměřených dat, s cílem poskytnout uživateli přehled o stavu vnitřního prostředí.

Začátek diplomové práce je věnován teoretickému rozboru principů jednotlivých senzorů, způsobů měření a přehledu komunikačních protokolů, včetně dostupných řešení pro sběr, ukládání a vizualizaci dat. Následuje konkrétní návrh modulárního systému s důrazem na rozmanitost komunikačních protokolů, včetně přehledu zvolených koncových prvků, zpracování a vizualizace naměřených dat.

V závěru diplomové práce je popsán proces kalibrace využívaných senzorů včetně analýzy a interpretace naměřených dat.

## **Klíčová slova**

Vnitřní prostředí, senzor, modularita, teplota, vlhkost, barometrický tlak, CO<sub>2</sub>.



## **Abstract**

This diploma thesis deals with the complex design and implementation of a modular system for monitoring the indoor environment of buildings. The main purpose of the thesis is to create and calibrate a monitoring system, including the interpretation of the measured data to provide the user with an overview of the state of the indoor environment.

The beginning of the diploma thesis is devoted to a theoretical analysis of the principles of each sensor, measurement methods, and an overview of communication protocols including available solutions for data acquisition, storage, and visualization. This is followed by the specific design of the modular system with attention to the variety of communication protocols, including an overview of the selected sensors, processing, and presentation of the measured data.

The thesis concludes with a description of the calibration process of the used sensors, including analysis and interpretation of the measured data.

## **Keywords**

Indoor environment, sensor, modularity, temperature, humidity, barometric pressure, CO<sub>2</sub>.



## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Úvod do monitorování vnitřního prostředí .....	3
2.1	Principy monitorování vnitřního prostředí .....	4
2.1.1	Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí .....	4
2.2	Přehled senzorů pro měření kvality vnitřního prostředí .....	5
2.2.1	Měření teploty.....	5
2.2.2	Měření vlhkosti .....	6
2.2.3	Senzory vlhkosti .....	9
2.2.4	Měření barometrického tlaku .....	10
2.2.5	Senzory koncentrace CO <sub>2</sub> .....	10
2.2.6	Další senzory používané v budovách .....	11
2.3	Přehled komunikačních protokolů a síťových technologií .....	12
2.3.1	Frekventované protokoly pro komunikaci se senzory.....	12
2.3.2	Sériová sběrnice UART .....	13
2.3.3	Ethernet.....	13
2.3.4	Sériová sběrnice I <sup>2</sup> C .....	13
2.3.5	SPI sběrnice.....	15
2.4	Přehled dostupných řešení pro sběr, ukládání a zobrazení dat .....	16
3	Návrh modulárního systému pro monitorování vnitřního prostředí budov ..	19
3.1	Koncept navrhovaného systému .....	19
3.2	Výběr senzorů .....	20
3.2.1	Senzor CO <sub>2</sub> MH-Z16.....	21
3.2.2	Senzor barometrického tlaku BMP280 .....	24
3.2.3	Senzor vlhkosti a teploty vzduchu SHT30.....	28
3.3	Mikrokontrolér ELEGOO Mega 2560 R3.....	32

3.4	Ethernetová komunikace a síťové rozhraní.....	33
3.5	Přehled koncových prvků, jejich komunikace a napájení.....	33
3.6	Návrh a fyzická konstrukce systému.....	34
3.6.1	Konstrukce fyzického pouzdra pro měřicí systém.....	36
3.7	Rozhraní pro uživatele, vizualizace dat.....	37
3.7.1	Nahrávání dat na ThingSpeak.....	37
3.7.2	Zobrazení dat v ThingSpeak.....	38
3.7.3	MATLAB aplikace.....	39
4	Měření a kalibrace.....	41
4.1	Kalibrace.....	41
4.1.1	Kalibrace měření koncentrace oxidu uhličitého MH-Z16.....	41
4.1.2	Kalibrace měření barometrického tlaku BMP280.....	42
4.1.3	Kalibrace senzoru SHT30.....	46
4.2	Naměřená data.....	52
4.2.1	Regulace vytápění v místnosti.....	52
4.2.2	Průběh po režimu dovolené.....	53
4.2.3	Vyvětrání místnosti.....	55
5	Závěr.....	57
	Seznam literatury a zdrojů informací.....	59
	Seznam příloh.....	61

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Princip IR analyzátoru plynu [7] .....	11
<b>Obrázek 2:</b> Sběrnice I <sup>2</sup> C.....	14
<b>Obrázek 3:</b> Princip komunikace na I <sup>2</sup> C sběrnici .....	14
<b>Obrázek 4:</b> Průběh komunikace na I <sup>2</sup> C sběrnici .....	15
<b>Obrázek 5:</b> Blokové schéma systému .....	20
<b>Obrázek 6:</b> Senzor pro měření koncentrace CO <sub>2</sub> MH-Z16 .....	21
<b>Obrázek 7:</b> Piny MH-Z16.....	22
<b>Obrázek 8:</b> Schématické zapojení senzoru MH-Z16 .....	23
<b>Obrázek 9:</b> Vývojový diagram senzoru MH-Z16.....	24
<b>Obrázek 10:</b> Senzor pro měření barometrického tlaku.....	25
<b>Obrázek 11:</b> Piny BMP280 .....	25
<b>Obrázek 12:</b> Schématické zapojení senzoru BMP280.....	26
<b>Obrázek 13:</b> Vývojový diagram senzoru BMP280.....	27
<b>Obrázek 14:</b> Senzor vlhkosti a teploty vzduchu SHT30 .....	29
<b>Obrázek 15:</b> Piny SHT30.....	29
<b>Obrázek 16:</b> Schématické zapojení senzoru SHT30.....	30
<b>Obrázek 17:</b> Vývojový diagram senzoru SHT30.....	31
<b>Obrázek 18:</b> Mikrokontrolér ELEGOO MEGA 2560 R3.....	32
<b>Obrázek 19:</b> Ethernetový shield ENC28J60 .....	33
<b>Obrázek 20:</b> Koncept řešení.....	34
<b>Obrázek 21:</b> Koncept řešení se shieldem.....	35
<b>Obrázek 22:</b> Finální modulární systém.....	37
<b>Obrázek 23:</b> Zobrazení dat na platformě ThingSpeak.....	39
<b>Obrázek 24:</b> Rozhraní MATLAB aplikace.....	40
<b>Obrázek 25:</b> Kalibrace senzoru MH-Z16 .....	42
<b>Obrázek 26:</b> Měření pomocí kalibrátoru Druck PACE 6000.....	43
<b>Obrázek 27:</b> Měření v klimatické komoře .....	47

## Seznam grafů

<b>Graf 1:</b> Teplotní závislost odporových senzorů teploty [1] .....	6
<b>Graf 2:</b> Stavový diagram syté vodní páry [6] .....	8
<b>Graf 3:</b> Průběh měření tlaku senzorem BMP280 .....	45
<b>Graf 4:</b> Průběh odchylky naměřeného tlaku od nastaveného tlaku po korekci .....	46
<b>Graf 5:</b> Průběh měření teploty senzorem SHT30 .....	49
<b>Graf 6:</b> Průběh odchylky naměřené teploty od nastavené teploty .....	50
<b>Graf 7:</b> Průběh měření relativní vlhkosti senzorem SHT30 .....	51
<b>Graf 8:</b> Průběh odchylky naměřené rel. vlhkosti od nastavené rel. vlhkosti .....	51
<b>Graf 9:</b> Průběh teploty v místnosti .....	52
<b>Graf 10:</b> Průběh koncentrace CO <sub>2</sub> v místnosti .....	53
<b>Graf 11:</b> Průběh teploty v místnosti .....	54
<b>Graf 12:</b> Průběh relativní vlhkosti v místnosti .....	54
<b>Graf 13:</b> Změna koncentrace CO <sub>2</sub> při vyvětrání místnosti .....	55

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> Orientační účinky CO <sub>2</sub> [5] .....	10
<b>Tabulka 2:</b> Popis pinů MH-Z16 .....	22
<b>Tabulka 3:</b> Příkaz pro MH-Z16 .....	23
<b>Tabulka 4:</b> Odpověď z MH-Z16 .....	23
<b>Tabulka 5:</b> Popis pinů BMP280 .....	25
<b>Tabulka 6:</b> Popis pinů MH-Z16 .....	29
<b>Tabulka 7:</b> Soupis koncových prvků .....	34
<b>Tabulka 8:</b> Naměřené hodnoty tlaku senzorem BMP280 .....	44
<b>Tabulka 9:</b> Naměřené hodnoty teploty senzorem SHT30 .....	49
<b>Tabulka 10:</b> Naměřené hodnoty relativní vlhkosti senzorem SHT30 .....	50



# 1 Úvod

V současné době se lidé stále více zdržují ve vnitřních prostorách budov. V kombinaci s narůstajícím trendem zateplování obálek budov a snahou minimalizovat energetickou náročnost na minimum, se kterou se často pojí absence větrání, dochází téměř k vzduchotěsnému uzavření vnitřních prostor. Tento trend zateplování budov vede k řadě potenciálních problémů, včetně akumulace škodlivin a nedostatečné výměny vzduchu, což může mít za následek zvýšený výskyt respiračních onemocnění, alergií a celkově sníženou pohodu uživatelů. Zatímco v komerčních a průmyslových prostorách se stále více dbá na kvalitu vnitřního prostředí pomocí vzduchotechnických systémů, v rezidenčních oblastech je situace odlišná. Hlavními překážkami, které brání rychlejšímu rozšíření systémů úpravy vzduchu v domácnostech, mohou být pořizovací náklady, prostorové požadavky v případě stávajících objektů a nedostatečná informovanost široké veřejnosti.

Cílem diplomové práce je návrh a realizace modulárního systému pro monitorování parametrů vnitřního prostředí budov, jako jsou koncentrace CO<sub>2</sub>, teplota, vlhkost a tlak, společně s kalibrací senzorů a zpracováním naměřených dat.

Úvodní část diplomové práce se zabývá významem monitorování vnitřního prostředí společně se způsoby měření jednotlivých veličin, včetně rozboru použitých komunikačních protokolů a současných dostupných řešení pro sběr a ukládání dat.

V následující části je rozebrán koncept navrženého systému společně s výběrem jednotlivých komponent. Následuje popis fyzické konstrukce, proces vytváření pouzdra pomocí 3D tisku pro umístění a ochranu koncových prvků, včetně vizualizačního rozhraní pro koncového uživatele. Závěrečná část popisuje průběh kalibrace jednotlivých senzorů společně s rozбором typových scénářů.

Hlavním přínosem práce je vytvoření funkčního modulárního systému pro monitorování vnitřního prostředí budov, včetně rozhraní pro prezentaci a statistiku naměřených dat. Výstup práce může sloužit jako základ pro následné řízení vnitřního prostředí budov.



## 2 Úvod do monitorování vnitřního prostředí

Rozmanitost systémů pro monitoring kvality vnitřního prostředí je silně ovlivněna rozpočtem, požadavky investora, spolehlivostí, využitelností získaných dat a důrazem na zabezpečení. Výrazná část firem a jejich sortiment se zaměřuje na elektroinstalace v administrativních a průmyslových budovách, kde vyhodnocování dat může vést ke značným úsporám. Oproti tomu v bytových jednotkách a rodinných domech investoři mnohdy kladou důraz na minimalizaci pořizovacích nákladů a jejich ochota pořízení technologie v řádu desítek až stovek tisíc za získaný přehled dat nepřichází v úvahu. K tomu může vést jak neekvivalentní užitek, vzhledem k pořizovacím nákladům, tak neschopnost interpretace a využití získaných dat.

I když existuje široká škála metod monitorování parametrů s různou přesností, tak měřené hodnoty v budovách obvykle nevyžadují dosažení laboratorních hodnot a přibližné hodnoty jsou často dostačující. Výrazně méně nákladnou alternativou se mohou stát jednotlivé modulární senzory, které však vyžadují vlastní komplekci a zprovoznění. Nicméně, s touto variantou může být spojena nižší spolehlivost systému a omezená technická podpora.

Mezi parametry vhodné pro monitorování kvality vnitřního prostředí lze zahrnout teplotu v referenčních místnostech, relativní vlhkost vzduchu a koncentraci oxidu uhličitého.

Úvod teoretické části práce analyzuje základní principy monitorování vnitřního prostředí budov včetně faktorů ovlivňujících kvalitu vnitřního prostředí. Jedná se o důležitý teoretický základ pro následný návrh a realizaci modulárního systému pro monitorování kvality vnitřního prostředí.

V rámci teoretické části je proveden přehled senzorů používaných pro měření jednotlivých parametrů kvality vnitřního prostředí, jako je teplota, vlhkost, tlak či koncentrace CO<sub>2</sub>. Následuje podrobný popis typů senzorů, jejich principy činnosti, výhody a nevýhody sloužící pro optimální výběr senzorů na daný účel.

Na to navazuje analýza komunikačních protokolů a síťových technologií používaných pro přenos dat mezi senzory a nadřazeným systémem. Zvláštní pozornost je věnována protokolům pro komunikaci se senzory, jako jsou I<sup>2</sup>C, SPI, UART a Ethernet, který slouží jako komunikační rozhraní pro navrhovaný systém.

Závěr teoretické části je věnován přehledu dostupných řešení pro sběr, ukládání a zobrazení dat získaných ze senzorů. Popsány jsou databázové systémy, které mohou být použity pro ukládání naměřených hodnot a webové servery a aplikace umožňující zobrazení aktuálních dat, statistiky a historie v čase.

## 2.1 Principy monitorování vnitřního prostředí

Monitoring vnitřního prostředí budov zahrnuje sledování a analýzy klíčových parametrů ovlivňujících kvalitu a komfort vnitřního prostředí.

### 2.1.1 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí

Teplota vnitřního prostředí má zásadní vliv na celkovou pohodu lidí. Tepelný komfort zahrnuje podle Fangerova modelu několik faktorů, jako jsou teplota vzduchu, radiační teplota obklopujících ploch, vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu, metabolismus a oblečení jednotlivce. [1] Optimální teploty vzduchu v obytných místnostech se dle ČSN EN 12831 obvykle pohybují v rozmezí 20–24 °C. [3] Příliš vysoké či příliš nízké teploty v místnostech mohou vést k tepelnému stresu, který zvyšuje riziko podchlazení, resp. přehřátí a s tím spojené negativní účinky na lidský organismus. Stabilní teplota navíc pomáhá snižovat kondenzaci vodních par a riziko vzniku plísní. [2]

Dalším významným faktorem ovlivňujícím pohodu vnitřního prostředí je relativní vlhkost. Ta by se v optimálním případě měla pohybovat mezi 40–60 %. Zatímco nízká vlhkost může způsobit suchost kůže a očí, případně až podráždění dýchacích cest, tak vysoká vlhkost podporuje tvorbu plísní, se kterými mohou být spojené respirační a alergické problémy.

Vlivem masivního zateplování budov a časté absence vzduchotechnických jednotek bývá koncentrace CO<sub>2</sub> výrazně vyšší než doporučená, což je spojené s negativním vlivem na kognitivní výkon v mnoha oblastech od koncentrace a rozhodování přes strategické myšlení až po iniciativu.

## 2.2 Přehled senzorů pro měření kvality vnitřního prostředí

Volbu konkrétního senzoru a způsobu měření ovlivňuje řada faktorů:

- aplikace,
- měřené veličiny,
- ekonomické možnosti,
- požadavky na rozlišení a přesnost měření,
- omezení provozních podmínek prostředí,
- integrace,
- kalibrace a údržba.

Prvotní zvážení výběru senzorů je nezbytné pro následný optimální návrh, splňující požadavky uživatele vnitřního prostředí.

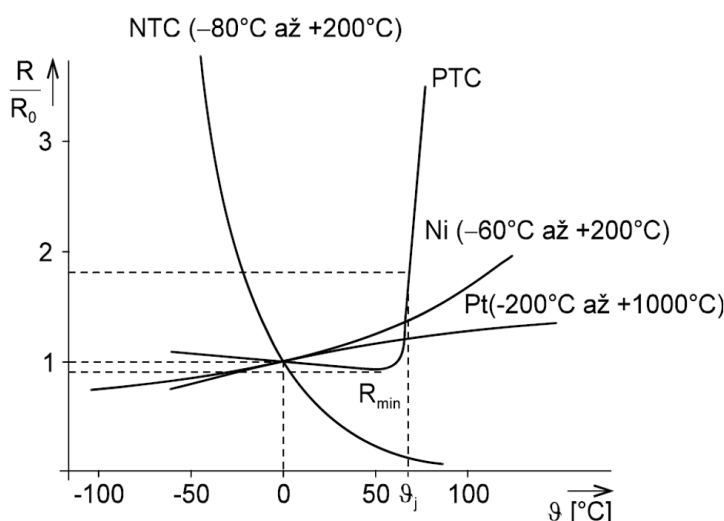
### 2.2.1 Měření teploty

Senzory tepelných veličin slouží k měření teploty prostředí nebo objektu. Mohou být obecně rozděleny na kontaktní a bezkontaktní. Dále se dle principu funkce dělí na elektrické, dilatační a speciální. Mezi nejčastěji používané kontaktní senzory teploty patří senzory odporové. Ty naměřenou fyzikální veličinu převádí na elektrický signál, který je určen pro následné zpracování a vyhodnocení. Elektrické senzory tepelných veličin se dále dělí podle principu na:

- odporové kovové,
- odporové polovodičové – PTC a NTC termistory, monokrystalické křemíkové,
- polovodičové s PN přechodem,
- krystalové,
- termoelektrické.

### 2.2.1.1 NTC termistory

Jedná se o polovodičové odporové senzory teploty vyráběné práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. S rostoucí teplotou se hodnota odporu snižuje. Měřicí rozsah dosahuje v závislosti na použité výrobní technologii od běžných 50 °C – 150 °C až do extrémních rozsahů od 4,2 K u nízkoteplotních termistorů a do 1000 °C u vysokoteplotních termistorů. [1] Průběh odporu NTC termistoru v závislosti na teplotě je dán:



Graf 1: Teplotní závislost odporových senzorů teploty [1]

### 2.2.2 Měření vlhkosti

Měření relativní vlhkosti v budovách je významný údaj pro následné zajištění optimálních vnitřních podmínek. Příliš vysoká či příliš nízká relativní vlhkost může mít negativní dopady jak na zdraví uživatele, tak na stavební konstrukce a s tím spojenou životnost objektu.

Vysoká úroveň relativní vlhkosti může vést k tvorbě plísní a bakterií, což může vést k alergickým a respiračním problémům. Nízká úroveň relativní vlhkosti může vést k negativním účinkům jak na lidský organismus v podobě podráždění sliznic, očí a dýchacích cest, tak na poškození elektroniky vlivem statické elektřiny.

Díky měření relativní vlhkosti v objektech je možné identifikovat problémy s vlhkostí a následně provést potřebné kroky od pravidelného větrání, přes využití mobilních odvlhčovačů, až po instalaci kompletních klimatizačních jednotek.

### 2.2.2.1 Relativní vlhkost plynu

Relativní vlhkost  $\phi$  (%) je fyzikální veličina popisující vlastnosti vlhkého plynu, který se skládá ze suchého plynu a vodní páry. Udává poměr mezi aktuálním množstvím vodní páry v plynu ku maximálnímu možnému množství vodní páry, které by mohl plyn při aktuální teplotě a tlaku obsahovat. Ačkoliv relativní vlhkost plynu se při změně teploty mění (při nárůstu teploty vzduchu o 20 °C klesne relativní vlhkost hrubým odhadem na polovinu), tak se tato veličina hojně používá, jelikož dobře indikuje pohodu prostředí.

Relativní vlhkost je dána vztahem

$$\phi = \frac{\phi'}{\phi''} \quad (2.1)$$

, kde  $\phi'$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) je absolutní vlhkost plynu a  $\phi''$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) je absolutní vlhkost nasyceného plynu.

### 2.2.2.2 Absolutní vlhkost plynu

Absolutní vlhkost plynu  $\phi'$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) popisuje hmotnost vodní páry v objemové jednotce plynu, a tedy při změně teploty se hodnota absolutní vlhkosti nemění. Při stlačení daného plynu se jeho objem zmenší, a tedy dojde ke změně absolutní vlhkosti.

### 2.2.2.3 Absolutní vlhkost nasyceného plynu

Při dosažení absolutní vlhkosti nasyceného plynu  $\phi''$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) se plyn nazývá tzv. sytý. V tomto stavu obsahuje vlhký plyn maximální množství vodní páry při dané teplotě a tlaku. Teplota, při níž je vlhký plyn vodní párou nasycen se nazývá tzv. rosný bod.

Kromě oblasti blízké nasycení, se vlhký vzduch s dostatečnou přesností chová jako ideální plyn. Pro obě složky vzduchu (vodní páru a suchý vzduch) platí stavová rovnice ideálního plynu

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.2)$$

, kde  $p$  je tlak plynu (Pa),  $V$  je objem plynu ( $\text{m}^3$ ),  $R$  je univerzální plynová konstanta  $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $T$  je termodynamická teplota (K) a  $n$  je počet molů,  $n = m/m_m$ , kde  $m_m$  je molární hmotnost.

Pro parciální tlak jednotlivých plynů platí

$$p = \frac{m}{m_m \cdot V} \cdot R \cdot T = \frac{\phi'}{m_m} \cdot R \cdot T \quad (2.3)$$

Dle Daltonova zákona je celkový absolutní tlak směsi dán součtem parciálního tlaku suchého vzduchu a parciálního tlaku vodní páry

$$p = p_v + p_p \quad (2.4)$$

, kde  $p_p$  je parciální tlak vodní páry (Pa) a  $p_v$  je parciální tlak suchého vzduchu (Pa).

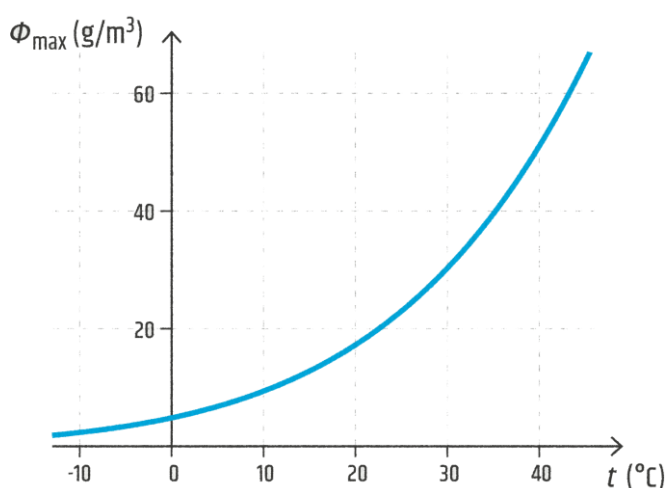
Relativní vlhkost je možné vyjádřit jako

$$\varphi = \frac{p'}{p''} \cdot 100 \quad (2.5)$$

, kde  $p'$  je parciální tlak vodní páry (Pa) a  $p''$  je parciální tlak syté vodní páry (Pa).

Se změnou teploty se absolutní vlhkost ani rosný bod nemění.

Závislost parciálního tlaku syté vodní páry na teplotě je dána stavovým diagramem.



Graf 2: Stavový diagram syté vodní páry [6]



Pro výpočet teploty rosného bodu je možné postupovat empirickým vztahem August-Roche-Magnus. [8] Pro parciální tlak  $p''$  syté vodní páry (Pa) platí vztah

$$p'' = 6,1094 \cdot \exp \frac{17,625 \cdot T}{T + 243,04} \quad (2.6)$$

, kde  $\exp$  je exponenciální funkce a  $T$  je teplota (°C).

Z naměřené relativní vlhkosti  $\varphi$  (%) se spočte parciální tlak vodní páry

$$p' = \frac{\varphi}{100} \cdot p'' \quad (2.7)$$

Následný výpočet teploty rosného bodu je dán inverzí August-Roche-Magnus vztahu

$$T_d = \frac{243,04 \cdot \ln \frac{e}{6,1094}}{17,625 - \ln \frac{e}{6,1094}} \quad (2.8)$$

### 2.2.3 Senzory vlhkosti

Vlhkost vzduchu je jedním z klíčových parametrů pro optimalizaci vnitřního prostředí budov. Hlavním úkolem senzorů je převést hodnoty vlhkosti na elektrický signál, který lze dále zpracovat a vyhodnocovat. Pro optimální volbu senzoru je dobré zvážit řadu faktorů jako jsou:

- cena,
- rozsah měření,
- přesnost a rozlišení,
- stabilita a životnost,
- kalibrace a údržba,
- rozměry a energetická náročnost,
- kompatibilita se systémem.

Jednotlivé senzory pro měření vlhkosti mohou být založeny na principu:

- sorpčním – vodivostní a kapacitní,
- optickém,
- rosném bodu,
- psychrometry.

### 2.2.4 Měření barometrického tlaku

Pro výpočet teploty rosného bodu je nezbytné měřit společně s teplotou a vlhkostí vzduchu i barometrický tlak. Jedná se o tlak vyvíjený na zemský povrch vznikající vahou vzduchu v atmosféře.

Sledování změn barometrického tlaku patří k základním kamenům v předpovídání počasí. Zatímco nárůst tlaku naznačuje příchod stabilnějšího počasí, pokles představuje příchod fronty, která může přinést dešťové srážky či bouřky.

Měření atmosférického tlaku může být založeno na mechanickém či elektronickém principu. Elektronické měření barometrického tlaku je realizováno na principu piezorezistivním a kapacitním. Kapacitní senzory jsou založeny na principu změny kapacity kondenzátoru vlivem změny barometrického tlaku. Při změně atmosférického tlaku dochází ke tlakové změně způsobující deformaci membrány kondenzátoru, vedoucí ke změně vzdálenosti mezi elektrodami a s tím spojené změně kapacity. Ta je následně měřena a vyhodnocována. Piezorezistivní senzory využívají změnu elektrického odporu vlivem mechanického napětí. Změnou atmosférického tlaku dochází k deformaci membrány senzoru a jeho elektrického odporu. Změna odporu je převedena na elektrický signál úměrný barometrickému tlaku.

### 2.2.5 Senzory koncentrace CO<sub>2</sub>

Udržování koncentrace oxidu uhličitého v doporučených mezích může ovlivňovat jak zdraví, pohodu a výkonnost uživatelů, tak energetickou efektivitu budovy.

Koncentrace CO <sub>2</sub> (ppm)	Účinky
400+	Běžné koncentrace ve venkovním prostředí
< 1000	Bez pocitu únavy
< 1500	Maximální doporučená dávka ve vnitřních prostorech
1000–2000	Příznaky únavy, pocit vydýchaného vzduchu
2000–5000	Bolesti hlavy
> 5000	Nevolnost, zvýšený tep
> 15000	Dýchací potíže, závratě
> 40000	Možné ztráty vědomí

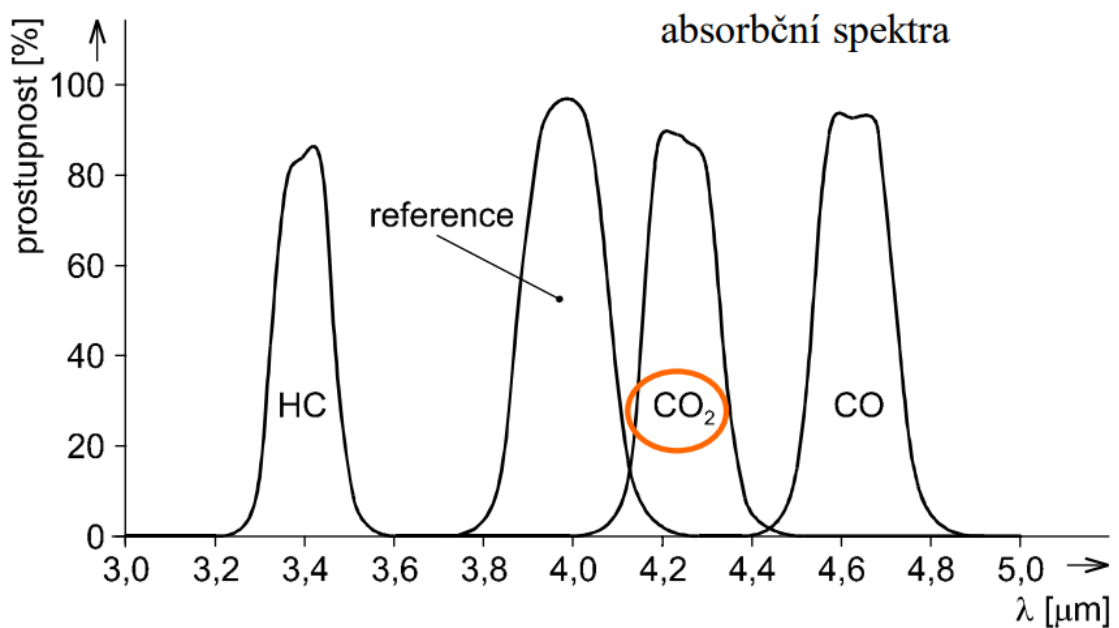
Tabulka 1: Orientační účinky CO<sub>2</sub> [5]

Měření koncentrace CO<sub>2</sub> bývá nejčastěji založeno na principu:

- NDIR (Non-Dispersive InfraRed),
- elektrochemickém,
- elektroakustickém.

### 2.2.5.1 NDIR senzory

Non-Dispersive InfraRed senzory jsou založeny na principu měření útlumu infračerveného záření ve vzduchu v závislosti na koncentraci oxidu uhličitého. Skládají se ze zdroje záření, měřicí komory a detektoru s filtrem pro vlnovou délku okolo 4,26 μm, při které CO<sub>2</sub> absorbuje infračervené záření. Signál z detektoru je zpracován elektronikou, aktuální hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> jsou reprezentovány digitálním či analogovým signálem úměrným koncentraci CO<sub>2</sub>.



Obrázek 1: Princip IR analyzátoru plynu [7]

### 2.2.6 Další senzory používané v budovách

V závislosti na požadavcích uživatele a jeho rozpočtu je možno snímat širokou škálu veličin vnitřního mikroklimatu. Mezi frekventovaně monitorované veličiny patří teplota a relativní vlhkost vzduchu, koncentrace CO<sub>2</sub>, intenzita osvětlení a v neposlední řadě hluk, tlak, a proudění vzduchu. V případě menších projektů je možno systém realizovat modulárně z jednotlivých senzorů různých výrobců.

U rozsáhlejších projektů je prakticky nevyhnutelné zvolit násobně nákladnější řešení v podobě kompletních systémů od výrobců, jako jsou Siemens, KNX, Honeywell, ABB, Bosch apod. Navzdory vysoké pořizovací ceně nabízí výrobci kompletní podporu a kompatibilitu k integraci do systémů automatizace budov BMS.

## **2.3 Přehled komunikačních protokolů a síťových technologií**

Jedním ze základních pilířů senzorů je komunikace s nadřazenými systémy. K definici pravidel, podle kterých se data vysílají, přijímají, interpretují a zpracovávají, slouží komunikační protokoly. Zatímco některé senzory budou vyžadovat rychlou odezvu a vysokou spolehlivost, jiné mohou klást důraz na nízkou spotřebu energie. Kvůli optimalizaci jednotlivých případů byla vyvinuta řada komunikačních protokolů pro specifické účely v závislosti na požadavcích na spolehlivost přenosu dat bez chyb či ztrát, odolnosti vůči okolnímu rušení, efektivitě, vzdálenosti a rychlosti přenosu, flexibilitě systému i nízké spotřebě energie.

### **2.3.1 Frekventované protokoly pro komunikaci se senzory**

Pro komunikaci se senzory se v elektronice využívá v závislosti na aplikaci nejčastěji několik protokolů – I<sup>2</sup>C, SPI, RS-232, RS-485, CAN, KNX a Modbus. Volba komunikačního protokolu závisí na složitosti systému, požadavcích na rychlost přenosu, vzdálenosti mezi zařízeními apod. Se zvoleným protokolem se následně pojí požadavky na kabeláž, napájení i způsob komunikace včetně limitujících podmínek.

### 2.3.2 Sériová sběrnice UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter slouží pro sériovou komunikaci mezi zařízeními. Díky své snadné implementaci je sběrnice UART široce využívána v řadě aplikací jako jsou mikrokontroléry, Bluetooth moduly, GPS a další. Jedná se o komunikaci realizovanou napětovými úrovněmi, logická „1“ je zpravidla napájecí napětí  $U_{CC}$ , zatímco logická „0“ je reprezentována zemí GND.

Při asynchronní UART komunikaci nemusí mít odesílatel a příjemce společný hodinový signál, je však nutné znát rychlost komunikace. Synchronizace je realizována pomocí start bitů a stop bitů v rámci. Jednotlivé rámce se skládají z:

- start bitu – vždy logická „0“,
- 5–9 datových bitů přenášející informace,
- paritní bit (volitelný) – 1 bit pro detekci chyb přenosu,
- stop bit – 1–2 bity, vždy logická „1“.

### 2.3.3 Ethernet

Ethernet se řadí mezi nejrozšířenější standard pro lokální počítačové sítě LAN založený na rámcovém přenosu dat standardizovaný organizací IEEE pod sérií 802.3. Dominantní postavení pro lokální počítačové sítě získal Ethernet díky své flexibilitě a hospodárnosti.

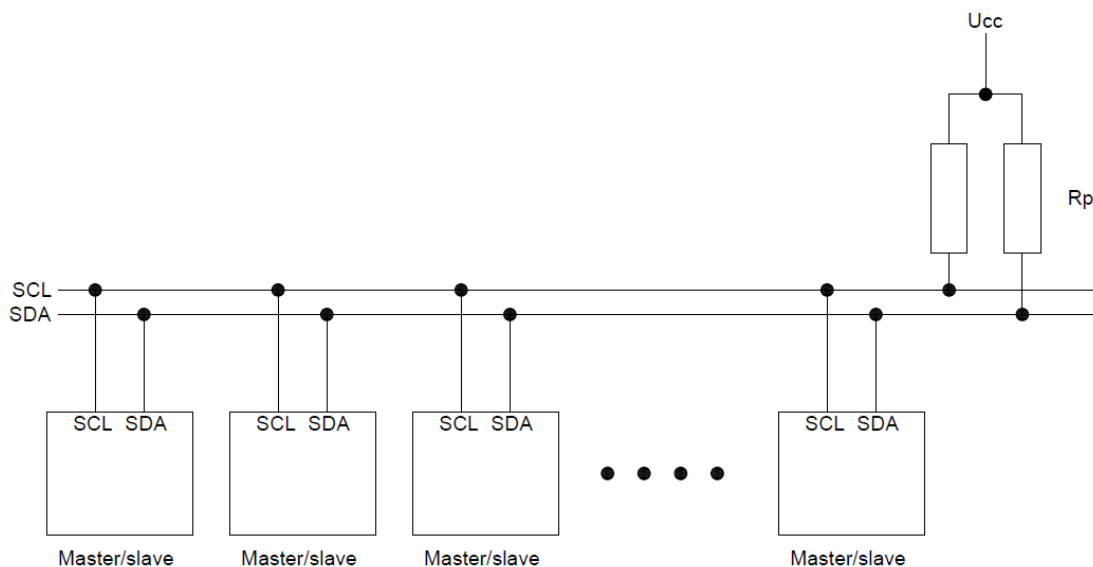
Ethernetový standard definuje formát rámce a přenosový režim na fyzické a spojové vrstvě OSI modelu. Původní standardizovanou fyzickou vrstvu ve formě koaxiálního kabelu nahradila optická vlákna a kabely se čtyřmi páry kroucených vodičů (z toho se vždy dva páry používají pro jednosměrnou komunikaci).

Vývoj ethernetového standardu umožnil rychlý přenos dat z původních 10 MBit/s až po nejnovější standardy podporující rychlosti do 100 GBit/s.

### 2.3.4 Sériová sběrnice I<sup>2</sup>C

Inter-Integrated Circuit je synchronní obousměrná sériová sběrnice hojně využívána pro připojení displejů, senzorů apod., které ke komunikaci stačí pouze 2 vodiče. Synchronous Data (SDA) slouží k obousměrnému přenosu dat, skrze Serial Clock (SCL) se posílá hodinový signál.

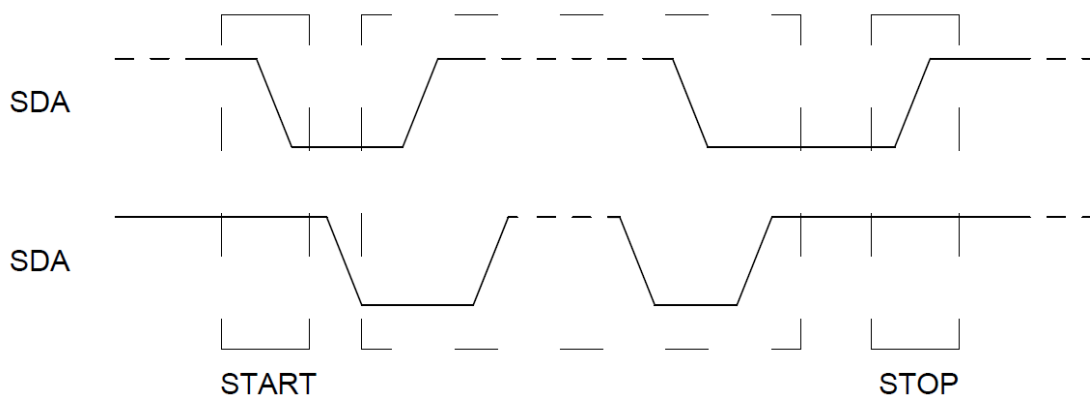
Topologie sběrnice je typu multimaster, na sběrnici může být více nadřazených zařízení. V tomto případě se jedná o topologii master/slave. Master zařízení generuje SCL signál a řídí komunikaci, slave pouze poslouchá příkazy. Každé zařízení má svou unikátní sedmibitovou či desetibitovou adresu, která slouží k jejímu výběru i k arbitraci pro přístup na sběrnici.



Obrázek 2: Sběrnice I<sup>2</sup>C

### 2.3.4.1 Fyzická vrstva

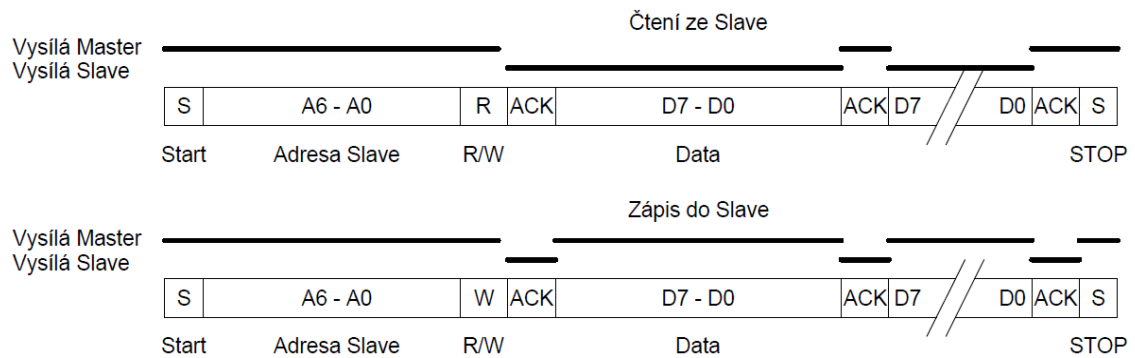
Maximální délka sběrnice je omezena nejvyšší dovolenou kapacitou 400 pF. V klidovém stavu je na SDA i SCL logická „1“. Na SDA jsou vysílány jednotlivé bity. Hodnota SDA se smí měnit pouze v případě, jeli na SLC logická „0“ (vyjma vysílání START a STOP používané k zahájení arbitrace a k ukončení přenosu).



Obrázek 3: Princip komunikace na I<sup>2</sup>C sběrnici

### 2.3.4.2 Linková vrstva

I<sup>2</sup>C rámeček začíná jedním bitem START, následuje sedm bitů adresy příjemce, jeden bit R/W (čtení/zápis). Pokračuje jeden potvrzovací bit ACK o úrovni logické „1“. Dále se přenáší data, každý byte je následován jedním ACK bitem. Přenos je ukončen STOP bitem.



Obrázek 4: Průběh komunikace na I<sup>2</sup>C sběrnici

### 2.3.5 SPI sběrnice

SPI (Seriál Peripheral Interface) je synchronní sériová komunikační sběrnice, původně vyvinuta firmou Motorola pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a periferními zařízeními. Jedná se o synchronní sériovou sběrnici využívající architekturu master-slave s full-duplex komunikací.

Master zařízení (mikrokontrolér) generuje hodinový signál a řídí komunikaci. Hodinový signál SCK (serial clock) je rozveden do všech zařízení na sběrnici. Slave zařízení – koncové prvky komunikující přes SPI – senzory, ADC a DAC převodníky, flash paměti a mnoho dalších.

MOSI vodič (master out, slave in) slouží k přenosu dat z master zařízení do slave zařízení. MISO vodič (master in, slave out) slouží k přenosu dat od slave k masteru. Každé slave zařízení je propojeno s master zařízením vlastním CS/SS vodičem. Poslední vodič CS (chip select) nebo SS (slave select) slouží zařízení typu master k určení, se kterým koncovým slave prvkem bude komunikovat.

Mezi výhody SPI sběrnice patří rychlost přenosu dat oproti I<sup>2</sup>C, jednoduchá hardwarová implementace, full-duplex (současný dvousměrný přenos dat), absence adresování zařízení a flexibilita.

Nevýhody SPI sběrnice zahrnují požadavek na více vodičů – minimálně čtyři vodiče pro jedno slave zařízení, omezený dosah v porovnání s RS-485 a absence potvrzovacího mechanismu, že slave zařízení správně data přijalo.

## 2.4 Přehled dostupných řešení pro sběr, ukládání a zobrazení dat

Pro monitorování mikroklimatu budov existuje řada řešení, které slouží pro sběr, zpracování a vizualizaci dat. Volba konkrétního způsobu záleží na osobních preferencích, požadovaném objemu dat, požadavcích na rychlost přenosu a vizualizace, cenu, zabezpečení i způsob implementace.

*ThingSpeak* – IoT cloudová služba umožňující sběr, ukládání a zpracování dat, vhodná pro hobby projekty díky snadné integraci a rozsáhlé komunitě.

*Amazon Web Services (AWS)* – IoT cloudová služba poskytující sběr dat, bezpečnou komunikaci, analýzu i aplikaci strojového učení.

*Microsoft Azure* – IoT soubor cloudových služeb umožňující sběr, analýzu a vizualizaci dat. Pokročilé analýzy a strojové učení podporují složité IoT aplikace.

*Google FireBase* – cloudové služby, které umožňují snadné vytváření aplikací bez nutnosti správy serverů. Výhodou je snadná integrace analytických a vizualizačních nástrojů pro prezentaci a sledování nasbíraných dat.

### 2.4.1.1 ThingSpeak

Jedná se o webovou platformu založenou na cloudových službách specifickou pro sběr, zpracování a vizualizaci dat. ThingSpeak umožňuje jednotlivým zařízením odesílat data do cloudového prostředí, kde dochází k jejich následnému analyzování a vizualizaci.

Uživatel může vytvářet „kanály“ pro jednotlivá zařízení s několika poli, do kterých se mohou ukládat různé typy dat. Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a ThingSpeak službou slouží API klíče, jeden pro čtení a druhý pro zápis dat.



Pro komunikaci se zařízením se využívá HTTP či MQTT protokol. Pro pokročilou analýzu a zpracování dat je možné integrovat MATLAB.

Mezi výhody patří snadné nastavení a spravování zařízení bez nutnosti vlastních serverů i jednoduchá vizualizace dat pomocí integrovaných nástrojů. K nevýhodám patří latence komunikace, omezené množství zápisů (8 000 zápisů za 24 hodin na jeden kanál) a nejasná bezpečnost, závisující na poskytovateli služby.

ThingSpeak je hojně využíván pro IoT (Internet of Things), v průmyslovém monitorování, v domácích automatizacích, v monitorování hodnot ze senzorů i v hobby projektech.



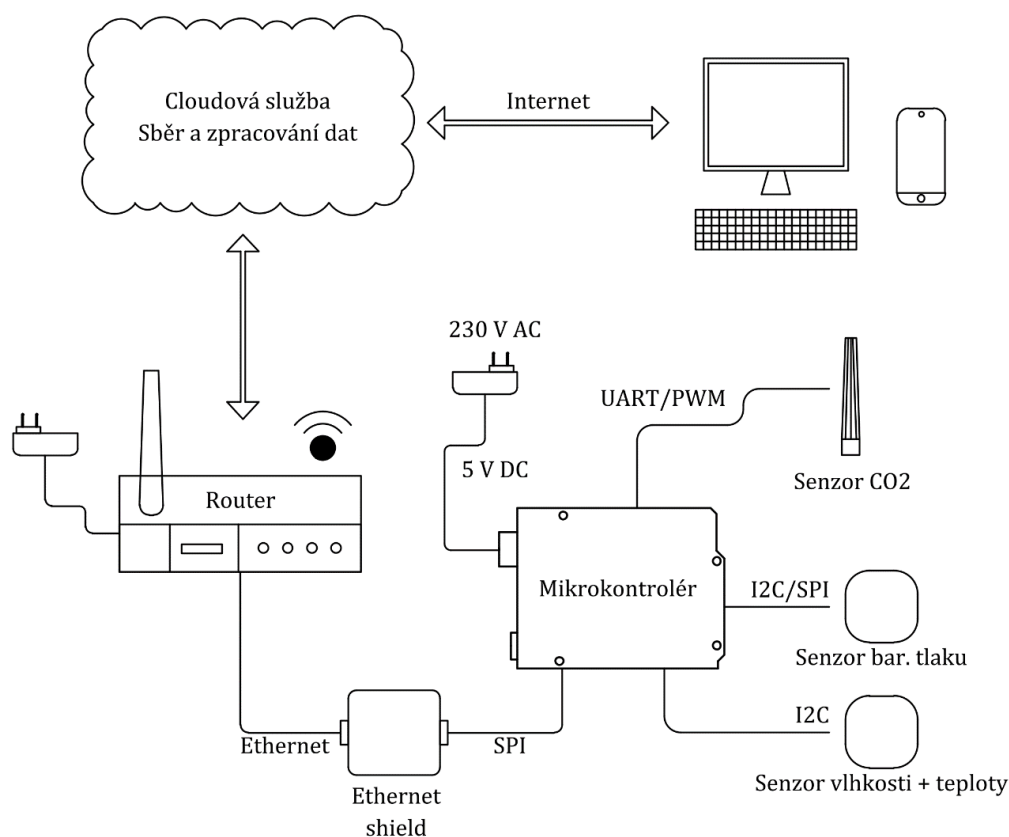
## 3 Návrh modulárního systému pro monitorování vnitřního prostředí budov

Stavbou modulárního systému pro monitorování mikroklimatu se pojí řada benefitů i nevýhod v porovnání s existujícím řešením. Mezi klady vlastního návrhu patří bezpodmínečně flexibilita jednotlivých modulů podle aktuálních potřeb, násobně nižší pořizovací náklady, snížená závislost na konkrétních dodavatelích a jednoduchá aktualizace a modernizace systému. K záporům patří časově náročnější vytváření vlastního návrhu, vyšší požadavky na odborné znalosti, riziko nekompatibility, absence technické podpory dodavatele a možné problémy s nestabilitou systému.

### 3.1 Koncept navrhovaného systému

Koncept navrhovaného řešení je založen na flexibilitě a jednoduché záměně/rozšíření koncových prvků. Srdcem celého řešení je mikrokontrolér, který slouží pro sběr, vyhodnocování a přeposílání naměřených dat, získaných ze senzorických zařízení. Pro získání dat ze senzorů je nutné jak fyzické propojení (komunikační rozhraní a napájení – často poskytované přímo z mikrokontroléru), tak softwarová interakce (inicializace komunikačního rozhraní, konfigurace parametrů, čtení a zpracování dat, kalibrace a korekce). Jakmile jsou data získána a příp. zpracována, mohou být odeslána nadřazenému systému.

Pro přenos dat z mikrokontroléru je využit Ethernet shield. Jedná se o hardwarový modul umožňující připojit se k Ethernetové síti a komunikovat s nadřazeným systémem. Pro větší odolnost vůči mechanickému poškození a snazší osazení koncových senzorických zařízení je fyzická část systému osazena v pouzdře, vyrobeném za pomoci 3D tisku. Získaná data jsou odesílána na cloudový online server, který umožňuje sbírat, ukládat, analyzovat a vizualizovat data v reálném čase.



Obrázek 5: Blokové schéma systému

### 3.2 Výběr senzorů

Volba konkrétních senzorů závisí na řadě faktorů počínaje přesností měření, přes komunikační rozhraní až po náklady na zařízení. Zvolené senzory zahrnují SHT30 pro měření vlhkosti a teploty, MH-Z16 pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> a BMP280 pro měření barometrického tlaku.

Přestože by bylo technicky méně náročné a jednodušší volit senzory se shodnými komunikačními sběrnici, záměrem návrhu systému byla implementace koncových prvků s různými komunikačními protokoly. Tento přístup si klade za cíl rozšířit odborné znalosti v oblasti komunikace.

Aplikace odlišných protokolů přispívá k hlubšímu pochopení a důležitosti vhodného výběru v závislosti na specifických požadavcích dané aplikace. Například protokol SPI poskytuje vyšší rychlost přenosu dat, zatímco I<sup>2</sup>C vyniká svou jednoduchostí v zapojení. Zahrnutím různých komunikačních protokolů se zvýší technické i praktické dovednosti, nezbytné pro efektivní návrhy a realizace komplexních systémů.

### 3.2.1 Senzor CO<sub>2</sub> MH-Z16

Při posuzování poměru cena/výkon představuje senzor MH-Z16 optimální volbu s vnitřní teplotní kompenzací a nízkým příkonem do 0,43 W. Slouží pro měření koncentrace oxidu uhličitého v uzavřených prostorech. Lze jej využít pro řadu aplikací, jako například monitoring kvality ovzduší v budovách, řízení klimatizace, zemědělské aplikace pro optimální růst rostlin a detekci úniku CO<sub>2</sub> v průmyslových aplikacích. [9] Jeho nízká spotřeba energie umožňuje napájení přímo z mikrokontroléru, což přináší praktické výhody. Jedná se o senzor vyvinutý firmou Winsen Electronics pracující na principu NDIR. Komunikaci je možno realizovat digitálně pomocí komunikačního protokolu UART (univerzální asynchronní přijímač-vysílač) nebo analogově protokolem PWM, který pomocí pulzně šířkově modulovaného signálu přináší hodnotu koncentrace CO<sub>2</sub>.

Senzor MH-Z16 je schopen měřit v běžných podmínkách koncentraci oxidu uhličitého v rozmezí 0–5000 ppm s přesností  $\pm (100 \text{ ppm} + 6 \% \text{ ze změřené hodnoty})$ .



**Obrázek 6:** Senzor pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> MH-Z16

Pro získání validních výsledků je zásadní dodržení řady požadavků:

- teplota okolí -10 °C – 50 °C,
- relativní vlhkost 0 % – 95 %,
- napájení: napětí 4,5 V – 5,5 V, proud < 85 mA,
- doba přehřátí minimálně 3 minuty.

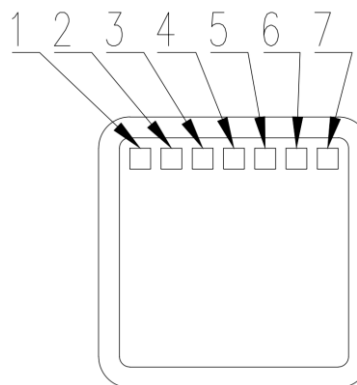
S provozními požadavky jsou spojeny nezbytné parametry:

- měřený prostor by měl být dostatečně odvětráván,
- na pouzdro senzoru by neměl být vyvíjen nadměrný tlak,
- pravidelná kalibrace je doporučena každých 6 měsíců,
- vyvarovat se dlouhodobé expozici senzoru v prašném prostředí.

Senzor MH-Z16 obsahuje na výstupu 7 pinů:

PIN 1	HD - kalibrace
PIN 2	$V_{out}$ (0,4 V–2 V)
PIN 3	GND
PIN 4	$V_{in}$ (4,5–5,5 V)
PIN 5	RX (UART)
PIN 6	TX (UART)
PIN 7	PWM

Tabulka 2: Popis pinů MH-Z16

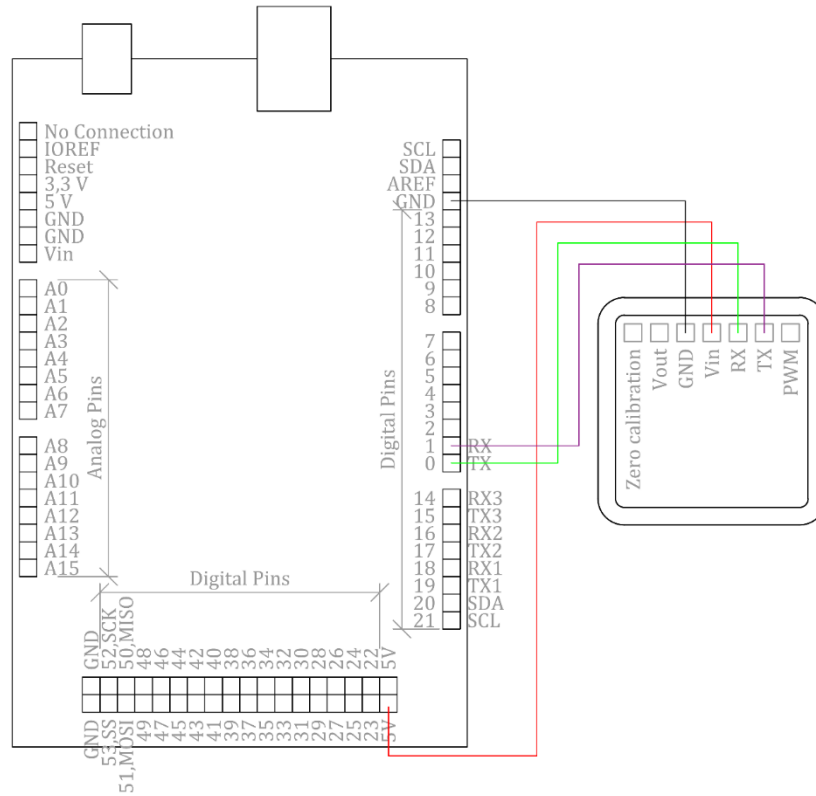


Obrázek 7: Piny MH-Z16

Kalibraci senzoru MH-Z16 lze realizovat třemi způsoby. Před samotným procesem kalibrace je nezbytné umístit senzor ve stabilních podmínkách po dobu minimálně dvaceti minut v prostředí, kde se předpokládá koncentrace oxidu uhličitého 400 ppm. Průměrná hodnota koncentrace CO<sub>2</sub> za září 2023 byla 416,83 ppm [12], se zahrnutím přesnosti měření senzoru se jedná o postačující zaokrouhlení.

Pro ruční kalibraci je třeba na PIN 1 přivést po dobu alespoň 7 sekund nízkou úroveň napětí 0 V. Další možností kalibrace je zaslání příkazu pro nastavení nulové úrovně 400 ppm (Byte2 – 0x87). Poslední možností je autokalibrace, která je vhodná pro domácí a kancelářské prostředí. V tomto režimu senzor automaticky určuje nulovou úroveň (zapínání nebo vypínání autokalibrace se provádí za pomoci Byte2 – 0x79).

Komunikace s nadřazeným mikrokontrolérem je realizována pomocí sériové sběrnice UART. Napojení senzoru je znázorněno na následujícím obrázku, napětí + 5 V z Arduina je připojeno na pin 4, GND na pin 3, RX na pin 6 a TX na pin 5. Zbylé piny zůstaly nezapojeny.



**Obrázek 8:** Schématické zapojení senzoru MH-Z16

Příkaz pro senzor je formátován jako bajtové pole:

Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start Byte	No.	Command	-	-	-	-	-	Checksum
0xFF	0x01	0x86	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x79

**Tabulka 3:** Příkaz pro MH-Z16

Odpověď od senzoru:

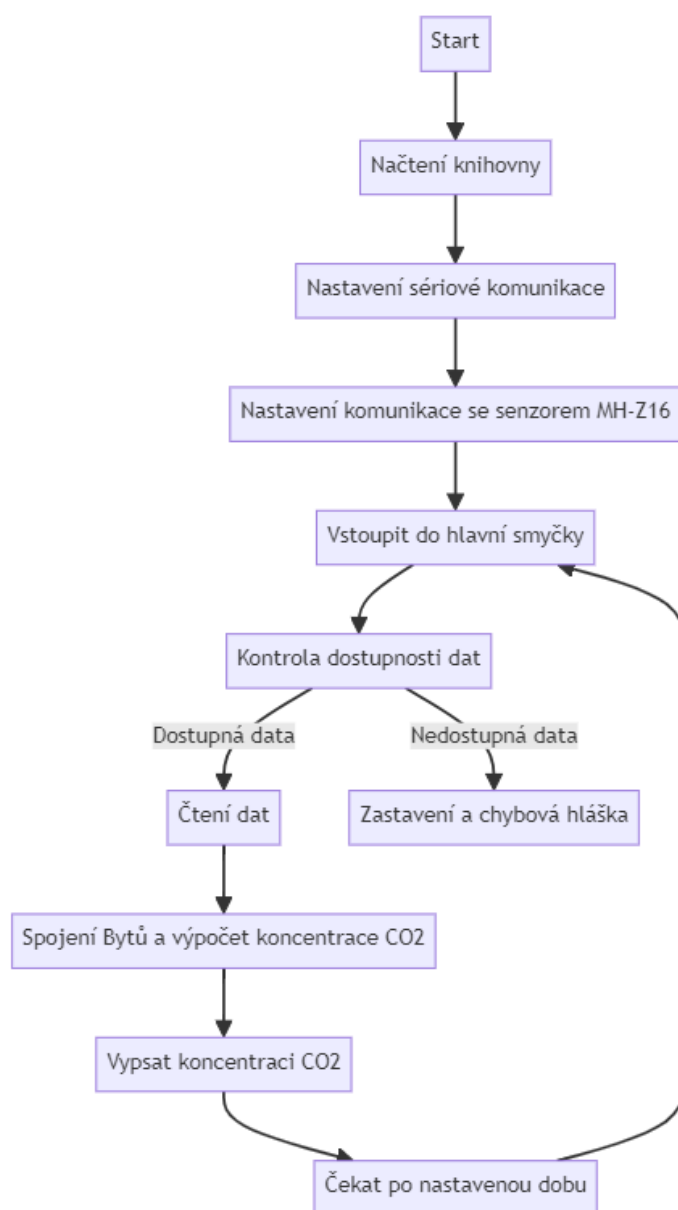
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start Byte	No.	Concentration (High 8 bit)	Concentration (Low 8 bit)	-	-	-	-	Checksum
0xFF	0x86	HIGH	LOW	-	-	-	-	Checksum

**Tabulka 4:** Odpověď z MH-Z16

Koncentrace oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> je následně spočtena ze vztahu:

$$\text{koncentrace CO}_2 = \text{HIGH} \cdot 256 + \text{LOW} \quad (3.1)$$

Způsob vyčítání dat ze senzoru mikrokontrolérem je znázorněný na vývojovém diagramu.



Obrázek 9: Vývojový diagram senzoru MH-Z16

### 3.2.2 Senzor barometrického tlaku BMP280

Pro měření barometrického tlaku a případně teploty okolí je zvolen senzor BMP280. Měření barometrického tlaku je založeno na kapacitním principu. V senzoru se nachází pružná, mikroskopická membrána, která se deformuje vlivem barometrického tlaku. Změna tlaku vede ke změně tvaru membrány, což způsobí změnu kapacity úměrně ke změně tlaku. Tato změna je převedena na elektrický signál, který je dále zpracováván.



Měření teploty je založeno na tenkovrstvém NTC termistoru. Pro zpřesnění měřených hodnot tlaku jsou teplotní data využívána pro kompenzaci teplotní závislosti kapacitního měření tlaku.

Převod analogového signálu na digitální je proveden vestavěným analogově-digitálním převodníkem. Následná komunikace s mikrokontrolérem je realizována prostřednictvím rozšířeného komunikačního rozhraní I<sup>2</sup>C nebo SPI.

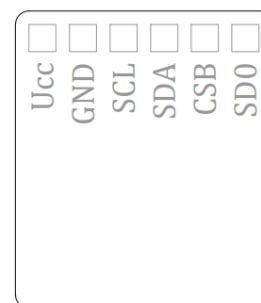
Senzor je schopný měřit atmosférický tlak v rozsahu 300–1100 hPa s přesností až 0,12 hPa a teplotu v rozmezí -40–85 °C s přesností  $\pm 1$  °C.

$U_{cc}$ (3,3 V)
GND
SCL
SDA
CSB
SD0

**Tabulka 5:** Popis pinů BMP280



**Obrázek 10:** Senzor pro měření barometrického tlaku



**Obrázek 11:** Piny BMP280

Pro získání validních výsledků je zásadní dodržení řady požadavků:

- teplota okolí -40 °C – 85 °C,
- napájení: napětí 1,7–3,6 V, proud < 2,8  $\mu$ A.

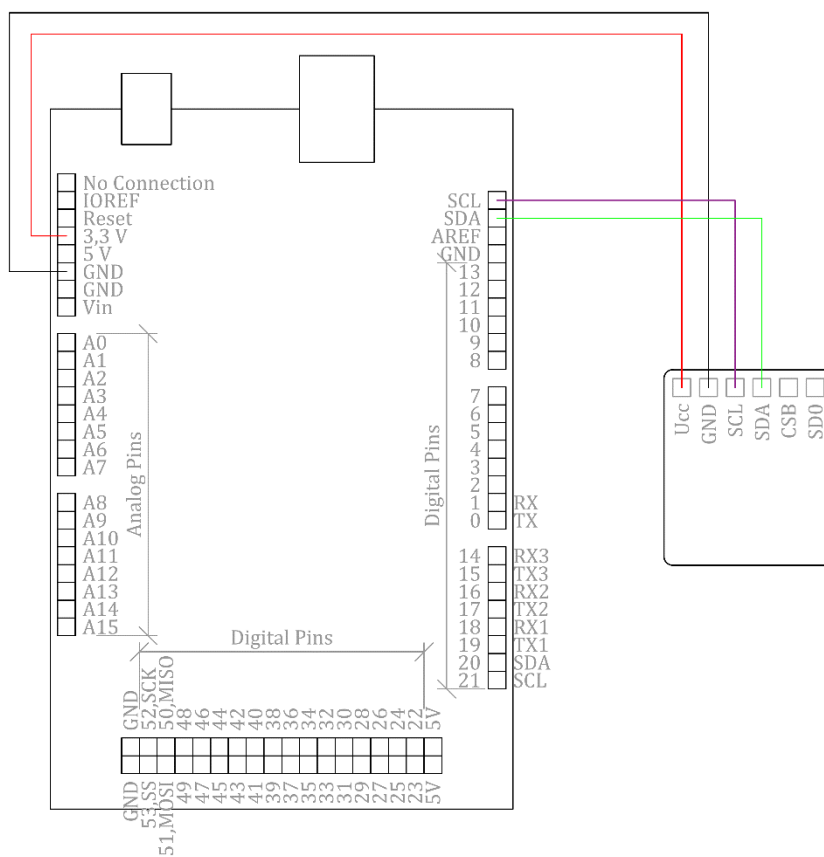
S provozními požadavky jsou spojeny nezbytné parametry:

- vzdálenost nad kovovým krytem alespoň 0,1 mm,
- odvětrávání pouzdra zařízení,
- vyvarovat se přímému kontaktu s kapalinami,
- vyvarovat se intenzivnímu zdroji světla.

Senzor BMP280 obsahuje na výstupu 6 pinů:

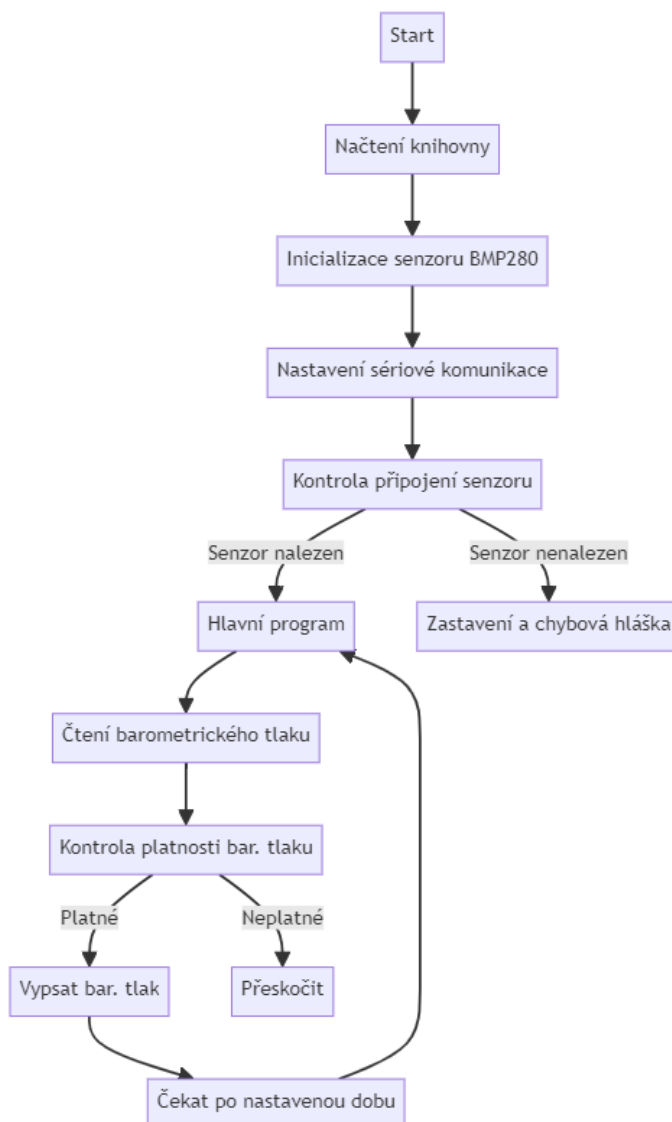
Ačkoliv je senzor BMP280 kalibrován již z výroby, pro zajištění spolehlivých výsledků je vhodné provést dodatečnou recalibraci. Ta se provádí za pomoci referenčního, vysoce přesného tlakoměru. Měření se provádí současně a výsledná data BMP280 se softwarově upraví tak, aby odpovídala referenčním hodnotám.

Komunikace s nadřazeným mikrokontrolérem je realizována pomocí sériové sběrnice I<sup>2</sup>C. Napojení senzoru je znázorněno na následujícím obrázku, napětí + 3,3 V z Arduina je připojeno na pin U<sub>cc</sub>, GND na pin GND, SCL na pin SCL a SDA na pin SDA. Zbylé piny zůstaly nezapojeny.



**Obrázek 12:** Schématické zapojení senzoru BMP280

Způsob vyčítání dat ze senzoru mikrokontrolérem je znázorněn na vývojovém diagramu.



**Obrázek 13:** Vývojový diagram senzoru BMP280

### 3.2.3 Senzor vlhkosti a teploty vzduchu SHT30

Měření vlhkosti a teploty v místnosti je realizováno senzorem SHT30. Jedná se o digitální senzor vyvinutý společností Sensirion. Díky integrovanému analogově-digitálnímu převodníku je zpracování signálu jednodušší a snižují se nároky na externí komponenty. Má široké využití v oblastech systémů domácí automatizace, meteorologických stanicích a v zemědělství. Princip je založen na kapacitním měření vlhkosti. Pro měření teploty je využita tenká vrstva NTC termistoru. Změnou vlhkosti dochází ke změně relativní permitivity porézního dielektrika. Při zahrnutí vztahu pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru je odezva senzoru s měnící se relativní permitivitou  $\epsilon_r$  lineární.

$$C_s = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (3.2)$$

, kde  $S$  je účinná plocha desek ( $\text{m}^2$ ),  $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika (-),  $\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,85 \cdot 10^{-2} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) a  $d$  je vzdálenost mezi deskami (m).

Mikroprocesor následně převede naměřenou hodnotu relativní vlhkosti  $\varphi$  (%) pomocí vzorce

$$\varphi = 100 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16} - 1} \quad (3.3)$$

, kde  $S_{RH}$  je nezpracovaný výstup ze senzoru vlhkosti SHT30. Vzorec funguje pouze za předpokladu, že  $S_{RH}$  je použito v desetinném čísle.

Přepočet měřené teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) z výstupu senzoru SHT30 je ve tvaru

$$T = -45 + 175 \cdot \frac{S_T}{2^{16} - 1} \quad (3.4)$$

, kde  $S_T$  je nezpracovaný výstup ze senzoru teploty SHT30.

Typická změna kapacity se pohybuje mezi 0,08–0,35 pF / % RH. Mezi výhody SHT30 senzoru patří nízká energetická spotřeba, vysoká přesnost a stabilita, odolnost vůči kondenzaci a rychlá odezva.

Pro komunikaci s mikrokontrolérem slouží hojně rozšířená I<sup>2</sup>C sběrnice, což zvyšuje kompatibilitu a snižuje složitost systémového návrhu. Senzor rychle reaguje na změny v prostředí a je schopen měřit relativní vlhkost v rozmezí 0 % – 100 % s přesností  $\pm 3$  % a teplotu vzduchu v rozmezí  $-0$  °C – 65 °C s přesností  $\pm 0,3$  °C.

Pro získání validních výsledků je zásadní dodržení řady požadavků:

- teplota okolí  $-40$  °C – 125 °C,
- relativní vlhkost 20 % – 80 %,
- napájení: napětí 2,4 V – 5,5 V, proud  $< 1,5$  mA.

S provozními požadavky jsou spojeny nezbytné parametry:

- měřený prostor by měl být dostatečně odvětráván,
- senzor by měl být chráněn před prachem a mechanickým poškozením.

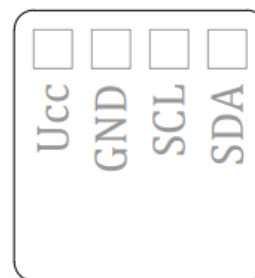
Senzor SHT30 obsahuje na výstupu 4 piny:

$U_{cc}$ (2,4 V–5,5 V)
GND
SDA
SCL

**Tabulka 6:** Popis pinů MH-Z16



**Obrázek 14:** Senzor vlhkosti a teploty vzduchu SHT30

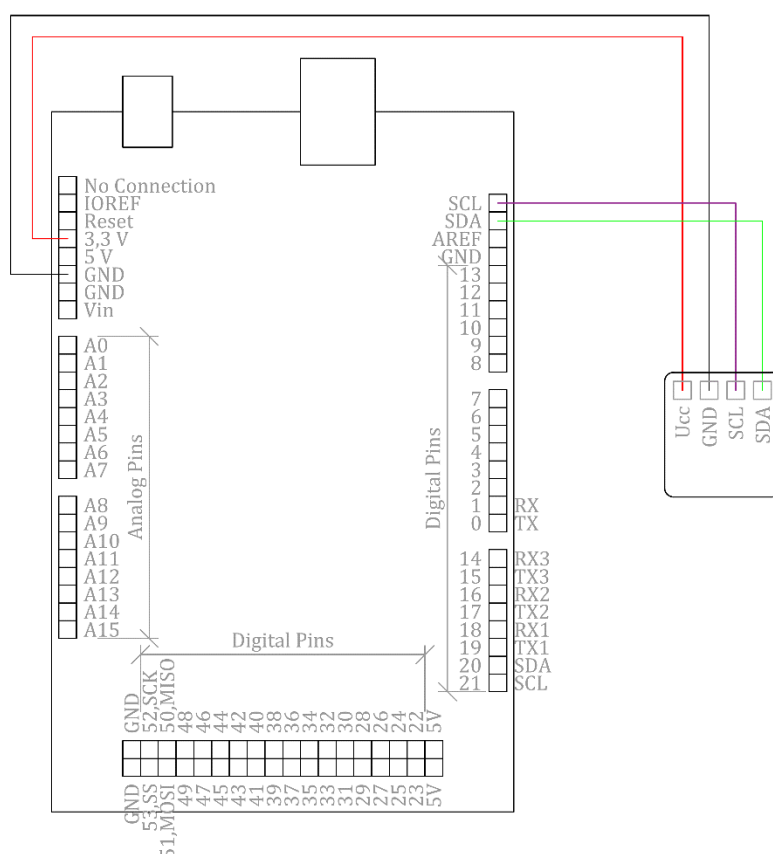


**Obrázek 15:** Piny SHT30

Pro teplotní kalibraci senzoru SHT30 se volí dostatečně přesné kontrolované prostředí (termokomora), které slouží jako referenční hodnota. Po stabilizaci teploty a odeznění přechodových jevů se porovnávají naměřené hodnoty teploty s hodnotou referenční. Hodnota naměřená senzorem SHT30 se poté softwarově upraví tak, aby odpovídala referenčním údajům.

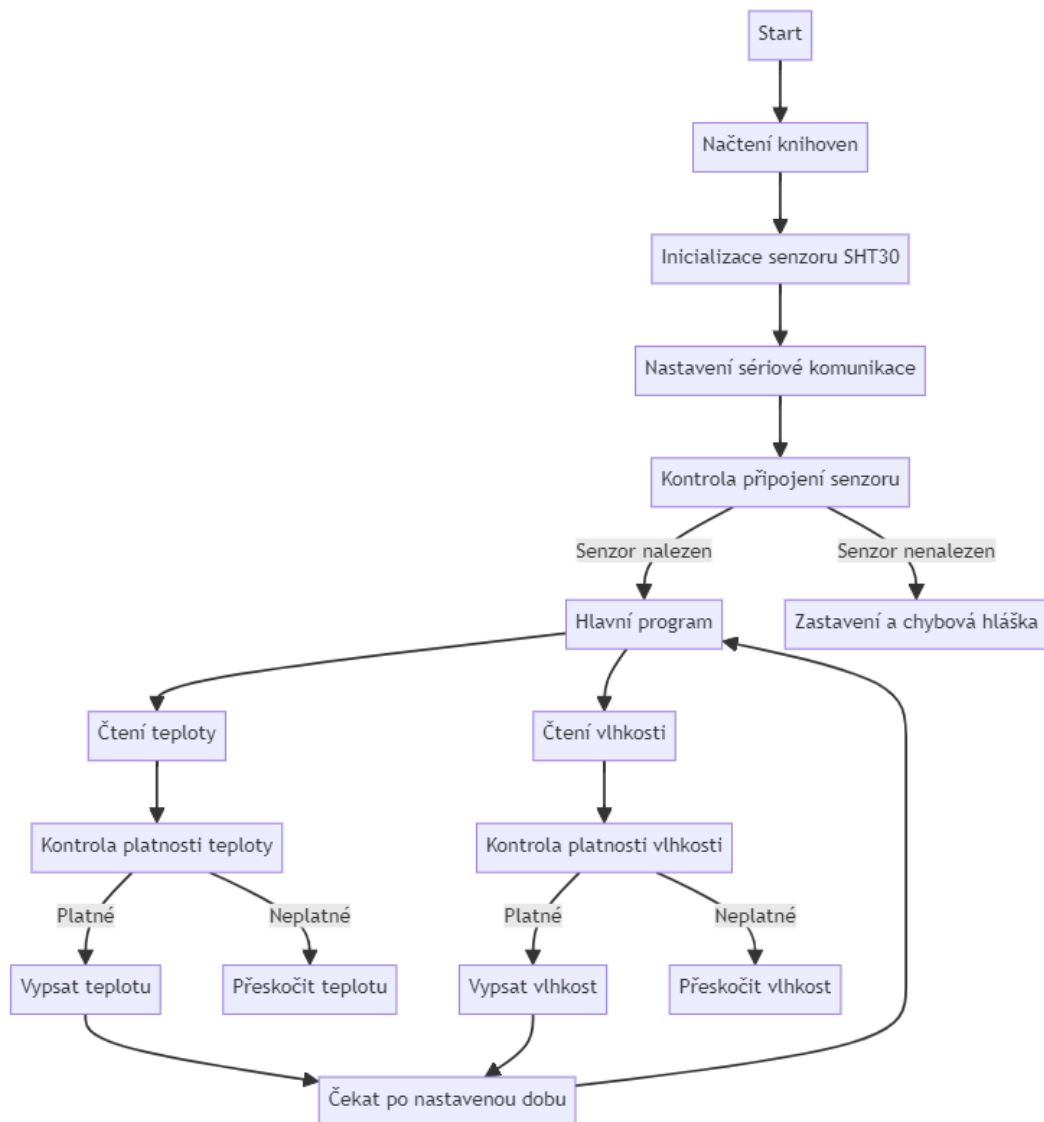
Kalibrace měření relativní vlhkosti vzduchu je realizována pomocí kalibrační komory, která je schopna s dostatečnou přesností změřit relativní vlhkost. Naměřená hodnota senzorem SHT30 se následně upraví tak, aby odpovídala referenční hodnotě kalibrační komory.

Komunikace s nadřazeným mikrokontrolérem je realizována pomocí sériové sběrnice I<sup>2</sup>C. Napojení senzoru je znázorněno na následujícím obrázku, napětí + 5 V z Arduina je připojeno na pin U<sub>CC</sub>, GND na pin GND, SCL na pin SCL a SDA na pin SDA.



**Obrázek 16:** Schématické zapojení senzoru SHT30

Způsob vyčítání dat ze senzoru mikrokontrolérem je znázorněn na vývojovém diagramu.



**Obrázek 17:** Vývojový diagram senzoru SHT30

### 3.3 Mikrokontrolér ELEGOO Mega 2560 R3

Jedním z klíčových aspektů pro monitorování vnitřního prostředí je vhodný výběr řídicí jednotky. Ten byl ovlivněn požadavky na flexibilitu, výkon a cenu. Mikrokontrolér ELEGOO Mega 2560 R3 je cenově dostupnější kompatibilní klon Arduina, což přináší širokou dostupnost knihoven a podpory. Vysoký výkon a velká paměť v kombinaci s množstvím digitálních a analogových vstupů/výstupů poskytuje dostatečnou flexibilitu pro připojení různých senzorů, podporujících různá komunikační rozhraní. Výběr tohoto mikrokontroléru byl v neposlední řadě podpořen předchozími zkušenostmi s jeho používáním.

Mikrokontrolér ELEGOO MEGA 2560 R3 s čipem Atmega2560-16au má provozní napětí + 5 V, 54 digitálních I/O pinů (15 poskytuje PWM řízení), 16 analogových výstupů. 256 KB paměť flash, 8KB SRAM, 4K EEPROM.



**Obrázek 18:** Mikrokontrolér ELEGOO MEGA 2560 R3

Data jsou pravidelně vyčítána do řídicí jednotky z připojených senzorů pomocí protokolů, jako jsou I<sup>2</sup>C a UART. Mikrokontrolér dočasně ukládá data v lokální paměti pro nezbytné výpočty. Pro dlouhodobé sledování a analýzu jsou data pravidelně odesílána pomocí Ethernetového modulu do cloudové služby ThingSpeak.

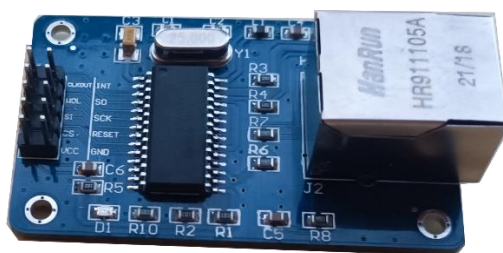
Mikrokontrolér je schopný dodávat stejnosměrný proud In / Out pinů 20 mA, stejnosměrný proud pro 3,3 V piny 50 mA a stejnosměrný proud pro 5 V piny 500 mA, což je pro zvolené komponenty dostačující a není nutné volit externí napájecí zdroj.



### 3.4 Ethernetová komunikace a síťové rozhraní

Pro zajištění spolehlivého přenosu dat z mikrokontroléru do cloudové služby ThingSpeak slouží jako rozhraní Ethernetový shield. Ten s mikrokontrolérem komunikuje skrze SPI rozhraní. Po inicializaci sériového portu a ověření funkčnosti senzorů mikrokontrolér inicializuje Ethernet shield s danou MAC adresou a získává IP adresu prostřednictvím DHCP.

Po převedení a přepočtu dat ze senzorů mikrokontrolér sestaví HTTP POST požadavek, který obsahuje naměřené hodnoty. Tento požadavek je pomocí Ethernetového modulu odeslán na server ThingSpeak. Klient vytvoří TCP spojení s ThingSpeak serverem a odesílá HTTP požadavek. Po úspěšném odeslání dat se spojení přerušuje.



Obrázek 19: Ethernetový shield ENC28J60

### 3.5 Přehled koncových prvků, jejich komunikace a napájení

Přestože by volba koncových prvků s jednotnými komunikačními protokoly byla jednodušší, záměrem bylo implementovat senzory s rozdílnými protokoly. Tento přístup má za snahu zvýšit technické dovednosti získané při realizaci návrhu.

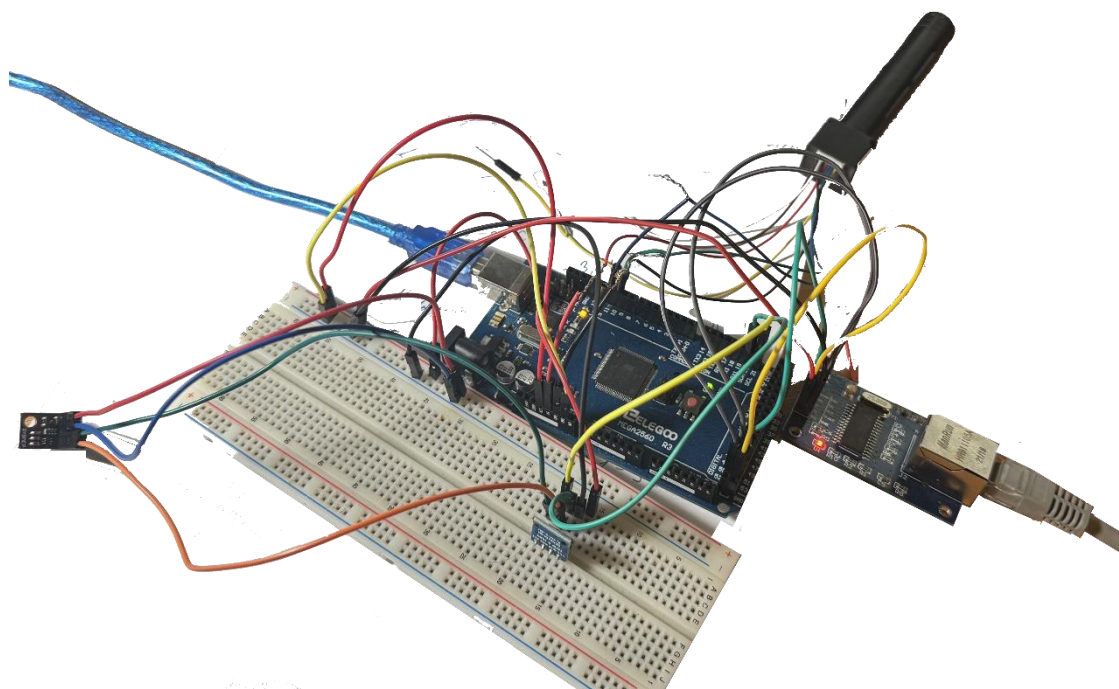
Jednotlivé koncové prvky vyžadují různou hodnotu napájecího napětí a komunikují s nadřazeným systémem dle následující tabulky:

Koncový prvek	Účel	Způsob komunikace s nadřazeným systémem	Napájení (DC)	Spotřeba (A)
Arduino MEGA 2560 R3	Mikrokontrolér	SPI	+5 V	
Ethernet shield	Přenos dat do nadřazeného systému	Ethernet	+5 V	<180 mA
BMP280	Měření barometrického tlaku	I <sup>2</sup> C	+3,6 V	<2,8 μA
MH-Z16	Měření koncentrace CO <sub>2</sub>	UART	+5 V	<85 mA
SHT30	Měření vlhkosti, teploty	I <sup>2</sup> C	+5 V	<1,5 mA

Tabulka 7: Soupis koncových prvků

### 3.6 Návrh a fyzická konstrukce systému

Pro co nejsnazší návrh, flexibilitu a ověření funkčnosti se v počáteční fázi systém testuje na nepájivém poli.

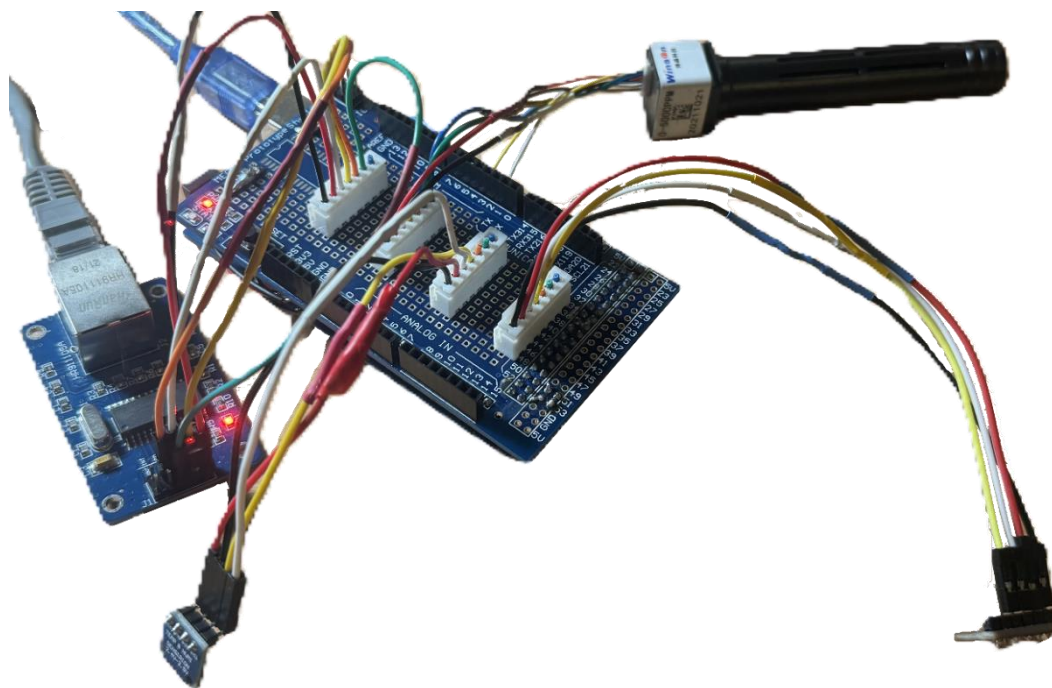


Obrázek 20: Koncept řešení

Po úspěšném ověření funkčnosti a zprovoznění veškerých komponent byla hlavní konstrukce integrována na Arduino shield. Pájení na Arduino shield ve srovnání s vytvářením vlastní desky plošných spojů (DPS) má řadu výhod. Shieldy umožňují snadné modifikace bez nutnosti kompletního přepracování DPS a mohou být snadno odejmuty z mikrokontroléru, což podporuje modulárnost celkového systému.

Arduino shieldy jsou snadno použitelné, se standardizovanými výstupy, což eliminuje potřebu složitého návrhu rozhraní. V neposlední řadě je nutné vyzdvihnout snazší integraci a nižší časové i finanční náklady při vytváření systému v malém množství.

Tento krok zahrnoval optimalizované rozmístění komponent. Pro usnadnění manipulace a zvýšení modularity celého systému byly koncové prvky osazeny JST PH konektory. Vývody pro připojení jednotlivých senzorů na Arduino shield byly vyvedeny z mikrokontroléru.



**Obrázek 21:** Koncept řešení se shieldem

### 3.6.1 Konstrukce fyzického pouzdra pro měřicí systém

Pro vhodné umístění jednotlivých senzorů je nutné se zaměřit na návrh a realizaci ochranného pouzdra. Klíčovou roli hraje technologie 3D tisku, konkrétně FDM (Fused Deposition Modelling). Tato metoda je založena na postupném vrstvení roztaveného materiálu, což umožňuje vytvořit přesné struktury.

Proces začíná návrhem virtuálního 3D modelu pouzdra. Tento model byl navrhnout v intuitivním webovém programu Tinkercad. Po dokončení byl model exportován z CAD programu do formátu STL, což je standardem pro 3D tisk.

Následné rozdělení 3D modelu na jednotlivé vrstvy a přípravu k tisku je provedeno v slicing softwaru. V tomto softwaru byly také nastaveny parametry tisku. Po dokončení nastavení veškerých potřebných parametrů byl vytvořen G-kód, což je soubor, který řídí 3D tiskárnu během tisku.

Před samotným 3D tiskem se připraví tisková plocha (vyčištění, příp. nanesení adheziv pro zlepšení přilnavosti první vrstvy), importuje G-kód do 3D tiskárny a následuje finální spuštění tisku. Použitým materiálem pro 3D tisk byl PLA, známý pro snadnou tiskovou zpracovatelnost a dobré mechanické vlastnosti. Tloušťka tiskové vrstvy byla nastavena na 0,2 mm, což poskytuje dostatečnou pevnost a přesnost s ohledem na efektivní a rychlý tisk. 3D tisk byl realizován na tiskárně Prusa i3 MK3S za využití 3D Print Service Fakulty elektrotechnické ČVUT.



Obrázek 22: Finální modulární systém

### 3.7 Rozhraní pro uživatele, vizualizace dat

Pro zajištění uživatelsky přívětivé interpretace a zobrazení dat je vhodné se zaměřit na prezentaci dat shromážděných z monitorovacího systému. Významnou roli zde hraje intuitivní vizualizace, která je klíčová pro pochopení podávaných informací koncovému uživateli.

#### 3.7.1 Nahrávání dat na ThingSpeak

Pro sběr dat ze senzorů je využita internetová platforma ThingSpeak. Tato platforma je vhodná pro práci s daty z IoT (Internet of Things) zařízení, což umožňuje zpracovávat a vizualizovat data v reálném čase.

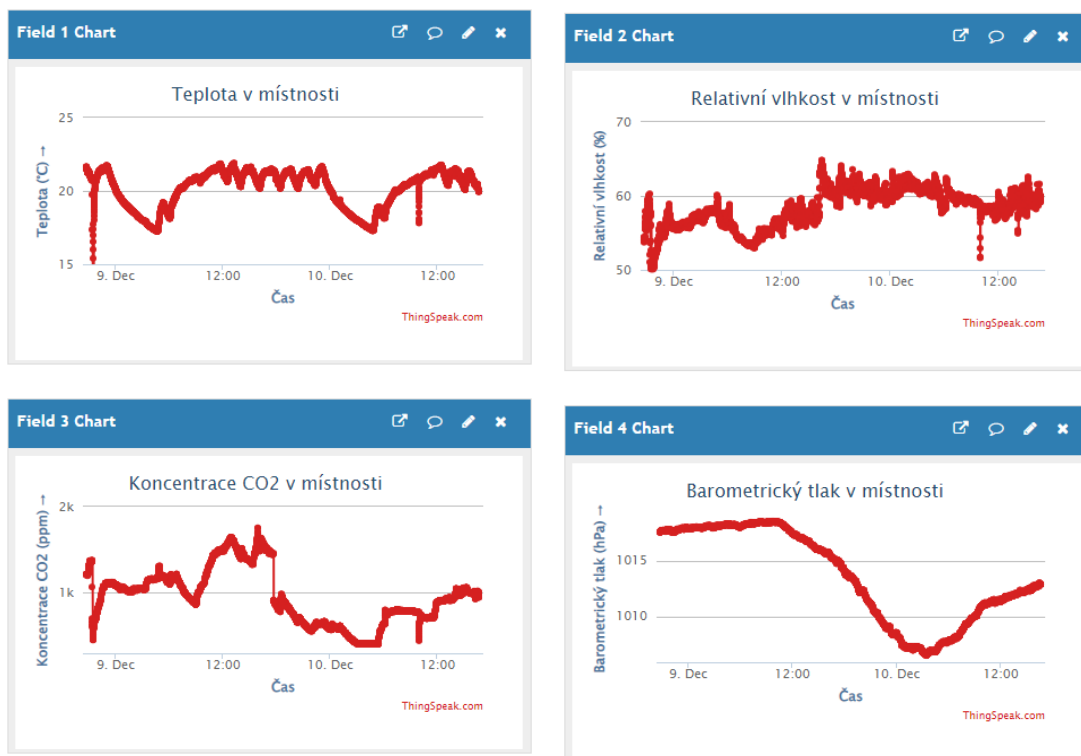
Mikrokontrolér nejprve vyčítá a zpracovává data z jednotlivých senzorů a zároveň provádí nezbytné přepočty měřených veličin. Pro komunikaci s platformou ThingSpeak je využíván Ethernetový shield, který umožňuje připojení mikrokontroléru k internetu.

Mikrokontrolér inicializuje Ethernet shield s konkrétní MAC adresou a prostřednictvím DHCP získává IP adresu. Tento krok je klíčový pro zajištění spolehlivého přenosu dat. Komunikace mezi mikrokontrolérem a Ethernet shieldem probíhá skrze SPI rozhraní.

Po úspěšném zpracování dat ze senzorů mikrokontrolér sestavuje HTTP POST požadavek zahrnující naměřené hodnoty. Tento požadavek je následně odeslán na ThingSpeak server pomocí Ethernetového modulu. Odesílání dat se skládá z vytvoření TCP spojení s ThingSpeak serverem, po kterém následuje odeslání HTTP požadavku. Data se odesílají na konkrétní kanál pomocí specifického API klíče. Po úspěšném odeslání a přijetí dat serverem je spojení přerušeno. Tento způsob umožňuje neustálý sběr dat, jejichž následná základní analýza a vizualizace může být provedena přímo na platformě ThingSpeak.

### **3.7.2 Zobrazení dat v ThingSpeak**

Pro základní interpretaci naměřených dat lze využít samotný ThingSpeak. Tato platforma nabízí intuitivní rozhraní pro grafické zobrazení dat ve formě grafů a dashboardů, zahrnující základní nastavení uživatelského rozhraní podle svých potřeb v reálném čase.



Obrázek 23: Zobrazení dat na platformě ThingSpeak

### 3.7.3 MATLAB aplikace

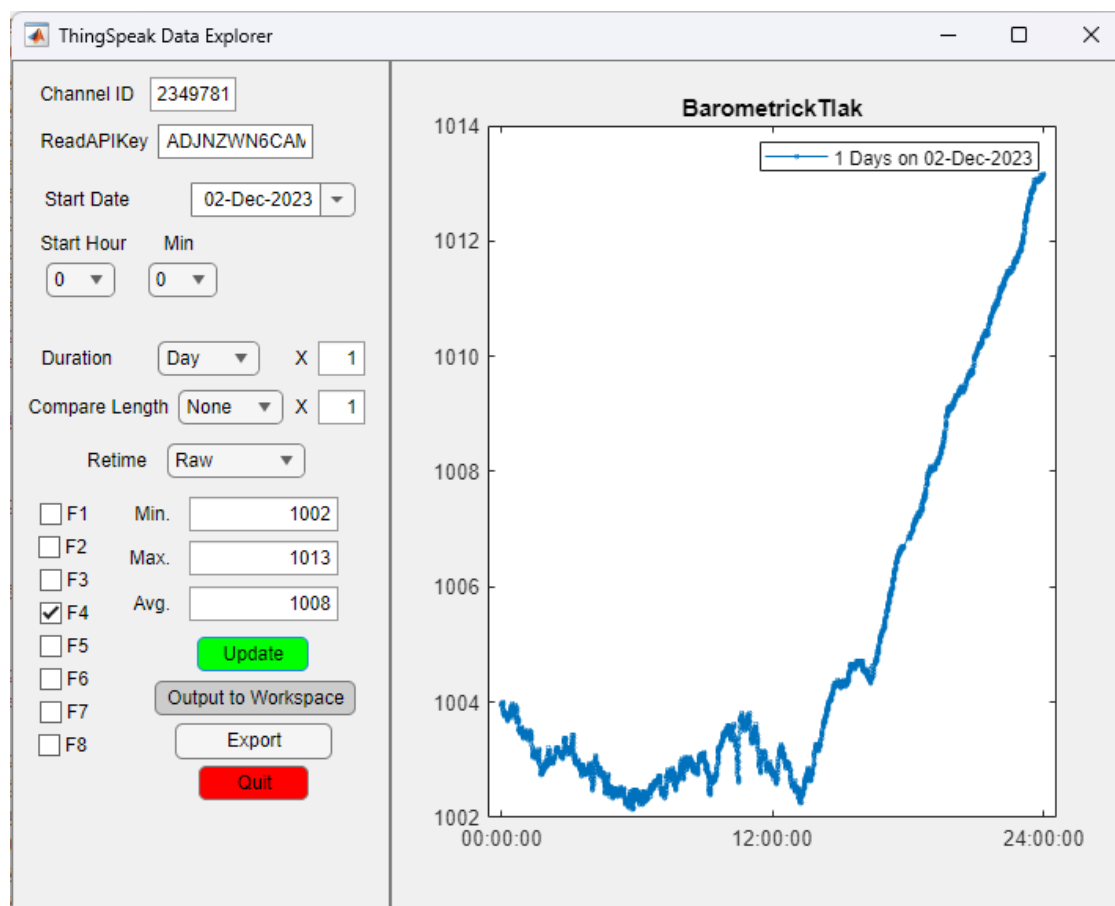
Pro poskytnutí komplexnějšího a uživatelsky přívětivějšího rozhraní lze data importovat do MATLAB aplikace. V této aplikaci uživatel nastaví nezbytné informace, jako jsou ID ThingSpeak kanálu a API klíč pro čtení dat. Následuje výběr požadovaného časového úseku, měřené veličiny a případné porovnání dat.

Princip získávání dat z ThingSpeaku je založen na funkci „thingSpeakRead“, kde jsou specifikovány parametry jako ID kanálu, API klíč pro čtení, časový rozsah a vybrané měřené veličiny.

Data jsou vizualizována ve formě grafů, přičemž uživatel má možnost vybrat, která data chce zobrazit a současně může provést porovnání aktuálních dat s daty historickými. Kromě vizuální prezentace dat jsou také poskytována numerická statistická data jako jsou minimální, maximální a průměrné hodnoty za daný časový úsek.

Aplikace také nabízí možnost exportu dat do pracovního prostoru MATLAB nebo jejich uložení jako CSV soubor pro další analýzu.

Tato MATLAB aplikace představuje komplexní nástroj pro získávání, analýzu a vizualizaci dat z cloudové služby ThingSpeak, což umožňuje pracovat s daty IoT zařízení efektivněji.



Obrázek 24: Rozhraní MATLAB aplikace



## 4 Měření a kalibrace

Pro zajištění přesnosti a spolehlivosti získaných dat je nezbytné zkontrolovat získané hodnoty a provést případnou kalibraci senzorů. Jedná se o proces, díky kterému se výstupy ze senzorů více přibližují skutečným hodnotám v dané místnosti. Pokud není provedena řádná kalibrace, výsledky měření mohou být ovlivněny chybou, což může vést k chybným rozhodnutím založeným na těchto datech. Tento úvod klade důraz nejenom na teoretickou důležitost kalibrace, ale také na praktický dopad na zajištění spolehlivosti a efektivity celého měřicího systému. Chyby v měření mohou být spojeny s následnou nesprávnou regulací vytápění a ventilace, což může vést ke zdravotním a finančním důsledkům. Pravidelná kalibrace senzorů pomáhá prodloužit jejich životnost a udržet systém v optimálním stavu.

### 4.1 Kalibrace

Kalibrace použitých senzorů je proces, který zajistí vyšší přesnost a spolehlivost naměřených dat. Obecný princip kalibrace se dá shrnout do následujících bodů:

- výběr a příprava vnějších podmínek,
- výběr referenčního zdroje,
- stabilizace senzoru,
- zpracování a porovnání naměřených veličin,
- kalibrace senzoru,
- ověření a testování,
- pravidelná recalibrace včetně dokumentace.

#### 4.1.1 Kalibrace měření koncentrace oxidu uhličitého MH-Z16

Kalibrace senzoru koncentrace oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> – MH-Z16 je klíčová pro zajištění spolehlivosti získaných dat. Procesem kalibrace začíná umístěním senzoru v exteriéru po dobu minimálně dvaceti minut, což umožňuje senzoru aklimatizovat se v okolních podmínkách. V této situaci byl senzor umístěn ve venkovním prostředí poblíž lesního porostu, kde se předpokládá nižší úroveň koncentrace CO<sub>2</sub>, přibližně 417 ppm [12].

Je nezbytné dodržet provozní požadavky senzoru. Po uplynutí doby na aklimatizaci senzoru se přivádí na PIN 1 po dobu 10 sekund nízká úroveň napětí 0 V, což vede k nastavení aktuální úrovně 400 ppm. S ohledem na přesnost měření senzoru  $\pm (100 \text{ ppm} + 6 \% \text{ ze změřené hodnoty})$  lze úroveň 400 ppm v rámci tolerancí považovat za dostatečně přesnou. Následná pravidelná kalibrace je prováděna pomocí procesu autokalibrace, který pravidelně upravuje nulovou úroveň.



**Obrázek 25:** Kalibrace senzoru MH-Z16

#### 4.1.2 Kalibrace měření barometrického tlaku BMP280

Kalibrace senzoru barometrického tlaku BMP280 je realizována pomocí automatického kalibrátoru tlaku. Cílem procesu kalibrace senzoru je ověření a případná korekce naměřených hodnot, aby co nejvíce odpovídaly realitě.

Kalibrátor tlaku je schopen nastavit a udržovat tlak v uzavřené nádobě, což umožňuje kalibraci senzoru BMP280 v celém jeho měřicím rozsahu. V případě rozporu nastaveného tlaku regulátorem a naměřeného tlaku senzorem se koriguje výstup ze senzoru softwarově, aby se docílilo co nejpřesnějších výstupních hodnot. Jako referenční zařízení pro kalibraci senzoru BMP280 je využít vysoce přesný automatický modulární kalibrátor tlaku Druck PACE 6000.

Pro dosažení přesných výsledků kalibrace je doporučeno provádět proces v kontrolovaném prostředí s teplotou v rozmezí 15 °C – 45 °C a s relativní vlhkostí v rozmezí 5 % – 95 % rel. vl. Přesnost kalibrace může dosahovat až 2,5 Pa, což zajišťuje dostatečně přesné výsledky pro dané použití. Přesnost senzoru BMP280 dosahuje při optimálních pracovních podmínkách 12 Pa.



Obrázek 26: Měření pomocí kalibrátoru Druck PACE 6000

#### 4.1.2.1 Příprava měření

Pro účely kalibrace senzoru tlaku BMP280 je nezbytné umístit jej v dostatečně utěsněné nádobě, do které vedou kabely pro napájení a komunikaci s nadřazeným mikrokontrolérem a gumová trubice pro regulaci tlaku. Požadavku bylo docíleno použitím zavařovací sklenice, kde veškeré vývody byly utěsněny silikonem a montážním lepidlem. Po zprovoznění kalibrátoru a vizuální kontrole použitých komponent se na externím zařízení nastaví požadovaná hodnota tlaku.

#### 4.1.2.2 Průběh měření

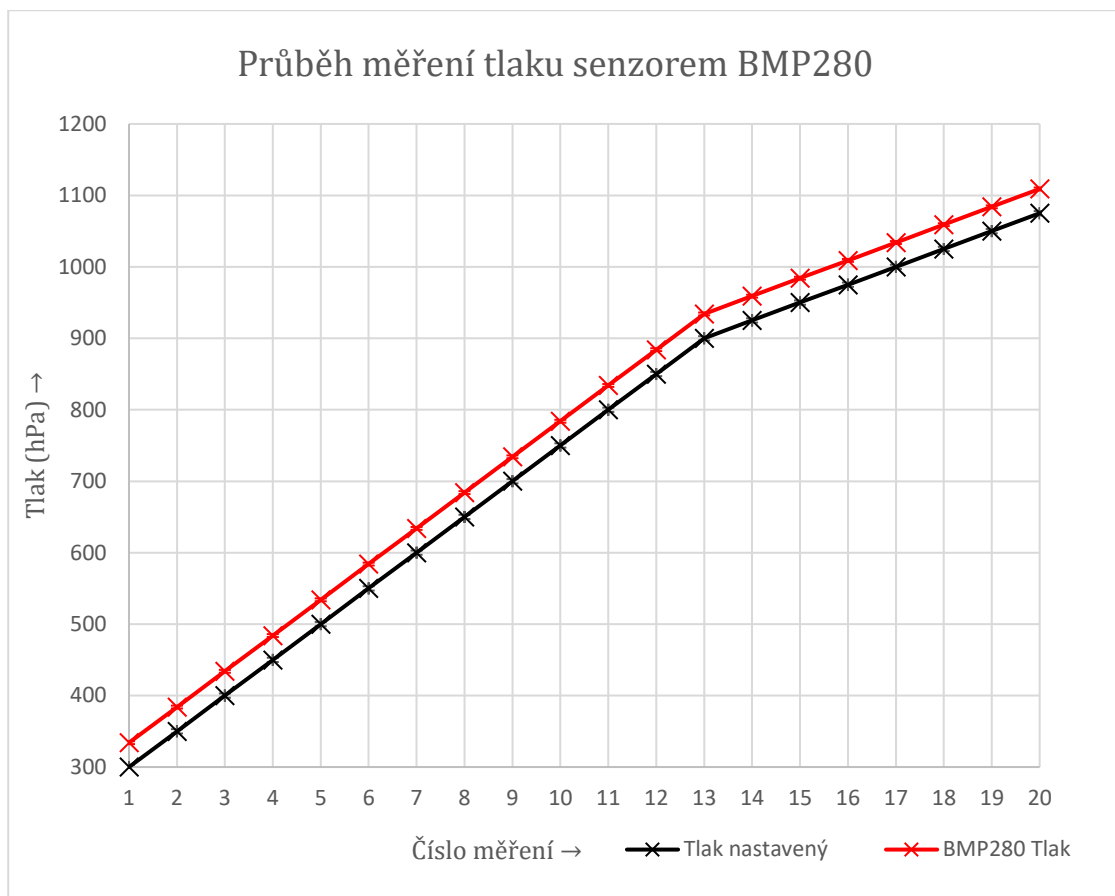
Senzor komunikuje s nadřazeným mikrokontrolérem za pomoci I<sup>2</sup>C rozhraní. Tlak v nádobě je nastaven v externím rozhraní na počítači. Ustálení nastaveného tlaku a odeznění přechodových jevů je indikováno zelenou kontrolkou.

#### 4.1.2.3 Porovnání s referenčními hodnotami

Tlak uvnitř nádoby se nastavoval v rozsahu 300 hPa – 1075 hPa použitého senzoru barometrického tlaku BMP280 po 50 hPa. Pro dosažení přesnější kalibrace v častěji používaném rozmezí 900 hPa – 1075 hPa byl krok snížen na 25 hPa. Naměřené hodnoty byly odečítány po ustálení hodnoty tlaku v nádobě.

Nastavený tlak v nádobě (hPa)	Naměřený tlak BMP280(hPa)
300,02	334,09
350,01	383,95
400,02	433,98
450,01	483,97
500,01	534,01
550,03	584,02
600,01	633,99
650,03	684,04
700,01	734,10
750,02	783,95
799,98	834,01
850,02	884,07
899,99	934,05
925,01	958,96
950,01	984,11
975,03	1009,02
1000,01	1034,04
1025,01	1059,01
1049,99	1083,95
1075,01	1109,05

**Tabulka 8:** Naměřené hodnoty tlaku senzorem BMP280



**Graf 3:** Průběh měření tlaku senzorem BMP280

V průběhu měření bylo zjištěno, že vlivem chyby v původním kódu docházelo k interpretaci naměřených hodnot s odchylkou přibližně 34 hPa nad stanovenou hodnotu tlaku. Po zapracování korekce do kódu se již výsledné naměřené hodnoty nacházely v rozmezí respektující přesnost daného senzoru a kalibrátoru. Na horizontální ose předchozího grafu je znázorněno pořadí jednotlivých měření, na vertikální ose se vynáší hodnoty nastaveného a naměřeného tlaku v uzavřené nádobě. Zlom v trendu růstu tlaku odráží frekventovanější proces měření v rozmezí tlaku 900 – 1075 hPa, což bylo provedeno za účelem získání detailnějších dat v tomto rozsahu.





**Graf 4:** Průběh odchylky naměřeného tlaku od nastaveného tlaku po korekci

#### 4.1.3 Kalibrace senzoru SHT30

Proces kalibrace senzoru SHT30 je proveden za pomoci referenční klimatické komory. Hlavním cílem tohoto postupu je ověření, zdali naměřené hodnoty senzorem odpovídají realitě při stabilních a předem definovaných podmínkách. Tento krok slouží pro zajištění co nejvyšší možné přesnosti měření teploty a relativní vlhkosti senzorem SHT30.

Kalibrace v klimatické komoře umožňuje nastavovat teplotu a relativní vlhkost, což umožňuje optimální prostředí pro testování a kalibraci senzoru. V průběhu procesu se porovnávají hodnoty naměřené senzorem SHT30 s hodnotami udržovanými v klimatické komoře, které slouží jako referenční standard.

Pokud dojde ke zjištění rozdílů mezi naměřenými a referenčními hodnotami, provádí se úprava softwaru senzoru, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího měření. Tento proces zajistí zvýšení přesnosti naměřených hodnot při nasazení v reálných aplikacích.

Jako referenční zařízení pro kalibraci senzoru SHT30 je využita klimatická komora výrobce Weiss Technik s označením ClimeEvent C/180/70a/3. Tento model komory poskytuje dostatečně přesné nastavení teploty a vlhkosti, čímž poskytuje ideální podmínky pro kalibrační procesy.

Teplotní rozsah komory je od  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tento teplotní rozsah zahrnuje celé spektrum, které dané měření požaduje. Rychlost změny teploty při chlazení dosahuje až  $3,0\text{ K/min.}$ , zatímco rychlost změny teploty při ohřevu je až  $4,0\text{ K/min.}$  Teplotní odchylka dosahuje  $\pm 0,5\text{ K}$  a teplotní homogenita prostoru je do  $1\text{ K}$ . Tyto parametry zajišťují konzistentní teplotu v celé komoře s odchylkou  $\pm 1,5\text{ K}$ .

Klimatická komora má schopnost udržovat relativní vlhkost (r.v.) uvnitř v rozsahu od  $10\text{ \% r.v.}$  až do  $98\text{ \% r.v.}$ , což umožňuje simulovat široké spektrum vlhkostních podmínek. Odchylka vlhkosti se pohybuje do  $\pm 3\text{ \% r.v.}$

Využití klimatické komory poskytuje ideální prostředí pro testování a kalibraci senzoru SHT30, což zajistí, že měření teploty a relativní vlhkosti bude co nejspolehlivější.



**Obrázek 27:** Měření v klimatické komoře

Kalibrace je rozdělena do několika kroků:

- příprava komory,
- umístění senzoru v komoře,
- připojení a konfigurace senzoru,
- stabilizace teploty,
- záznam teplotních hodnot,
- porovnání s referenčními hodnotami,
- případně úpravy a kalibrace.

#### 4.1.3.1 Příprava komory

Prvním krokem přípravy komory pro měření je vizuální kontrola. Ta slouží pro předběžné zkontrolování, zdali není poškozená či neobsahuje cizí předměty, které by mohly měření ovlivnit.

Po kontrole těsnění dveří kvůli stabilitě teploty v komoře přichází na řadu ověření funkčnosti – zdali veškeré komponenty (topné systémy apod.) fungují správně. Následně se nastaví teplota na požadovanou hodnoty podle kalibračního plánu.

#### 4.1.3.2 Umístění senzoru v komoře

Po stabilizaci teploty a vlhkosti v klimatické komoře se umístí senzor dovnitř včetně vyvedení potřebné kabeláže skrze teplotní ucpávku. Optimální umístění by mělo být mimo stěny komory. Zároveň by se senzor neměl nacházet příliš blízko topným prvkům. Po finální kontrole je senzor připraven k zahájení procesu měření.

#### 4.1.3.3 Připojení senzoru a stabilizace mikroklimatu

Senzor se pečlivě připojí k mikrokontroléru, se kterým komunikuje za pomoci I<sup>2</sup>C rozhraní. Data jsou ze senzoru sbírána, zpracována v mikrokontroléru a zobrazována na počítači. Po ustálení naměřených hodnot se uvažuje odeznění přechodových jevů, čímž se předpokládá, že senzor nadále provádí měření v přibližně stabilních podmínkách.

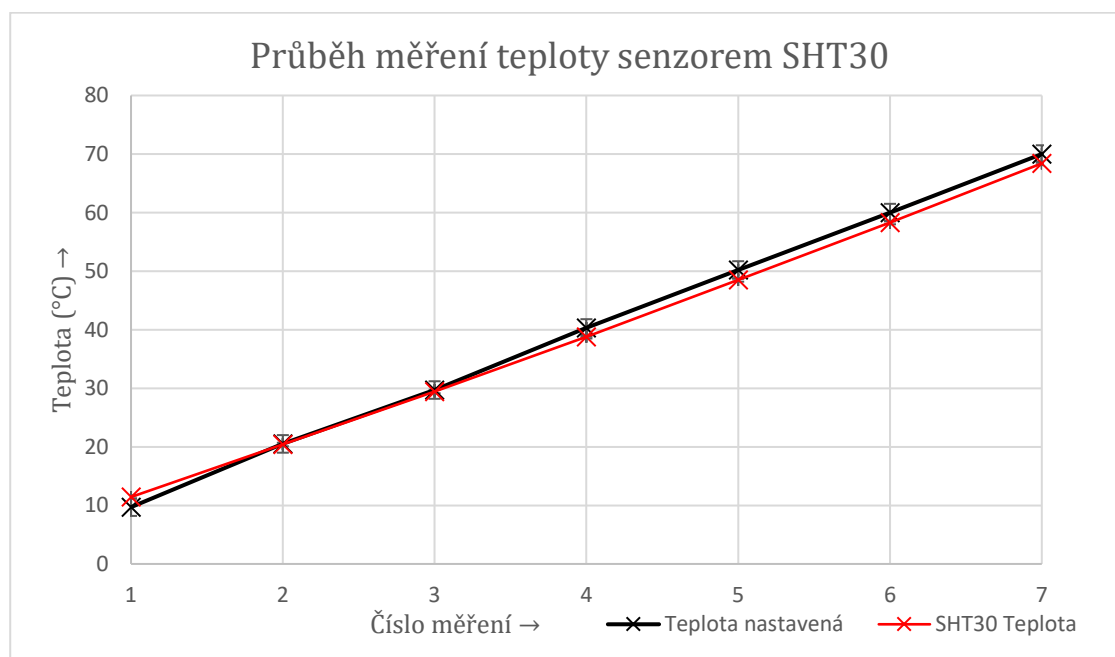


#### 4.1.3.4 Porovnání s referenčními hodnotami – teplota

Teplota uvnitř klimatické komory se nastavovala přibližně po 10 °C s různou hodnotou relativní vlhkosti, jednotlivé hodnoty ze senzoru SHT30 byly odečítány po dostatečně dlouhé době na ustálení měřených veličin s předpokladem, že přechodové děje již odezněly.

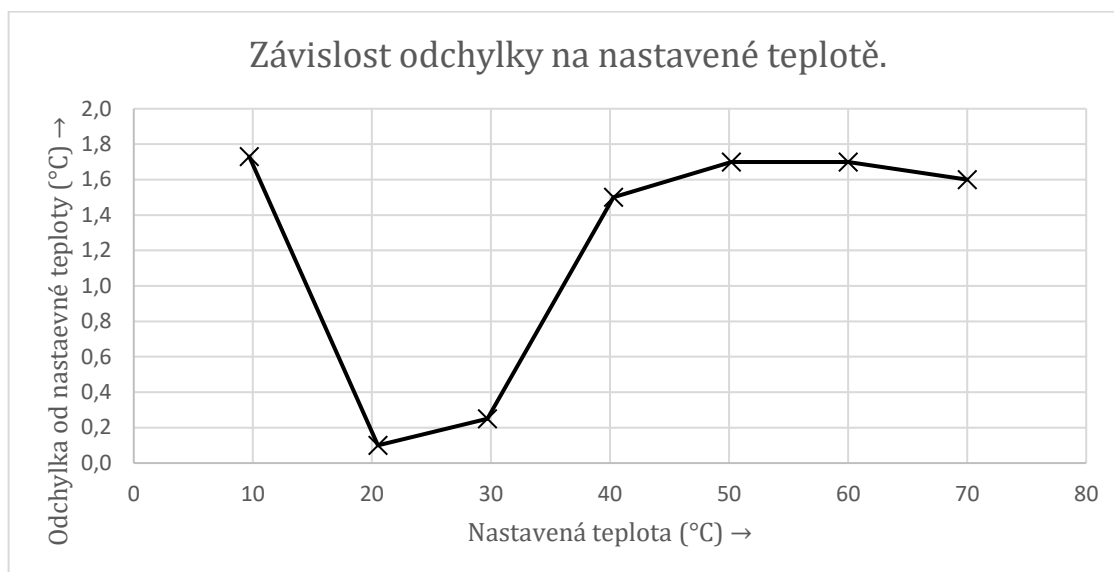
Nastavená teplota v klimatické komoře (°C)	Naměřená teplota SHT30 (°C)
9,7	11,4
20,5	20,4
29,7	29,5
40,3	38,8
50,2	48,5
60	58,3
70	68,4

**Tabulka 9:** Naměřené hodnoty teploty senzorem SHT30



**Graf 5:** Průběh měření teploty senzorem SHT30

Naměřené hodnoty teploty ze senzoru SHT30 se po ustálení ve srovnání s referenční klimatickou komorou, zahrnutí přesnosti měření senzoru ( $\pm 0,3$  °C) a odchylkou komory ( $\pm 1,5$  °C) lišily ve všech bodech měření o méně než 1,8 °C, což vede k předpokladu, že kalibrace senzoru je již z výroby dostatečná.



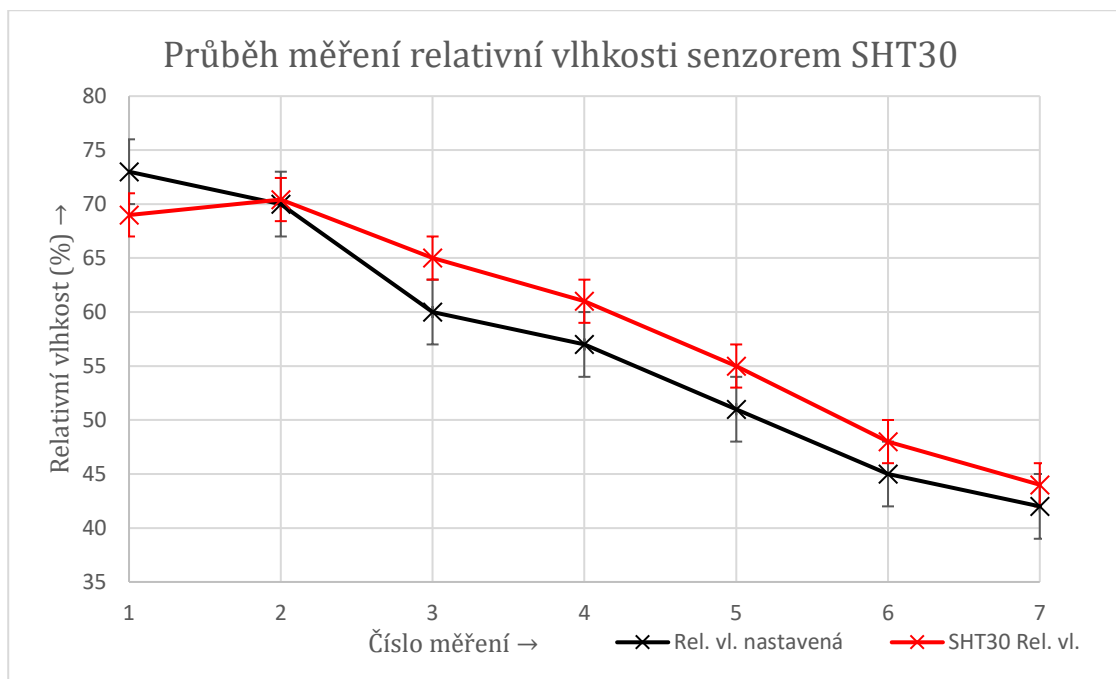
**Graf 6:** Průběh odchylky naměřené teploty od nastavené teploty

#### 4.1.3.5 Porovnání s referenčními hodnotami – relativní vlhkost

Relativní vlhkost uvnitř klimatické komory se snižovala přibližně po 5 % rel. vl. Jednotlivé hodnoty ze senzoru SHT30 byly odečítány po dostatečně dlouhé době na ustálení měřených veličin s předpokladem, že přechodové děje již odezněly.

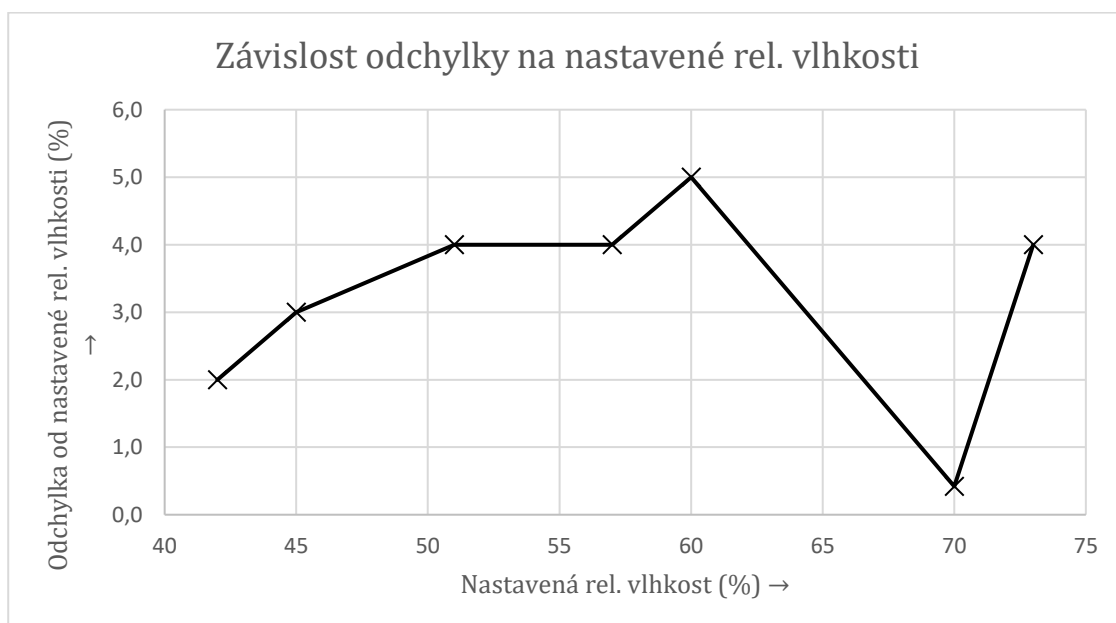
Rel. vl. v klimatické komoře (%)	Naměřená rel. vl. SHT30 (%)
73	69
70	70
60	65
57	61
51	55
45	48
42	44

**Tabulka 10:** Naměřené hodnoty relativní vlhkosti senzorem SHT30



**Graf 7:** Průběh měření relativní vlhkosti senzorem SHT30

Hodnoty relativní vlhkosti naměřené senzorem SHT30 se po ustálení lišily od hodnot získaných referenční klimatickou komorou do 5 %. S ohledem na 2% přesnosti měření, kterou senzor SHT30 nabízí a 3% schopnost udržování relativní vlhkosti klimatickou komorou, lze tyto výsledky považovat za dostatečně přesné. Na základě výsledků měření senzoru SHT30 lze předpokládat, že senzor je správně kalibrován již z výroby.



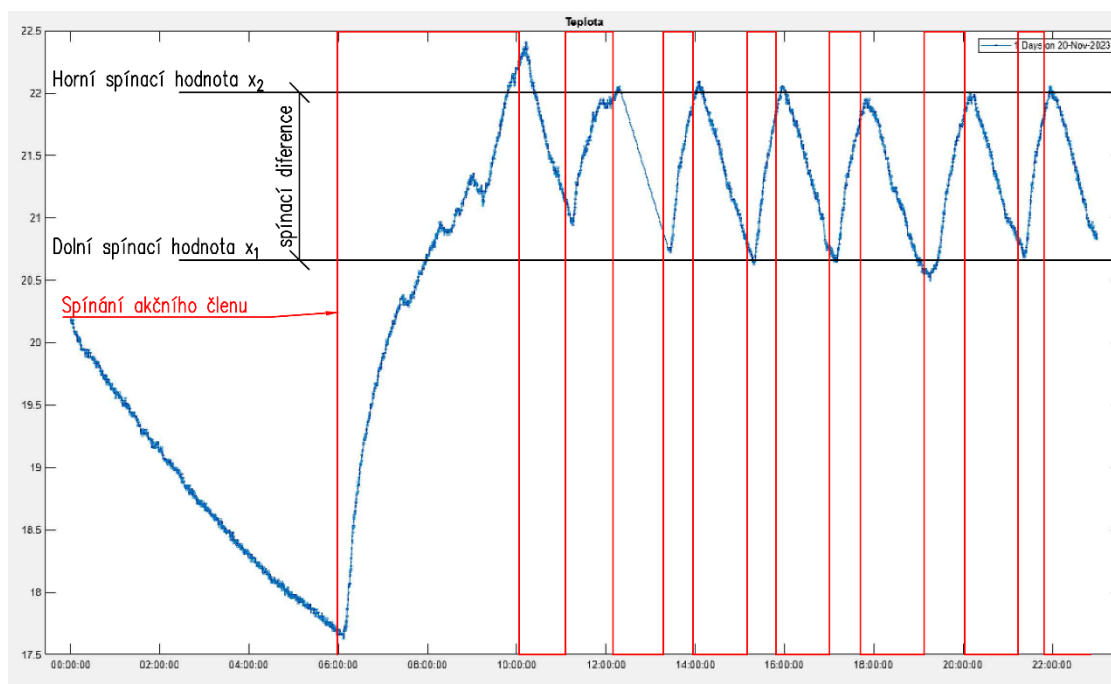
**Graf 8:** Průběh odchyly naměřené rel. vlhkosti od nastavené rel. vlhkosti

## 4.2 Naměřená data

Pro uživatelsky přívětivější interpretaci naměřených hodnot je implementován přenos dat z cloudové platformy ThingSpeak do softwarové MATLAB aplikace. Tento přístup umožňuje pokročilejší zpracování a prezentaci dat ve formě grafů a základní statistické údaje pro lepší pochopení naměřených hodnot. Navíc nabízí aplikace možnost exportu dat do formátu CSV pro případnou detailnější analýzu.

### 4.2.1 Regulace vytápění v místnosti

Průběh teploty v místnosti během víkendového dne je znázorněn na následujícím grafu. Jelikož teplota neklesla pod nastavenou teplotu pro noční režim (17 °C), proces vytápění v místnosti začal až v 6:00.



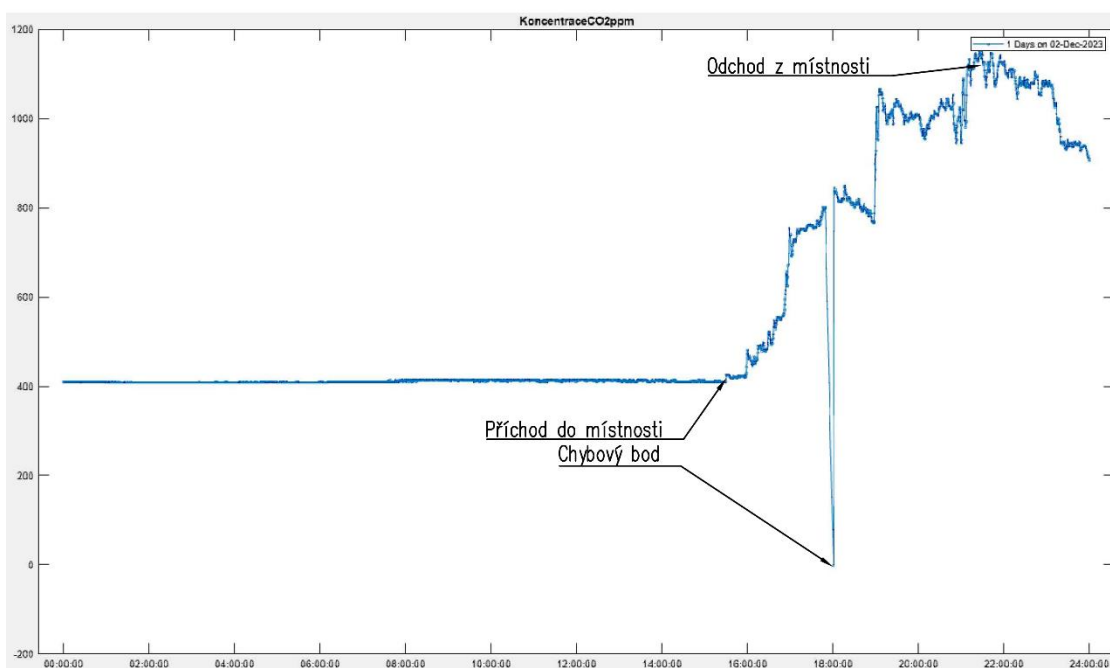
**Graf 9:** Průběh teploty v místnosti

Graf prezentuje průběh teploty v místnosti během 24 hodin, kde horizontální osa představuje čas (h) a vertikální osa reprezentuje teplotu v místnosti (°C). Z průběhu lze vypožorovat, že teplota v místnosti je pravděpodobně regulována pomocí přímé regulace podle vnitřní teploty vzduchu – regulován je přímo zdroj tepla. Řídící veličinou do dvupolohového regulátoru je snímaná teplota vzduchu v místnosti.

Regulační odchylka způsobí změnu teploty přírodní vody, což vede k „vyrovnávání“ teploty v místnosti. Regulovaná teplota se pohybuje mezi dolní a horní spínací hodnotou. Rozdíl mezi horní a dolní spínací hodnotou je spínací diference = pásmo hystereze regulátoru.

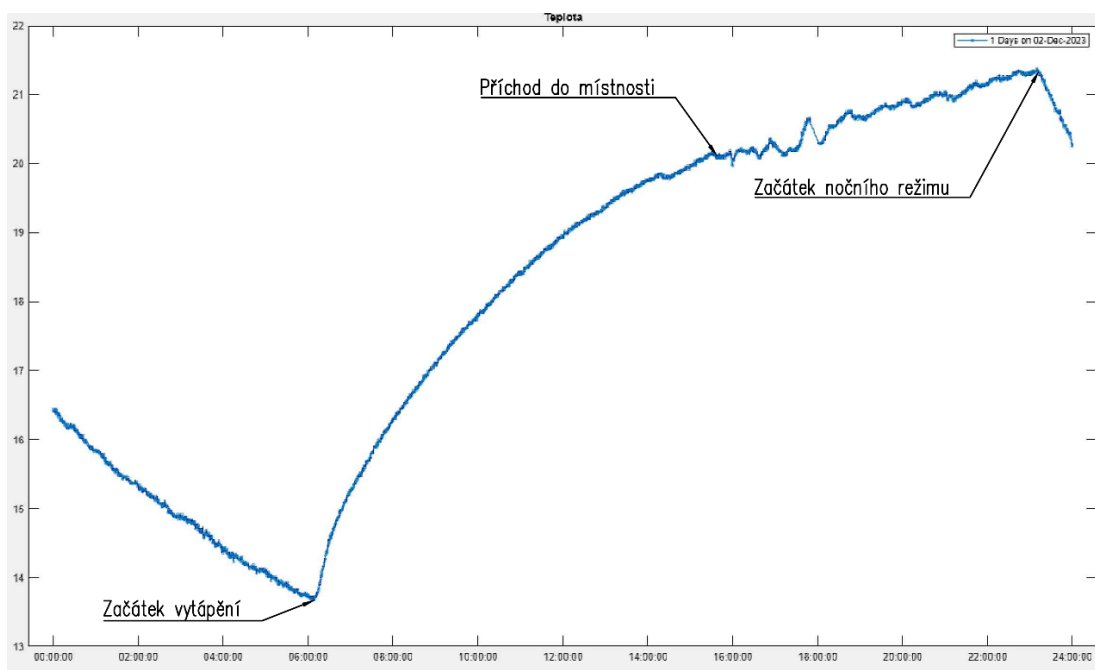
#### 4.2.2 Průběh po režimu dovolené

Na následujícím grafu je na vertikální ose zobrazen nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v čase (horizontální osa), který signalizuje vstup osoby do místnosti. Po přibližně třech hodinách nenáročné administrativní činnosti v místnosti překročila koncentrace CO<sub>2</sub> hranici 1000 ppm, což je úroveň, při které se může objevit mírná únava osob v místnosti. Relativně mírný charakter nárůstu může být přisuzován rozsáhlým prostorům měřené místnosti a nedokonalostmi obálky budovy, jelikož se jedná o 50 let starý nezateplený dům.

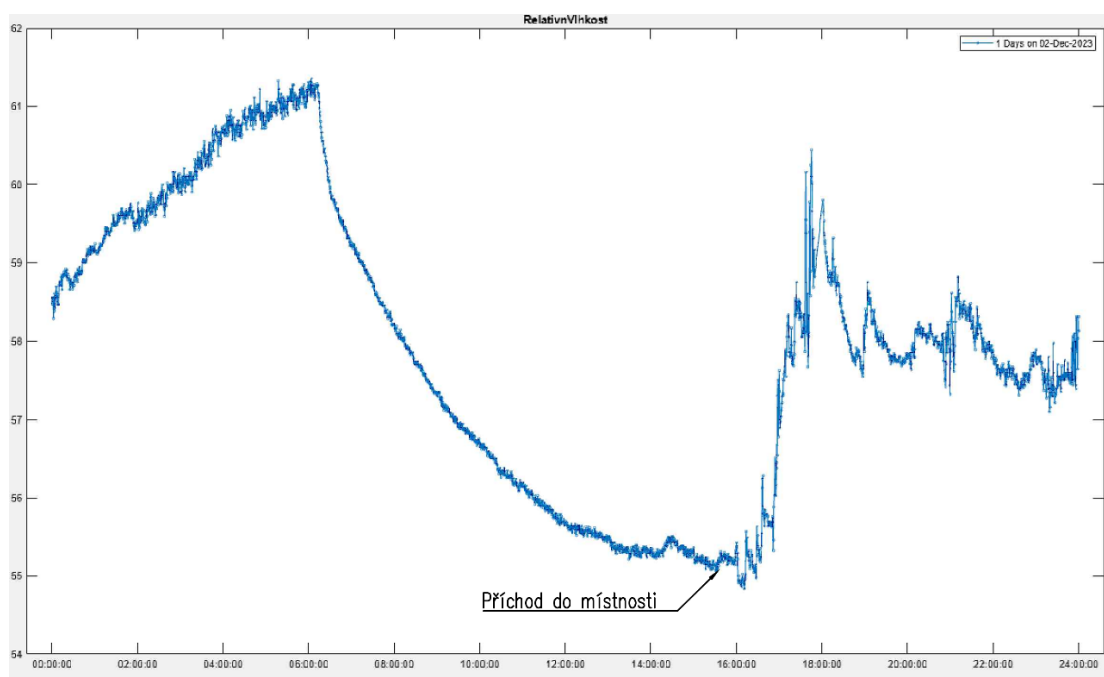


**Graf 10:** Průběh koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

Průběh relativní vlhkosti a teploty (osy y) v průběhu dne (osy x), kdy nebyla v místnosti přítomna žádná osoba, potvrzuje hypotézu o vztahu mezi teplotou a relativní vlhkostí s konstantní absolutní vlhkostí. Při rostoucí teplotě v místnosti byl pozorován pokles relativní vlhkosti při téměř konstantní absolutní vlhkosti. Po vstupu osoby do místnosti začne hrát roli řada faktorů, jako jsou dýchání, pocení, vaření apod., které mohou relativní vlhkost výrazně ovlivnit.



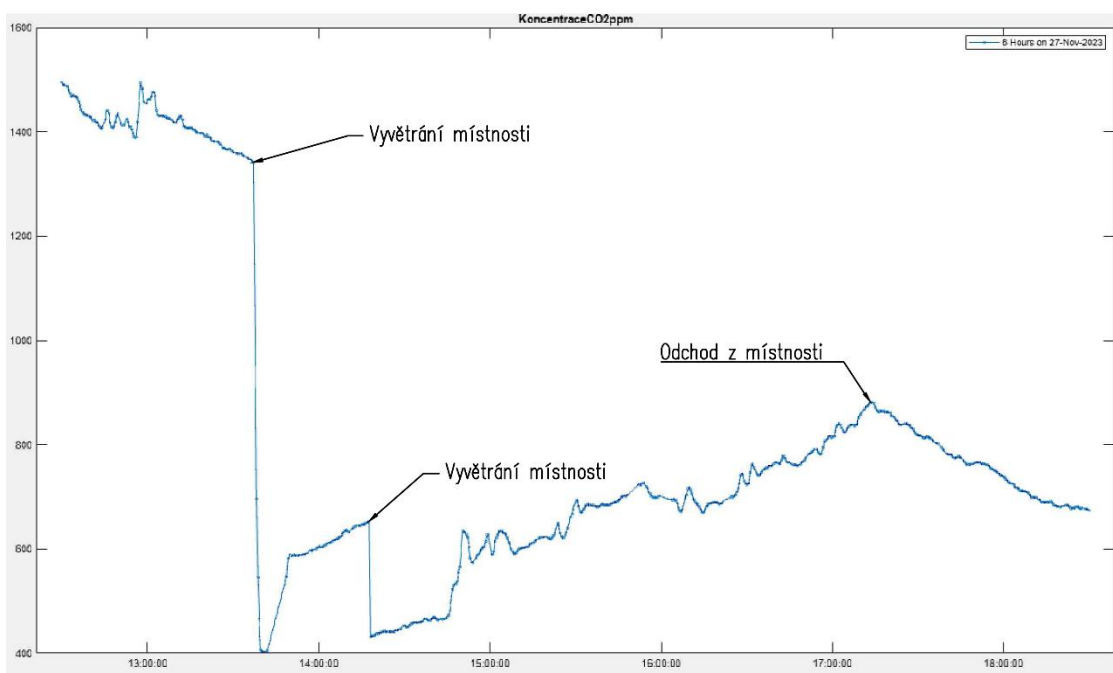
**Graf 11:** Průběh teploty v místnosti



**Graf 12:** Průběh relativní vlhkosti v místnosti

### 4.2.3 Vytětrání místnosti

V průběhu dne (osa x), kdy v místnosti probíhala nenáročná administrativní práce jedné osoby se udržovala koncentrace CO<sub>2</sub> rozmezí 1400–1500 ppm (osa y). Tyto úrovně mohou vést k pocitu únavy a mohou negativně ovlivňovat kognitivní schopnosti. Níže uvedený graf znázorňuje, jak významně se sníží koncentrace CO<sub>2</sub> při krátkém intenzivním vytětrání vzduchu v místnosti, což může vést ke zdravějšímu a produktivnějšímu vnitřnímu prostředí.



**Graf 13:** Změna koncentrace CO<sub>2</sub> při vytětrání místnosti





## 5 Závěr

Diplomová práce se věnuje návrhu, realizaci a testování modulárního systému pro monitorování vnitřního prostředí budov, včetně volby senzorů pro měření koncentrace oxidu uhličitého CO<sub>2</sub>, teploty, relativní vlhkosti a barometrického tlaku včetně kalibrace jednotlivých senzorů. Do modulárního systému byl navíc integrován nadřazený systém pro efektivní komunikaci a zpracování dat. Tento systém poskytuje uživatelsky přívětivé rozhraní, které umožňuje nejen sledování aktuálních hodnot, ale i přístup k historickým datům, včetně základních statistických údajů a možnosti exportu dat pro další zpracování. Navržený systém je schopen poskytovat vzdáleně přesná a spolehlivá data o kvalitě vnitřního prostředí budov, což je prvotním krokem pro zajištění zdraví uživatelů budov.

Kapitola 2 se zaměřuje na faktory, které mají vliv na kvalitu vnitřního prostředí budov. Zabývá se rozbořem principů měření, které jsou základem funkce jednotlivých senzorů a rovněž představuje základní komunikační protokoly, které jsou využity k realizaci systému.

Kapitola 3 se zabývá teoretickým návrhem a následnou realizací modulárního systému. V této části jsou popsány jednotlivé komponenty včetně pracovních požadavků, způsobů zapojení, typu komunikace a jejich provozních parametrů. Následuje popis konstrukce fyzického pouzdra pomocí technologie 3D tisku založené na metodě Fused Deposition Modelling. Kapitola je zakončena představením uživatelského rozhraní včetně nahrávání dat na cloudové úložiště a vizualizaci v MATLABové aplikaci.

Kapitola 4 se soustředí na měření a zpracování dat. Je zde detailně popsán proces kalibrace jednotlivých senzorů pomocí externích zařízení, které udávaly referenční podmínky. Dále kapitola přechází k vizualizaci naměřených dat včetně interpretace pro snazší pochopení.

Navržený systém poskytuje dostatečně přesná a spolehlivá data o kvalitě vnitřního prostředí, což představuje základní krok pro zajištění zdraví a pohody koncových uživatelů budov.

Výsledný modulární systém poskytuje oproti komerčně vyráběným zařízením flexibilní a relativně levné řešení pro monitorování vnitřního prostředí. Systém může přispět k lepšímu porozumění různých faktorů na kvalitu prostředí v budovách.

Jsem přesvědčen, že výstup této práce může posloužit jako základní kámen pro následnou regulaci a optimalizaci vnitřního mikroklimatu budov. Celý systém je navíc navrhován s ohledem na možnost snadného rozšíření o další senzory podle specifických potřeb jednotlivých situací.

V průběhu realizace této diplomové práce se mi podařilo splnit vytyčené cíle. Výrazně jsem prohloubil své odborné znalosti v oblasti navrhování a realizace měřicích systémů vnitřního mikroklimatu budov, včetně práce s daty a interpretaci výsledků. V neposlední řadě jsem kladl důraz na rozmanitost komunikačních protokolů, za účelem prohloubení znalostí v oblasti komunikace mezi jednotlivými prvky.

## Seznam literatury a zdrojů informací

- [1] Kreidl, Marcel a Ďado, Stanislav Sensory a měřicí obvody. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN: 80-01-01500-9.
- [2] Arundel, A. V. a Sterling, E. M. a Biggin, J. H. a Sterling, T. D. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 1986.
- [3] ČSN EN 12831 Otopné soustavy v budovách - Výpočtová metoda pro tepelné ztráty. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [4] Fanger, Povl Ole Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [5] energomonitor. Proč měřit koncentraci CO<sub>2</sub>? [online]. 2021 [cit. 4. dubna 2023]. Dostupné z: <https://www.energomonitor.eu/blog/proc-merit-koncentraci-co2>
- [6] E-manuel.cz. Voda v atmosféře [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://e-manuel.cz/kapitoly/plyny/vyklad/voda-v-atmosfere/>
- [7] prof. Ing. Pavel Ripka, CSc., Sensory pro měření ionizujícího záření, chemické senzory a biosenzory, měření vlhkosti. [PDF]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 06, 2017. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/folder/view.php?id=228192>
- [8] Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-234.
- [9] Stutte, G. W., Bunce, J. A., Eraso, I. (2009). Carbon dioxide enrichment in greenhouses: methods and approaches to improve crop production. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4(1), 1-12.
- [10] HOLLAN, Jan. VE ZDRAVÉM DOMĚ ZDRAVOU NOC! [online]. 2007 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: [https://amper.ped.muni.cz/noc/vyber\\_textu/zdr\\_noc.pdf](https://amper.ped.muni.cz/noc/vyber_textu/zdr_noc.pdf)
- [11] Rohm Semiconductor. Ambient Light Sensor IC Series: Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC [online]. 2011 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [12] Koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Online. Magazín Gnosis. 2023. Dostupné z: <https://magazin.gnosis.cz/koncentrace-sklenikovych-plynu/>. [cit. 2023-12-11].



## Seznam příloh

- [1] Příloha č. 1: SHT3X datasheet.pdf
- [2] Příloha č. 2: MH-Z16 datasheet.pdf
- [3] Příloha č. 3: BMP280 datasheet.pdf