



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií



Bezdrátový snímač environmentálních veličin

Diplomová práce

Studijní program:

N2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Mechatronika

Autor práce:

Bc. Luděk Špaček

Vedoucí práce:

Ing. Miloš Hernych

Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání diplomové práce

Bezdrátový snímač environmentálních veličin

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk Špaček**
Osobní číslo: M20000190
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: 2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši dostupných snímačů pro měření environmentálních veličin venkovního prostředí, například teploty, vlhkosti, prachových částic, O₃, SO₂, NO₂. Dále provedte rešerši bezdrátových technologií, vhodných pro přenos naměřených údajů na vzdálenost v řádu desítek až stovek metrů.
2. Navrhněte a vyberte komponenty pro realizaci kombinovaného snímače, schopného pracovat ve vnějším prostředí v klimatickém pásmu ČR.
3. Snímač realizujte včetně návrhu FW a komunikačního rozhraní.
4. Provedte ověření funkce a relevance získaných dat.

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

dle potřeby dokumentace
40–50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] WEBSTER, John G. The measurement, instrumentation, and sensors handbook. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press, c1999. ISBN 0849383471.
- [2] ANDREOVSKÝ, Jan, HENELOVÁ, Vladimíra, ed. Příručka ochrany kvality ovzduší. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7.
- [3] KARL, Holger a Andreas WILLIG. Protocols and architectures for wireless sensor networks. Chichester: John Wiley, 2007. ISBN 9780470519233.
- [4] WHITE, Elecia. Making embedded systems. Beijing: O'Reilly, 2011. Nutshell Handbook. ISBN 978-1-4493-0214-6.

Vedoucí práce:

Ing. Miloš Hernych
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

14. května 2022

Bc. Luděk Špaček

Bezdrátový snímač environmentálních veličin

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací bezdrátového environmentálního senzoru pro centrální jednotku Tecomat Foxtrot, který je určený k měření prachových částic, ozónu, oxidu siřičitého a oxidu dusičitého. V první části práce je čtenář seznámen s jednotlivými měřenými environmentálními veličinami, nízkopříkonovými bezdrátovými komunikacemi, Li-Ion bateriemi a centrální jednotkou Foxtrot. Teoretické poznatky jsou poté využity v praktické části při návrhu senzoru, kde je popsán postup návrhu hardwaru i softwaru. V závěru práce je pak s výsledným senzorem provedeno měření, jehož data jsou porovnávána s naměřenými daty stanice Českého hydrometeorologického ústavu.

Klíčová slova: Environmentální senzor, Bezdrátový, Prachové částice, Ozón, Oxid siřičitý, Oxid dusičitý, LPWAN, RFox2, Foxtrot

Wireless sensor of environmental quantities

Abstract

This work deals with the design and implementation of a wireless environmental sensor for the Tecomat Foxtrot central unit. It is designed to measure particulate matter, ozone, sulfur dioxide and nitrogen dioxide. In the first part of the work, the reader is introduced to with the environmental quantities measured, low-power wireless communications, Li-Ion batteries and the Foxtrot central unit. Theoretical background is then used in the practical part while designing the sensor. The process of hardware and software design is described. The designed sensor was used in practice and the gained data compared with the official data of the Czech Hydrometeorological Institute station.

Keywords: Environmental sensor, Wireless, Particulate matter, Ozone, Sulfur dioxide, Nitrogen dioxide, LPWAN, RFox2, Foxtrot

Poděkování

Tímto bych rád poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Milošovi Hernychovi za cenné rady při psaní této práce a firmě Teco a.s. za jejich spolupráci při realizaci praktické části, zejména pak Ing. Josefu Jílkovi.

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk	10
Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Environmentální veličiny	12
1.1.1 Prachové částice	13
1.1.2 Přízemní ozon	14
1.1.3 Oxid siřičitý	14
1.1.4 Oxid dusičitý	15
1.2 Metody měření	16
1.2.1 Teplota	16
1.2.2 Vlhkost	17
1.2.3 Prachové částice	18
1.2.4 Koncentrace plynů	20
1.3 Elektrochemické zdroje energie	25
1.3.1 LiCoO ₂	25
1.3.2 LiFePO	25
1.4 Bezdrátová komunikace	26
1.4.1 LPWAN	26
1.5 Tecomat Foxtrot	29
2 Praktická část	30
2.1 Hardware	31
2.1.1 Teplota a vlhkost	32
2.1.2 Prachové částice	32
2.1.3 Ozón	32
2.1.4 Oxid dusičitý, Oxid siřičitý	33
2.1.5 Návrh desky plošného spoje	34
2.2 Software	36
2.2.1 Měřicí cyklus	36
2.2.2 Komunikace	40
2.3 Testování	41
2.3.1 Testovací program	42

2.3.2	Ověření relevance dat	45
Závěr		51
Použitá literatura		54

Seznam obrázků

1.1	Přehled automatizovaných stanic ČHMÚ [4]	12
1.2	Princip měření prachových částic optickou metodou [12]	19
1.3	Elektrochemický senzor [13]	21
1.4	Metal Oxide Semiconductor [15]	22
1.5	Architektura Sigfox [22]	27
1.6	Architektura LoRaWAN [26]	28
1.7	Centrální jednotka PLC Tecomat Foxtrot2 CP-2007 [30]	29
2.1	Radiační kryt RK-7 [31]	30
2.2	Blokové schéma	31
2.3	MQ131-LOW schéma	32
2.4	Virtuální zem	33
2.5	Schéma zapojení senzoru SGX-4NO2	34
2.6	Hardware multisenzoru	35
2.7	Algoritmus pro měření	37
2.8	Závislost MQ131-LOW O_3 na odporu	39
2.9	Závislost MQ131-LOW odporu na teplotě	39
2.10	Oživování senzoru	41
2.11	Webová stránka s naměřenými daty	43
2.12	Konfigurace multisenzoru	43
2.13	I/O Konfigurator	44
2.14	Automatizovaná stanice Kutná Hora-Orebitská	45
2.15	Senzor kvality ovzduší a centrální jednotka CP2005	46
2.16	Graf naměřených hodnot částic $PM_{2,5}$ a PM_{10}	47
2.17	Graf naměřených hodnot koncentrace O_3	49
2.18	Graf naměřených hodnot koncentrace O_3	50

Seznam tabulek

1.1	Porovnání senzorů teploty	17
1.2	Porovnání senzorů vlhkosti	18
1.3	Porovnání senzorů prachových částic	20
1.4	Porovnání senzorů O_3	22
1.5	Porovnání senzorů NO_2	23
1.6	Porovnání senzorů SO_2	24
2.1	Spotřeba senzoru	42
2.2	Naměřené hodnoty $PM_{2,5}$	48
2.3	Naměřené hodnoty PM_{10}	48
2.4	Naměřené hodnoty O_3	48
2.5	Naměřené hodnoty SO_2 a NO_2	49

Seznam zkratek

AD	(Analog to Digital) Analogové na digitální
AES	(Advanced Encryption Standard) Pokročilý šifrovací standart
AQG	(Air Quality Guidelines) Pokyny pro kvalitu ovzduší
CIB	(Common Installation Bus) Společná instalační sběrnice
CRC	(Cyclic Redundancy Check) Cyklický redundantní součet
DIN	(Deutsche Industrie Norm) Německý průmyslový standard
FET	(Field-effect Transistor) Tranzistor řízený elektrickým polem
MOS	(Metal Oxide Semiconductor) Kov oxid polovodič
MOSFET	(Metal Oxide Semiconductor Field-effect Transistor) Kov Oxid Polovodič tranzistor řízený elektrickým polem
LPWAN	(Low Power Wide Area Network) Nízko výkonová rozlehlá síť
OPC	(Optical Particle Counter) Optický čítač částic
PLC	(Programmable Logic Controller) Programovatelný logický automat
PM	(Particulate matter) Prachové částice
WHO	(World Health Organization) Světová zdravotní organizace

Úvod

Rostoucí množství motorových vozidel, zvyšující se produkce odpadu, rostoucí urbanizace a další faktory způsobují zhoršování kvality životního prostředí. Dopad těchto faktorů můžeme pozorovat především ve větších městech, kde dochází ke zhoršení kvality ovzduší. Smogové mraky mohou mít dramatický vliv na lidi trpící dýchacími problémy jako jsou chronická obstrukční plicní nemoc a astma. Dlouhodobé vystavení zvýšeným nebo krátkodobé vystavení vysokým koncentracím různých znečišťujících látek v ovzduší také způsobuje zhoršení zdravotního stavu i u zdravých jedinců.

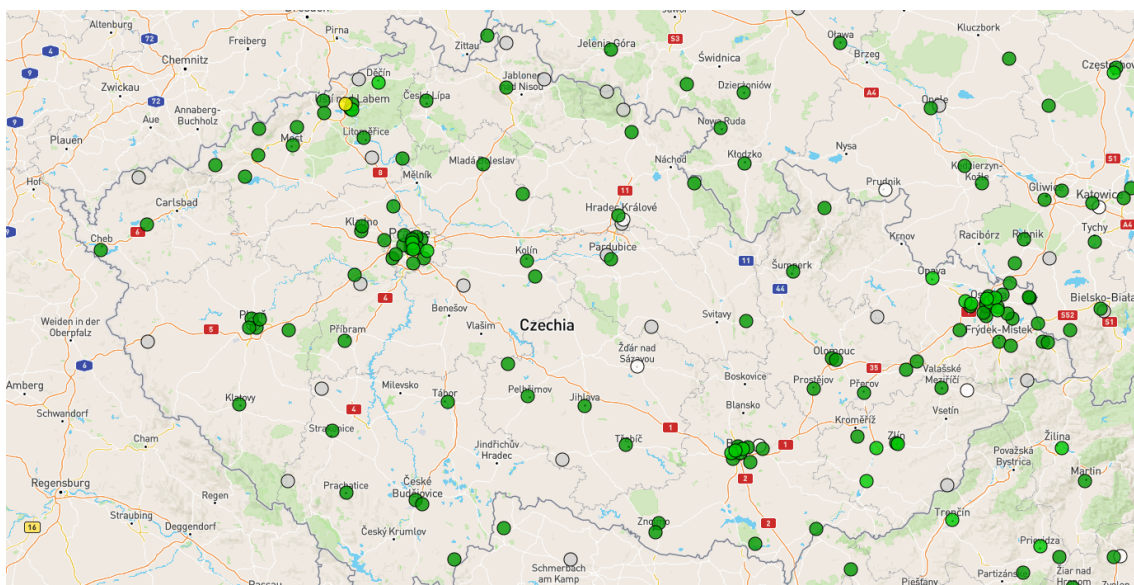
Z toho důvodu se lidé stále více obracejí na senzory kvality ovzduší, aby lépe porozuměli vztahu mezi jejich zdravím a kvalitou ovzduší. Institucionální monitorování životního prostředí nám sice poskytuje pohled na kvalitu životního prostředí, tato forma měření ale postrádá geografickou granularitu a disponuje nízkou úrovní interaktivity, kterou uživatelé očekávají. Z tohoto důvodu roste poptávka po komerčních měřicích přístrojích, které umožňují sledovat kvalitu ovzduší i ve vlastní domácnosti. Vyšší síť měřicích senzorů a jejich interaktivita může pomoci lidem trpícím astmatem nebo jinými dýchacími potížemi s rozhodnutím o způsobu cesty do práce, školy či o způsobu trávení volného času. Díky nim se vyhnuli oblastem, které by mohly mít negativní vliv na jejich zdravotní stav. [1] [2] [3]

Tato práce je zaměřena na vývoj senzoru pro sledování kvality ovzduší, který má za úkol snímat koncentrace plynů O_3 , SO_2 , NO_2 , koncentraci prachových částic, teplotu a vlhkost. Data naměřená senzorem mohou posloužit uživateli či veřejnosti jako ukazatel aktuálního stavu ovzduší v jejich lokalitě a upozornit je tak v případě zhoršení podmínek.

1 Teoretická část

1.1 Environmentální veličiny

Znečišťující látky, které jsou sledovány a hodnoceny z důvodů prokazatelných škodlivých účinků na zdraví populace, mají stanoveny národní legislativou imisní limity. Pro ochranu lidského zdraví jsou v legislativě stanoveny limity pro tyto znečišťující látky: oxid siřičitý (SO_2), prachové částice PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$, oxid dusičitý (NO_2), olovo (Pb), oxid uhelnatý (CO), benzen (C_6H_6), kadmium (Cd), arsen (As), nikl (Ni), benzo(a)pyren (BaP), troposférický ozon (O_3). Legislativa určuje navíc i limity pro ochranu ekosystémů a vegetace. Ta se týká znečišťujících látek: oxid siřičitý (SO_2), oxidy dusíku (NO_x), troposférický ozon (O_3). V následující kapitole jsou představeny znečišťující látky, které jsou v praktické části měřeny. Jedná se o prachové částice (PM), oxid siřičitý (SO_2), oxid dusičitý (NO_2) a troposférický ozon (O_3). [1][2][3]



Obrázek 1.1: Přehled automatizovaných stanic ČHMÚ [4]

1.1.1 Prachové částice

Pevné částice nebo prachové částice (anglicky: particulate matter - PM) je označení pro velmi malé pevné částice a kapičky kapaliny suspendované ve vzduchu. Tyto částice se liší chemickým složením, tvarem, velikostí, povrchem, rozpustností nebo původem. Kvůli tomu je možné popsat tyto částice několika způsoby. Nej-používanější způsob je založen na velikosti částic, přesněji se pro jejich popis využívá tzv. aerodynamický průměr. Ten je definován jako průměr koule o hustotě 1000 kg/m^3 se stejnou ustálenou rychlostí danou gravitační silou v bezvětří, jako má daná částice za obvyklých podmínek.

Pevné částice jsou pak označovány zkratkou PM_x , kde x je prahová hodnota aerodynamického průměru částice v μm . Například zkratka PM_{10} označuje soubor částic s maximálním aerodynamickým průměrem $10 \mu\text{m}$. Hodnota aerodynamického průměru má vliv na to, jak daleko do organismu je částice schopna proniknout po jejím vdechnutí. Zatímco částice větší než PM_{10} jsou zachyceny už v nose, menší částice pronikají dále do dýchacích cest. Z tohoto důvodu se částice označují jako vdechované částice (v angličtině thoracic particles). Částice v rozmezí PM_{10} - $\text{PM}_{2,5}$ se ukládají převážně v horní části dýchacích cest, částice menší než $\text{PM}_{2,5}$ se mohou usazovat v průduškách a pronikat do plicních sklípků (PM_1), nebo až do krve ($\text{PM}_{0,1}$ - ultra jemné částice)

Nepříznivé účinky prachových částic na zdraví člověka jsou dnes již dobře známé. Krátkodobé i dlouhodobé vystavení zvýšeným hodnotám částic souvisí s dýchacími nebo kardiovaskulárními problémy, či dokonce s úmrtím na tato onemocnění. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny klasifikovala tyto částice také jako karcinogenní.

I přesto, že prachové částice mohou pocházet z přírodních zdrojů, jako jsou lesní požáry, eroze půdy, prachové bouře či výbuchy sopek, jsou dominantní emise spojeny s antropogenními činnostmi: doprava, zemědělství, průmysl, vytápění obytných prostorů.

V roce 2020 se hodnoty přírodního pozadí průměrných ročních koncentrací frakce PM_{10} v ČR pohybovaly od 7 do $13 \mu\text{g/m}^3$. Roční koncentrace frakce PM_{10} na měřících stanicích v obydlených oblastech se pohybovala mezi 8,6 až $30 \mu\text{g/m}^3$. Maximální jednodinové koncentrace v extrémně zatížených lokalitách v období nepříznivých rozptylových podmínek mohly dosáhnout až několika set μm^3 . Roční emisní limit $40 \mu\text{g/m}^3$ nebyl v roce 2020 nikde překročen a naměřená data nadále vykazovala klesající trend. Přesto byla doporučená hodnota průměrné roční koncentrace $15 \mu\text{g/m}^3$ ($5 \mu\text{g/m}^3$ pro $\text{PM}_{2,5}$) pro kvalitu ovzduší v Evropě od WHO (2021) překročena na téměř 80 % zahrnutých měřících stanic v ČR. [2][3][5]

1.1.2 Přízemní ozon

Zatímco stratosférický ozon, který tvoří asi 90 % ozonu v atmosféře, nás ochraňuje před UV-B zářením, přízemní ozon je považován za látku znečišťující ovzduší. Jedná se o sekundární polutant, tedy o chemickou látku, která má v určitých koncentracích a délce působení škodlivý vliv na živé organismy. Nemá významný zdroj, ale vzniká až komplexními sekundárními fotochemickými reakcemi v ovzduší, především však vzniká reakcemi oxidů dusíku (NO_x) a těkavých organických látek (VOC). Jeho koncentrace a vznik velmi závisí na meteorologických podmínkách, jeho zvýšená koncentrace bývá především v letních měsících zásluhou vysokých teplot, množství UV záření a nízké relativní vlhkosti vzduchu.

Zvýšená koncentrace ozonu může způsobovat různá onemocnění dýchací soustavy a má silně dráždivé účinky na oční spojivky. Zvýšeně citlivé vůči expozici ozonu jsou osoby s chronickými obstrukčními onemocněními plic a astmatem. Krátkodobá i dlouhodobá expozice ozónu ovlivňuje respirační nemocnost i úmrtnost. Přízemní ozon také poškozuje živé rostliny včetně mnohých zemědělských plodin. Vzhledem k těmto nežádoucím účinkům ozonu může být jeho vysoká koncentrace důvodem k vyhlášení smogové situace.

WHO stanovuje AQG pro ozón $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ /hlavní sezóna, kde hlavní sezónou je: „Průměr z denních maximálních 8hodinových koncentrací O_3 za šest po sobě jdoucích měsíců s nejvyšším šestiměsíčním průměrem koncentrace O_3 .“ [2][6]

1.1.3 Oxid siřičitý

Hlavním antropogenním zdrojem oxidu siřičitého SO_2 je spalování fosilních paliv s obsahem síry, kdy dochází během spalování k přeměně skoro veškeré síry na oxid siřičitý. Významným zdrojem oxidu siřičitého je také tavení rud s obsahem síry. V Evropě můžeme tedy označit jako hlavní zdroj emisí SO_2 veřejnou a průmyslovou energetiku. V atmosféře dochází k přeměně SO_2 na sírany a kyselinu sírovou. Oxid siřičitý tak přispívá k negativním změnám ve vodních a půdních ekosystémech v důsledku okyselení. SO_2 přispívá i ke vzniku sekundárních suspendovaných částic, u kterých je prokázán negativní dopad na lidské zdraví. Působí dráždivě na sliznice dýchacích cest, podporuje záněty průdušek a astma. Rovněž může dojít k bolesti hlavy a nevolnosti.

Znečištění ovzduší oxidem siřičitým nepředstavovalo v roce 2020 v měřených oblastech významné zdravotní riziko. Jen 11krát v roce 2020 se vyskytly vyšší denní koncentrace oxidu siřičitého než $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, což představuje hodnotu AQG doporučenou WHO v roce 2021. [2][7]

1.1.4 Oxid dusičitý

Oxid dusičitý je z hlediska vlivu na lidské zdraví nejvýznamnější znečišťující forma oxidů dusíku. Přírodními zdroji NO_2 jsou vulkanická činnost, bakteriální činnost a pronikání stratosférických oxidů dusíků, tyto zdroje ale v Evropě produkují pouze 10 % celkových emisí. Hlavními antropogenními zdroji oxidů dusíku jsou emise z dopravy a ze spalovacích procesů, především z velkých zdrojů. Společně s oxidem siřičitým je NO_2 součástí tzv. kyselých dešťů. Kyselé deště způsobují značná poškození lesních porostů i průmyslových plodin tím, že uvolňují z půdy kovové ionty, poškozují mikroorganismy, znehodnocují kvalitu vody a mohou způsobit úhyn ryb. Oxid dusičitý (NO_2) společně s kyslíkem (O_2) a těkavými organickými látkami (VOC) přispívá za podpory ultrafialového záření také k tvorbě přízemního ozonu.

Působení oxidu dusičitého (NO_2) je spojováno také se zvýšením celkové, kardiovaskulární a respirační úmrtnosti. Jeho koncentrace vysoce koreluje s ostatními primárními i sekundárními zplodinami. Nelze proto jasně stanovit, zda pozorované zdravotní účinky jsou důsledkem nezávislého vlivu NO_2 , nebo spíše působením celé směsi látek, zejména prachových částic (PM), uhlovodíků, ozónu (O_3) a dalších látek. S působením NO_2 na lidský organismus se objevuje také podezření na ovlivnění centrálního nervového systému. Krátkodobé vystavení vysokým koncentracím NO_2 je spojeno s nárůstem reaktivity dýchacích cest.

V roce 2020 se hodnoty průměrných ročních koncentrací přírodního pozadí oxidu dusičitého v ČR pohybovaly od 1,5 do 5,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. V obydlených oblastech se roční koncentrace pohybovala mezi 9 až 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Maximální jednodinové koncentrace ani v extrémně zatížených lokalitách nepřekročily 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Doporučená hodnota průměrné roční koncentrace 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pro kvalitu ovzduší v Evropě od WHO (2021) byla překročena na téměř 80 % zahrnutých měřících stanic v ČR.[2]

1.2 Metody měření

1.2.1 Teplota

Měření teploty se provádí nepřímou metodou na základě známých fyzikálních jevů za různých teplot. Pro měření se tedy využívají různé látky, které v závislosti na teplotě mění své vlastnosti. Senzory teploty se podle typu měření rozdělují na dotykové a bezdotykové. [8][9]

Dotykové teploměry

Jak již z názvu plyne, měření teploty daného tělesa probíhá přímým přiložením a dotykem měřicího senzoru na jeho povrch nebo případně zasunutím do vnitřní struktury materiálu (porézní pevná látka, kapalina, plyn). Při dotyku dochází k přenosu tepla ze snímaného objektu přes kryt senzoru na místo měření pomocí tepelné vodivosti materiálu.

- Dilatační teploměry fungují na mechanickém principu změny objemu látky vlivem teploty. Měření teploty se převádí na měření délky, objemu nebo tlaku. Dilatační teploměry mohou být například skleněné, tyčové nebo bimetalové.
- Elektrické teploměry fungují na principu změny elektrického odporu, rezonanční frekvence nebo elektrického potenciálu v místě spoje dvou různých materiálů.
 - Kovové odporové teploměry využívají závislost elektrického odporu materiálu na teplotě. Základním materiálem kovových teploměrů je platina nebo nikl. Platina je využívána zásluhou lineární charakteristiky, oproti niklu má ale nižší teplotní součinitel a tím menší citlivost.
 - Polovodičové odporové teploměry neboli termistory dělíme na NTC (negativní teplotní koeficient) a PTC (pozitivní teplotní koeficient). NTC termistor se liší, na rozdíl od kovových teploměrů, negativním teplotním koeficientem. Má vyšší hodnotu teplotního součinitele a menší rozměry, jeho charakteristika je ale nelineární. PTC termistor má jako kovové odporové teploměry pozitivní teplotní koeficient, jeho charakteristika je ale značně nelineární a vyznačuje se prudkým nárůstem odporu při určité hodnotě teploty. Jeho využití je tedy vhodné především pro spínací prvky.[8][9]

Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry snímají vyzařované elektromagnetické záření, které každé těleso v určité míře v závislosti na teplotě vyzařuje. Problémem pro tuto metodu je emisivita, která je způsobena odrazem elektromagnetického záření od tělesa nebo jeho propuštění. Emisivitu bereme jako rušení.[8][9]

Tabulka 1.1: Porovnání senzorů teploty

Název	SHT30	SMT1722-92	DS18S20	TSD305-1C55
Typ	Dotykový	Dotykový	Dotykový	Bezdotykový
Rozsah [°C]	-40 až +125	-45 až +130	-55 až +125	-40 až +100
Přesnost [°C]	±0,2	±0,1	±0,5	±1
Čtení hodnot	I2C	PWM modulace	1-Wire	I2C
Spotřeba	200 nA / 600 μ A	220 nA / 60 μ A	750 nA / 1 mA	25nA / 1 μ A
Cena [Kč]	42,-	78,-	40,-	309,-

V tabulce 1.1 jsou porovnávány některé z dostupných teplotních senzorů. Mezi jednotlivými senzory je porovnáván jejich rozsah, přesnost a spotřeba, dále je zde uveden typ senzoru, způsob čtení naměřených hodnot a cena. Mezi porovnávanými senzory je i senzor SHT30, který s teplotou zároveň měří i vlhkost a bezdotykový senzor TSD305-1C55. Nejlépe z uvedených senzorů vychází senzor SMT1722-92, který se chlubí svojí velmi nízkou spotřebou a přesností na desetinu stupně.[10][11]

1.2.2 Vlhkost

Vlhkost nám udává množství vodní páry obsažené ve vzduchu. Při měření vlhkosti dostáváme informaci o relativní vlhkosti. Tato hodnota nám udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Pro získání absolutní vlhkosti vzduchu využíváme přepočty z relativní vlhkosti pomocí tabulky. Pro měření vlhkosti používáme například psychometrickou nebo hydrometrickou metodu.

- Psychometrická metoda se dnes používá převážně jako metoda srovnávací. Základem metody je určení tzv. psychometrického teplotního rozdílu. Jedná se o rozdíl mezi teplotou prostředí, které chceme měřit a teplotou vzduchu za využití mokrého teploměru. Mokrý teploměr je omotán mokrým materiálem, z něhož se odpařuje voda a odebírá teplo. Rozdíl teplot na obou teploměrech se nazývá psychometrická difference, ze které určíme tlak vodní páry a následně pomocí tabulek relativní vlhkost. [10][11]
- Hydrometrická metoda je založena na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost na úrovni vlhkosti okolí a tím měnit svoje fyzikální vlastnosti.
 - Dilatační hydrometry využívají změnu rozměrů materiálů v závislosti na vlhkosti. Příkladem může být lidský vlas, který mění svojí délku v závislosti na okolní vlhkosti.
 - Odporové senzory vlhkosti využívají změnu vodivosti, která u některých hygroscopických materiálů doprovází absorpci vody.

- Kapacitní senzory vlhkosti využívají změnu kapacity kondenzátoru, v němž je dielektrikem polymer. Jedna z elektrod která je děrovaná, umožňuje okolnímu vzduchu kontakt s polymerním dielektrikem.[10][11]

V tabulce 1.2 jsou porovnávány některé z dostupných senzorů vlhkosti. Mezi jednotlivými senzory je porovnáván jejich rozsah, přesnost a rozsah pracovní teploty, spotřeba, dále je zde uveden způsob čtení naměřených hodnot a cena. Z uvedených senzorů v poměru cena/výkon nejlépe vychází senzor SHT30 od firmy Sensirion.

Tabulka 1.2: Porovnání senzorů vlhkosti

Název	SHT30	HS1100	HIH-4000	HTU20D
Rozsah [%]	0 až 100	1 až 99	0 až 100	0 až 100
Přesnost [%]	+/-2	+/-2	+/-3,5	+/-2
Rozsah teploty [°C]	-40 až +125	-45 až +130	-55 až +125	-40 až +100
Čtení hodnot	I2C	Kapacita	Analogový signál	I2C
Spotřeba	200 nA / 600 μA	1 nA	200 μA	20 nA / 450 μA
Cena [Kč]	42,-	200,-	1176,-	181,-

1.2.3 Prachové částice

Gravitační metoda

Jako referenční metoda měření koncentrace PM v ovzduší se využívá tzv. gravimetrie. Okolní vzduch je nasáván, aby pod známým průtokem procházel přes filtr, který je před začátkem měření přesně zvážen. Po měření, které trvá většinou 24 hodin, je filtr zvážen na analytické váze a výsledný rozdíl hmotností před a po měření se rovná hmotnosti měřených částic. Ze známého množství protečeného vzduchu za danou periodu měření a známé hodnoty hmotnosti prachových částic jsme schopni spočítat průměrnou koncentraci jako hmotnost jednotky objemu vzduchu v $\mu g/m^3$. Tento způsob měření je zásluhou své vysoké přesnosti stále používán na manuálních stanicích ČHMÚ. [2][5]

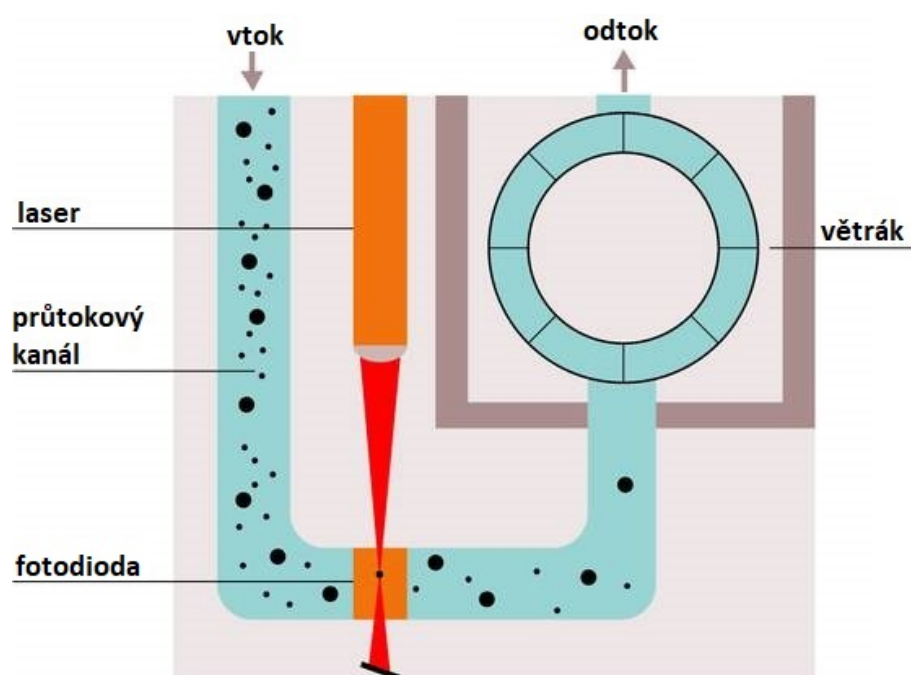
Optická metoda

Ačkoliv je gravitační metoda nejpřesnější metoda pro měření prachových částic, neumožňuje tato metoda získávat data v reálném čase. Z tohoto důvodu se využívají dnes i další typy měření. Jedna z těchto metod je optická metoda měření. Pro měření touto metodou se používají tzv. optické čítače částic (anglicky Optical Particle Counter neboli OPC). Tyto senzory pracují převážně na principu rozptylu světla, v některých případech na absorpci světla. Uvnitř senzoru je pomocí ventilátoru vytvářeno známé konstantní proudění vzduchu, které způsobuje nasávání okolního vzduchu spolu s PM, tyto částice (černé tečky na obrázku 1.2) prochází senzorem až k zaostřenému paprsku laseru. Průchod částic způsobí rozptyl nebo absorpci

světla. Tato změna je zaznamenána fotodiodou, jejíž signál je pomocí patentovaných algoritmů převeden na koncentraci PM.

I přesto, že základní princip OPC vypadá na první pohled jako jednoduchý, ne všechny OPC fungují stejně a jejich kvalita je do značné míry ovlivněna návrhem a konstrukcí. Optická metoda funguje velmi dobře pro počítání částic, avšak jelikož se zařízení používají pro odhad koncentrace PM je nutné zamezit chybám, způsobeným rozdílnými optickými vlastnostmi částic, jako je například tvar, barva či hustota hmoty. Z tohoto důvodu je nutné pro takovýto snímač vhodně zvolit algoritmus, který nám zajistí nejpřesnější odhad koncentrace PM.

Zásluhou snadného používání, malého rozměru, vysokého poměru cena a výkon, jsou dnes OPC senzory nejrozšířenější technikou měření. Můžeme je najít například v klimatizacích, v monitorech kvality vzduchu či v regulátorech kvality vzduchu v domácnostech nebo v automobilech. [5][12]



Obrázek 1.2: Princip měření prachových částic optickou metodou [12]

V tabulce 1.3 jsou porovnávány některé z dostupných senzorů prachových částic. Mezi jednotlivými senzory je porovnáván jejich rozsah, typ měřených částic, přesnost a rozsah pracovní teploty a vlhkosti, spotřeba, rozměry, dále je zde uveden způsob čtení naměřených hodnot a cena. Nejvyšší přesnosti dosahuje z uvedených senzorů senzor OME. Nevýhodou pro některé aplikace mohou být ale jeho rozměry, které jsou v porovnání s ostatními senzory skoro dvojnásobné.

Tabulka 1.3: Porovnání senzorů prachových částic

Název	SPS30	OME	SM-UART-04L	PMSA003
Rozsah [ug/m3]	0.0 až 1000	0.0 až 10000	0.0 až 1000	0.0 až 1000
Přesnost [%]	+/-10	+/-3	+/-10	+/-10
Teplota [°C]	-40 až +60	-20 až +70	-10 až +50	-10 až +60
Vlhkost [%]	0 až 95	0 až 95	0 až 95	0 až 99
Čtení hodnot	UART/I2C	UART/Modbus	UART	UART
Spotřeba	38 uA / 55 mA	20 mA / 80 mA	60 mA	200 uA / 100 mA
Rozměry [mm]	41x41x13	61,8x52,4x23,7	48x37x12	38x35x12
Cena [Kč]	695,-	2145,-	776,-	612,-

1.2.4 Koncentrace plynů

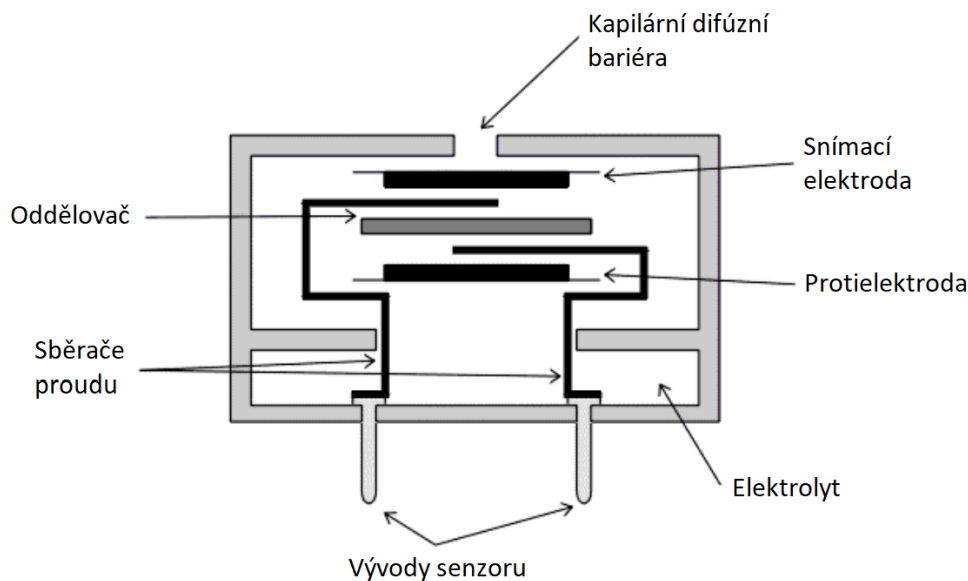
Elektrochemické senzory

Elektrochemické senzory detekují plyny vytvářením chemické reakce mezi plynem a kyslíkem obsaženým v senzoru. Zásadou této reakce se vytváří malý proud, jehož velikost je úměrná koncentraci přítomného plynu. Senzory fungují na principu palivového článku.

Reakce probíhají na dvou elektrodách, které při spojení vytvářejí proces snímání. Tyto elektrody obsahují malé kotoučky z porézního PTFE, na které je nanášena tenká vrstva katalytického kovu. Protože elektrody mají konečnou katalytickou aktivitu (ta závisí na čase a teplotě), je nutné omezit rychlost difúze cílového plynu do senzoru, aby byla zajištěna účinná reakce plynu. Touto bariérou bývá obvykle malý otvor nebo kapiláry v pouzdře snímače.

Elektrody je nutné také udržovat od sebe a smáčet je kyselým elektrolytem, aby mezi nimi mohl procházet iontový proud. K tomu slouží kotouče z inertního absorpčního materiálu nebo separátor, který může být vyroben například ze skleněného vlákna. Elektrody jsou pak připojeny pomocí proudových sběračů nebo tenkými kovovými proužky k pinům senzoru.

Aby byla dosažena maximální účinnost senzoru, musí pracovní elektroda pracovat při nulovém napětí vůči protější elektrodě. Z toho důvodu je k senzoru připojena referenční elektroda, která má za úkol vytvořit napětí na pracovní elektrodě, vzniklé vlivem reakce pracovní elektrody s plynem, snížit na nulu. V opačném případě toto napětí sníží výkon elektrody a odezva senzoru poté klesá s koncentrací plynu.[13]

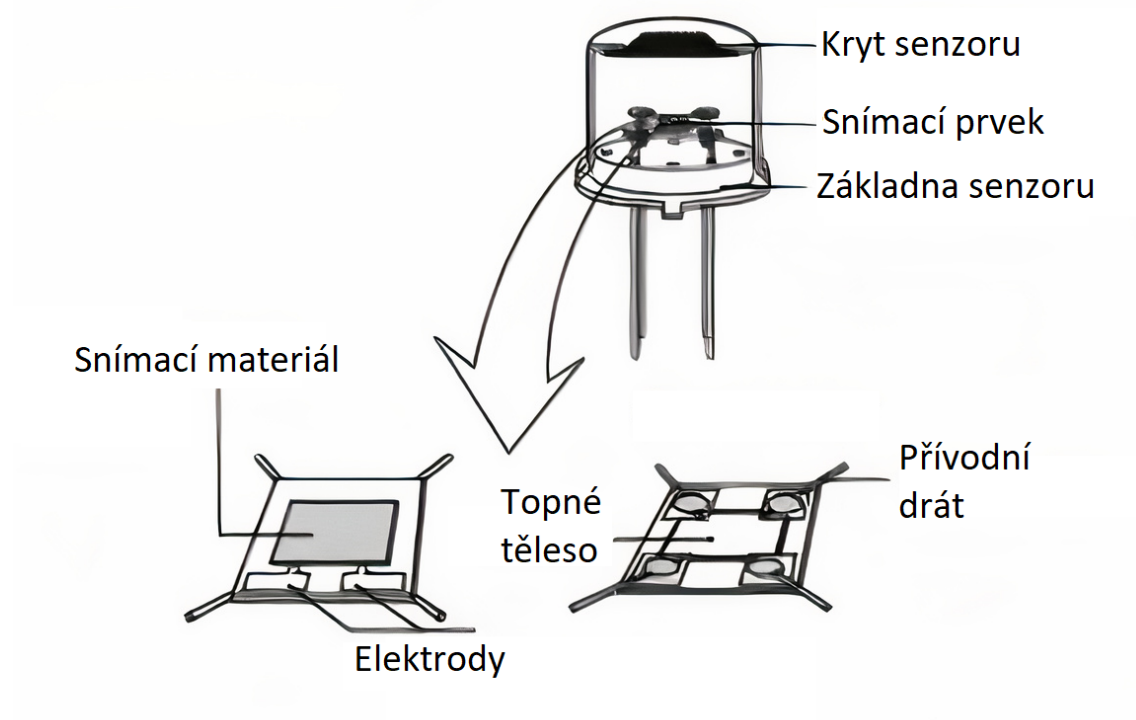


Obrázek 1.3: Elektrochemický senzor [13]

Polovodičové senzory MOS

Senzory plynů na bázi oxidů kovů přitahují v posledních letech velkou pozornost zásluhou pokroku nanostruktur, jako jsou nanočástice, nanotrubice a nanorody, jelikož přidáním malého množství ušlechtilých kovů dochází ke zlepšení jejich citlivosti a selektivity. Princip snímání je založen na změně elektrického odporu snímací vrstvy v závislosti na koncentraci cíleného plynu. Plynové senzory MOS jsou typicky vyráběny z jednotlivých nebo ze směsí oxidů kovů jako jsou SnO_2 , TiO_2 , In_2O_3 , WO_3 , NiO a ZnO .

MOS senzor se skládá ze čtyř částí: snímací vrstvy, izolačního substrátu, dvou kontaktních elektrod a topného tělesa, které je odděleno od snímací vrstvy a od elektrod elektricky izolační vrstvou. Topné těleso slouží k zahřátí snímací vrstvy pro urychlení reakční doby senzoru. Funkce senzoru spočívá v adsorbování molekulárního kyslíku na okrajích zrn vrstvy MOS. Zde kyslík zachycuje volné elektrony ve vodivém pásu MOS vrstvy. V důsledku toho se vytváří vyprázdněná vrstva a dochází tak k ohýbání energetického pásma, což způsobuje změnu vodivosti ve srovnání s vodivostí plochého pásma.[14]



Obrázek 1.4: Metal Oxide Semiconductor [15]

Pro porovnání snímačů ozonu byly zvoleny polovodičové senzory MQ131-LOW od firmy Winsen a SP3-61-00 od firmy Nissha. Jako třetí senzor byl zvolen elektrochemický senzor ME2-03-20MM od firmy Winsen. Z tabulky 2.4 můžeme pozorovat, že zatímco polovodičové senzory měří koncentraci ozonu v jednotkách ppb, elektrochemický senzor má menší citlivost a měří koncentraci plynů v jednotkách ppm.

Tabulka 1.4: Porovnání senzorů O_3

Název	MQ131-LOW	SP3-61-00	ME2-O3-20MM
Typ	MOS	MOS	Elektrochemický
Rozsah	10 až 1000ppb	10 až 250ppb	0 až 200ppm
Pracovní teplota[°C]	-10 až +50	-10 až +50	-20 až +50
Pracovní vlhkost[%]	0 až 95	0 až 95	15 až 95
Spotřeba	80 mA	80mA	0 mA
Cena [Kč]	461,-	401,-	769,-

Pro porovnání snímačů oxidu dusičitého byly zvoleny elektrochemické senzory SGX-4NO₂ od firmy SGX Sensortech, NO₂-D4 od firmy Alphasense a 3NDH od firmy Euro-gas. Všechny tři senzory disponují podobným rozsahem měření. Nevýhodou u senzoru NO₂-D4 je nízká hodnota povoleného rozsahu, která může způsobit jeho zničení při zvýšené koncentraci NO₂. Ostatní porovnávané hodnoty mají senzory podobné. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Tabulka 1.5: Porovnání senzorů NO₂

Název	SGX-4NO2		NO2-D4		3NDH	
Rozsah	30 ppm		20 ppm		20 ppm	
Max. přetížení	200 ppm		60 ppm		300 ppm	
Odezva	<30 s		<35 s		<40 s	
Citlivost	450-750 nA/ppm		100-350 nA/ppm		1,1-1,7 $\mu A/ppm$	
Rozlišení	0,1 ppm		0,1 ppm		0,1 ppm	
Teplota [°C]	-30 až 50		-20 až 50		-20 až 50	
Vlhkost [%]	15 až 90		15 až 90		15 až 90	
Citlivost na jiné plyny						
Plyn	Množství	Chyba	Množství	Chyba	Množství	Chyba
CO	300 ppm	0 ppm	400 ppm	<0,1 %	300 ppm	0 ppm
SO ₂	20 ppm	0 ppm	20 ppm	<-3 %	5 ppm	<-0,05 ppm
H ₂	200 ppm	0 ppm	400 ppm	<0,1 %	100 ppm	0 ppm
NO	50 ppm	<-1 ppm	50 ppm	<0,5 %	35 ppm	0 ppm
Cl ₂	1 ppm	0,5 ppm	10 ppm	<120 %	1 ppm	1 ppm
H ₂ S	15 ppm	< 1ppm	20 ppm	<-200 %	15 ppm	<-1,5 ppm
CO ₂	5000 ppm	0 ppm	10 %	<0,1 %		
C ₂ H ₄			400 ppm	<0,1 %	100 ppm	0 ppm
O ₃			100 ppm	<70 %		
HCN					10 ppm	0 ppm
HCl					5 ppm	0 ppm

Pro porovnání snímačů oxidu siřičitého byly zvoleny elektrochemické senzory SGX-4SO₂ od firmy SGX Sensortech, SO₂-D4 od firmy Alphasense a 3SH od firmy City Technology. Všechny tři senzory disponují podobným rozsahem měření a citlivostí. Nevýhodou může být u senzoru SGX-4SO₂ dvojnásobná doba odezvy, u senzoru SO₂-D4 je nevýhoda nízká hodnota povoleného rozsahu. Všechny porovnávané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.6.

Tabulka 1.6: Porovnání senzorů SO₂

Název	SGX-4SO2		SO2-D4		3SH	
Rozsah	20 ppm		20 ppm		20 ppm	
Max. přetížení	100 ppm		50 ppm		100 ppm	
Odezva	<30 s		<15 s		<15 s	
Citlivost	300-500 nA/ppm		180-420 nA/ppm		1-1,5 μ/ppm	
Rozlišení	0,1 ppm		0,2 ppm		0,1 ppm	
Teplota [C]	-30 až 50		-20 až 50		-20 až 50	
Vlhkost [%]	15 až 90		15 až 90		15 až 90	
Citlivost na jiné plyny						
Plyn	Množství	Chyba	Množství	Chyba	Množství	Chyba
CO	300 ppm	<1 ppm	400 ppm	<0,6 %	300 ppm	<3 ppm
H ₂ S	25 ppm	<0,5 ppm	20 ppm	<400 %	15 ppm	<20 ppm
H ₂	400 ppm	< 1ppm	400 ppm	<0,2 %	100 ppm	0 ppm
NO	50 ppm	0-5 ppm	50 ppm	<3 %	35 ppm	0 ppm
NO ₂	20 ppm	<-20 ppm	10 ppm	<-120 %	5 ppm	-6 ppm
H ₂ C	50 ppm	<45 ppm			100 ppm	0 ppm
NH ₃	20 ppm	0 ppm	20 ppm	<0,1 %		
Cl ₂	15 ppm	<1 ppm	10 ppm	<-60 %	1 ppm	-0,5 ppm
HCN	10 ppm	<5 ppm			10 ppm	5 ppm
C ₂ H ₂	10 ppm	<30 ppm				
C ₂ H ₄			400 ppm	<15 %		
CO ₂			<10 %	<0,1 %		
HCl					5 ppm	0,5 ppm

1.3 Elektrochemické zdroje energie

Existuje mnoho způsobů, jak lze ukládat energii. Například: setrvačníky, stlačený vzduch a ultra-kondenzátory. Pro většinu aplikací ale stále zůstává jako nejlepší volba baterie. Výhodou baterií je jejich možnost použití v malých zařízeních (mobilních telefonech, sluchátkách, kamerách), ale i ve větších a náročnějších aplikacích. Baterie lze využít v elektromobilech nebo je použít jako obří záložní zdroje (UPS). Hlavní výhodou je jejich efektivita, bezpečnost a poměr kapacity k jejich hmotnosti. Vědci se neustále snaží vyvíjet lepší chemické složení článků se zaměřením na nízké náklady a dlouhou životnost.

První průkopnické práce na lithiových bateriích začaly v roce 1912 pod G.N.Lewisem. Komerční využití nastalo ale až v 70. letech a to pro primární články. Snaha o vytvoření dobíjecích článků na bázi Lithia následovala v 80. letech 20. století. Tato snaha ale selhala kvůli nestabilitě kovového lithia, využívaného jako materiál pro výrobu anody. Nestabilita tak posunula výzkum na nekovové řešení využívající lithiové ionty. V roce 1991 firma Sony komercializovala první Li-ion články a dnes se tato technologie stala nejslibnější a nejrychleji rostoucí na trhu baterií. V roce 1994 byly náklady na výrobu Li-ion článku 18650 s kapacitou 1,1 Ah vyšší než 10 amerických dolarů. Na přelomu tisíciletí už klesla cena pod 3 dolary s kapacitou 1,9 Ah. Dnes tento článek dosahuje kapacity přes 3 Ah. [16][17]

1.3.1 LiCoO_2

LiCoO_2 Pro svoji vysokou měrnou energii velice oblíbená volba pro mobilní telefony, notebooky a kamery. Katoda článku je složena z oxidu kobaltu, anoda z grafitového uhlíku. Nevýhodou těchto článků je relativně krátká životnost, nízká tepelná stabilita a omezený zatěžovací výkon. Li-kobalt článek by neměl být nabíjen nebo vybíjen proudem větším než je jeho kapacita (1 C). To znamená, že článek o kapacitě 2,4 Ah by neměl být nabíjen proudem větším než 2,4 A. Optimální hodnota udávána výrobcem je 0,8 C, asi 2 A. Baterie jsou vybaveny obvody, které chrání články před nadměrným vybíjecím nebo nabíjecím proudem. Vyšší hodnota proudu způsobuje zahřátí, nepřiměřené napětí a snižuje životnost baterie.[17]

1.3.2 LiFePO_4

Technologie objevená v roce 1994 na Univerzitě v Texasu. Jak už název napovídá, katoda je vyrobena z železo-fosfátu, anoda jako u ostatních technologií je vyrobena z grafitového uhlíku. Díky materiálu katody jsou výrobní náklady těchto článků nízké a jsou zcela netoxické. Jedna z hlavních výhod vůči ostatním Li-iontovým článkům je i jejich možnost dodávat velmi vysoké proudy, některé články jsou schopny dodat až 40 C. Výhodou je i bezpečnost, články totiž při extrémních teplotách nevybuchují. Nicméně mají nižší hustotu energie a nižší napětí.[17]

1.4 Bezdrátová komunikace

1.4.1 LPWAN

LPWAN jsou bezdrátové komunikační sítě, které byly vyvinuty za účelem odstranění mezery mezi mobilními sítěmi a sítěmi krátkého dosahu, jako jsou například Bluetooth a WiFi. Mobilní sítě jsou pro IoT příliš drahé a sítě krátkého dosahu jsou energeticky příliš náročné a mají omezení v dosahu, zejména uvnitř budov. Naproti tomu sítě LPWAN vykazují sice nízké přenosové rychlosti, ale na dlouhé vzdálenosti. Díky tomu jsou ideální pro aplikace jako je inteligentní měření, průmyslové monitorování a inteligentní města. Vzhledem k tomu, že jejich rychlost přenosu dat je omezená, potřebují podstatně menší výkon než ostatní bezdrátové širokopásmové sítě (W-WAN). Díky nízké spotřebě jsou vhodné pro bateriové aplikace.[18]

Bluetooth Low Energy

Jak už název napovídá Bluetooth Low Energy je nízkoenergetická varianta Bluetooth. Stejně jako Bluetooth využívá frekvenčního přeskokování v nelicencovaném pásmu 2,4 GHz k propojení zařízení. Bluetooth LE umožňuje komunikaci až na 100 m, dosahuje rychlosti komunikace až 1 Mbit/s, od verze Bluetooth 5 je možnost až 2 Mbit/s se spotřebou od 10 mW do 0,5 W v závislosti na aplikaci.[19]

HaLow Wi-fi

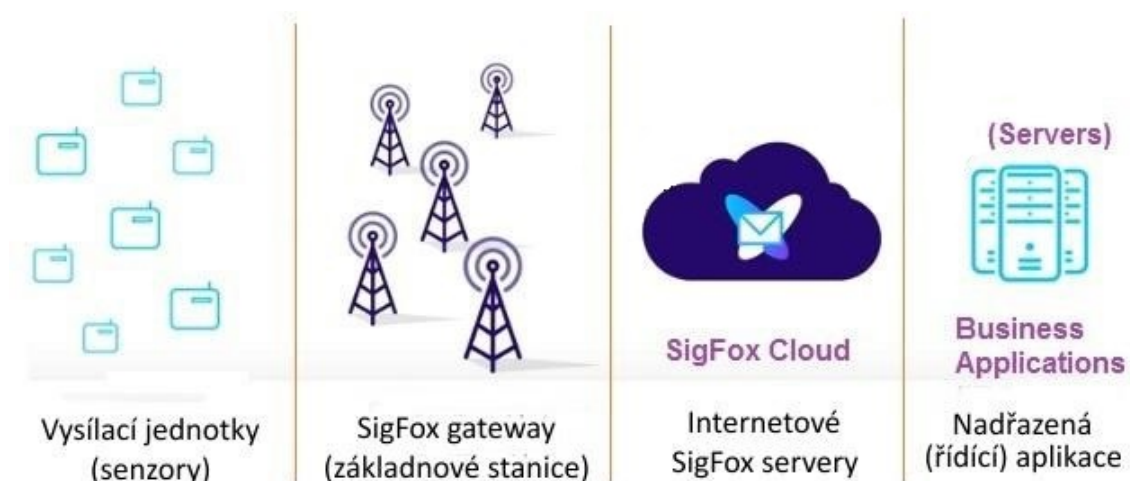
Je označení pro IEEE 802.11ah, které rozšiřuje Wi-Fi o komunikaci ve spektru pod 1 GHz, zásluhou toho je Wi-Fi HaLow schopna splnit požadavky pro IoT aplikace, jako je nízká spotřeba a dlouhá komunikační vzdálenost až 1500 m. Minimální rychlost komunikace je 150 kbit/s, maximální rychlost dosahuje až 347 bit/s.[20][21]

Sigfox

Sigfox je bezdrátová komunikační síť, určená pro zajištění občasné komunikace na dlouhou vzdálenost, až několik kilometrů z měřicího zařízení a senzorů a řadí se tak mezi tzv. LPWAN sítě pro IoT. Sigfox vysílá na bezlicenčním pásmu 868 MHz a k přenosu využívá tzv. Ultra Narrow Band. Jedná se o pásmo pro vysílání krátkého pulsu dat s vysílacím výkonem omezeným na 100 mW a modulací pracující v 200 kHz veřejném pásmu. Každá přenášená zpráva zabírá šířku 100 Hz a je přenesena rychlostí 100 nebo 600 bitů/s (v závislosti na oblasti). Toto řešení zajišťuje dlouhý dosah zároveň s velkou odolností vůči šumu.

Vysílaná zpráva využívá tzv. DBPSK modulaci, které stačí pro rychlost přenosu 1 bit/s jen 1 Hz. Tedy pro komunikační rychlost 100 bit/s využívá již zmíněných 100 Hz. Nízká přenosová rychlost a úzké koncentrované přenosové pásmo zásluhou DBPSK modulace umožňuje velmi efektivní využití přenosového spektra a je velmi snadné ho implementovat.

Přijímač může demodulovat signály velmi blízko šumu. Citlivost SigFox přijímače se reguluje podle přenosové rychlosti. Může být -142 dBm při bitrate 100 bitů/s (bps) nebo -134 dBm při druhé variantě rychlosti 600 bitů/s (bps). Architektura sítě je založena na topologii hvězda, jednotlivá zařízení vysílají zprávy, tyto zprávy zachytává základová stanice. Každá jednotlivá stanice využívá místní SigFox operátory, kteří následně obdržené zprávy posílají do SigFox cloudu již přes TCP/IP internetovou komunikaci. V České republice provozuje technologii Sigfox operátor Sigfox Česká republika.[22][23]



Obrázek 1.5: Architektura Sigfox [22]

LoRa

Název LoRa vychází ze spojení prvních dvou písmen anglických slov Long Range, což v překladu znamená dlouhý dosah. Jedná se o spolehlivou bezdrátovou komunikaci, která umožňuje přenášet menší množství dat na dlouhou vzdálenost při malé spotřebě v bezlicenčním pásmu 868 MHz.

LoRa využívá stejnojmennou modulaci patentovanou firmou Semtech, založenou na modulaci Chirp. Ta rozprostírá signál po celém vysílacím kanálu, na rozdíl od DSSS, FHSS a podobných modulací, využívá lineární změnu kmitočtu místo skokové. Zásadou toho zvyšuje odolnost vůči Dopplerovskému jevu, snižuje nároky na zdroj kmitočtu a umožňuje využití jednoho kanálu pro více vysílačů. Každá datová rychlost má pevně stanovenou šířku pásma a možnost rozprostření signálu. Tuto rychlost je možné uživatelsky nastavovat. Pro stacionární aplikace je ale doporučeno využívat ADR (Automatic Data Rate), které nastaví maximální možnou přenosovou rychlost na základě naměřeného signálu bránou, ta může být mezi 0.3 kbit/s až 50 kbit/s. LoRa dosahuje citlivost -136 dB a odolnost vůči rušení -16 dB, na přímou viditelnost je možný přenos až na 40 km, v městské zástavbě okolo 2 km. [24][25]

LoRaWAN

LoRaWAN popisuje LPWAN (Low Power Wide Area Network) komunikační protokol a síťovou architekturu systému určenou pro IoT aplikace. Podobně jako u technologie Sigfox je systém komunikace: zařízení - gateway - server. Mezi gateway a serverem probíhá standardní IP připojení. Protokol LoRaWAN zajišťuje zabezpečený přenos dat mezi koncovými zařízeními a aplikací běžící na internetu. Každý koncový bod má přidělený jedinečný 64-bitový identifikátor a dva 128-bitové klíče, kterými jsou data pomocí AES zašifrována. Jeden klíč se používá v rámci sítě, to aby mohlo stejné území pokrývat více sítí, druhý k zabezpečení dat mezi sítí a uživatelskou aplikací. V České republice technologii LoRaWAN provozují České Radiokomunikace.[24][25][26]



Obrázek 1.6: Architektura LoRaWAN [26]

NB-IoT

Narrow Band IoT je standard bezdrátové telekomunikační technologie, kterou vyvinul mezinárodní normalizační orgán 3GPP, jenž je odpovědný za všechny hlavní mobilní telekomunikační standardy, jako je například 4G LTE nebo 5G NR. NB-IoT využívá bezdrátové spektrum pod 6 GHz stejně jako 4G LTE, ale byl navržen tak, aby splňoval požadavky pro IoT aplikace, jako je cena, nízká spotřeba, vzdálenost. Zprávy z modulu jsou zachyceny pomocí gateway, která je poté zasílá na server. Oproti komunikacím Sigfox a LoRa umožňuje NB-IoT vyšší komunikační rychlost, zároveň je s tím spojena i vyšší spotřeba. V České republice za touto sítí stojí mobilní operátoři. Komerčně ji zatím provozuje pouze mobilní operátor Vodafone. [27]

RFox2

S nástupem nové řady Foxtrot 2, firma Teco a.s. zinovovala i svoji řadu radio-
vých modulů. RFox2 je bezdrátová radiová sběrnice, která je provozována v souladu
se všeobecným oprávněním pro využívání rádiových kmitočtů a provozování zařízení
krátkého dosahu v bezlicenčním rádiovém pásmu 868 MHz. Pro její provozování není
potřeba žádné další povolení. Maximální rychlost komunikace po radiové sběrnici
je 50 kbps. [28]

1.5 Tecomat Foxtrot

Tecomat Foxtrot je kompaktní modulární řídicí a regulační systém s montáží do roz-
vaděčů a rozvodnic na DIN lištu. Systém disponuje vyspělou komunikací a je možné
připojit inteligentní elektroinstalační prvky a periferie. Pro připojení rozšiřujících
modulů je využívána TCL2 sběrnice, pomocí které je možné systém rozšířit o jed-
notku Master pro komunikaci po CIB sběrnici nebo pro bezdrátovou komunikaci
s moduly řady RFox resp. RFox2. Stejně jako u CFox a RFox modulů je možné
pomocí TCL2 sběrnice rozšířit modul o další vstupy a výstupy systému.

Nejrozšířenější možností připojení inteligentních elektroinstalačních prvků a pe-
riferií je pomocí CIB sběrnice. Sběrnice využívá dva vodiče, které zároveň zajišťují
napájení připojených modulů a obousměrnou komunikaci. Tyto moduly jsou k dis-
pozici pro instalaci na DIN lištu do rozvaděčů a rozvodnic, jako nástěnné interiérové
ovladače a senzory v designech nejvýznamnějších výrobců, vestavěné moduly do in-
stalačních krabic i venkovní moduly s krytím IP65. Pro komunikaci s jednotkami
od jiných výrobců je možné u systému Tecomat Foxtrot využít komunikaci pomocí
protokolů CAN, Modbus, Ethernet, Profibus.

Systém Tecomat Foxtrot nachází své uplatnění v technickém zařízení budov,
kde zajišťuje řízení vytápění, klimatizační jednotky, měření a řízení spotřeby energií,
integraci bezpečnostních prvků nebo v řízení průmyslových procesů či ve strojíren-
ství.[29]



Obrázek 1.7: Centrální jednotka PLC Tecomat Foxtrot2 CP-2007 [30]

2 Praktická část

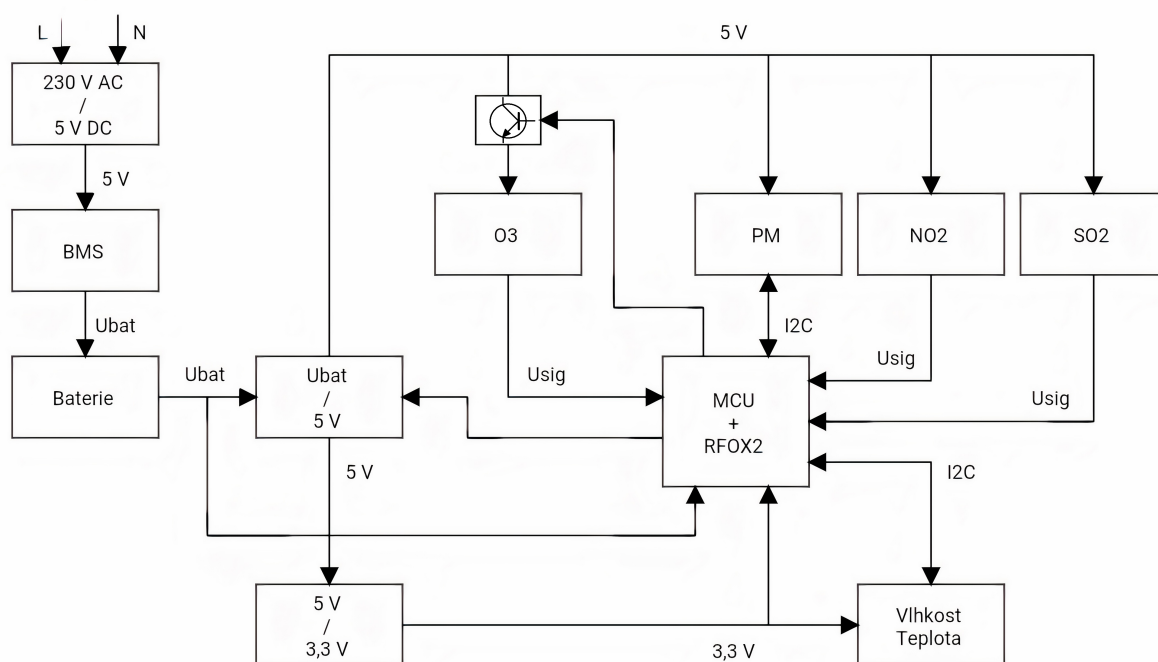
Cílem práce je návrh a realizace multisenzoru pro měření kvality ovzduší, umístěného na lampě veřejného osvětlení v radiačním krytu RK-7 2.1 od firmy Fiedler. Radiační kryt má ochránit senzor před zdrojem tepla, deštěm a zároveň umožnit dostatečné proudění vzduchu, a tím zajistit správnou funkci senzoru. Senzor bude napájen fázovým napětím, přivedeným z lampy veřejného osvětlení, to znamená, že je nutné zařídit provoz senzoru během dne, kdy je lampa odpojena. K tomuto účelu byl využit akumulátor, který bude v nočních hodinách nabíjen, aby následně v denních hodinách napájel senzor. Úkolem senzoru je provádění měření teploty, vlhkosti, koncentrace ozónu O_3 , koncentrace oxidu dusičitého NO_2 , koncentrace oxidu siřičitého SO_2 a prachových částic PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} . Naměřené hodnoty senzoru mají být následně posílány do centrální jednotky Foxtrot 2.



Obrázek 2.1: Radiační kryt RK-7 [31]

2.1 Hardware

Na obrázku 2.2 je zobrazeno blokové schéma realizovaného hardwaru. O napájení senzoru se stará napájecí zdroj, na který je přivedeno fázové napětí 230 V, a jeho výstupem je stejnosměrné 5 V napětí. Toto napětí je přivedeno na battery management system (BMS), který se stará o nabíjení Li-Ion článku, jenž se stará o napájení senzoru během odpojeného napájení. Napětí baterie je step-up měničem a stabilizačním zdrojem upraveno na napětí 5 V a 3,3 V pro napájení senzorů a integrovaných obvodů. Aby bylo možné zajistit během odpojeného napájení co nejmenší spotřebu, a tedy co nejdelší chod na baterii, je možné pomocí procesoru zakázat napájení všech periférií vypnutím step-up měniče. Napájecí větev 3,3 V je určena pro senzor teploty a vlhkosti SHT30, během napájení ze sítě se stará i o nabíjení procesoru s modulem pro komunikaci RFox2. Napájecí napětí 5 V je využíváno k napájení senzoru SPS30 pro měření prachových částic, pro senzor koncentrace O_3 a pro napájení operačních zesilovačů u senzorů koncentrace NO_2 a SO_2 . Jelikož dochází k velkému odběru proudu při napájení topného obvodu senzoru MQ131-LOW pro měření koncentrace O_3 , je tento obvod spínán tranzistorem, aby docházelo k jeho napájení jen po nezbytně nutnou dobu.



Obrázek 2.2: Blokové schéma

2.1.1 Teplota a vlhkost

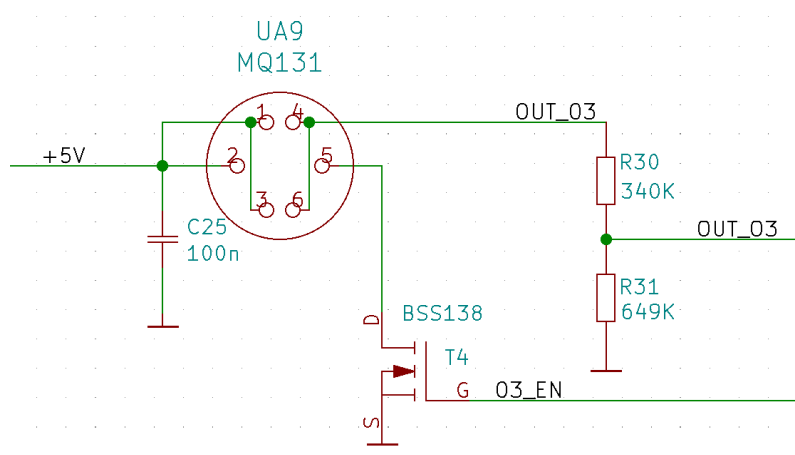
Pro měření teploty a vlhkosti je deska plošných spojů osazena senzorem SHT30, s rozsahem teploty -40 °C až 125 °C a vlhkosti 0 % až 100 % s přesností teploty $\pm 0,2$ °C a relativní vlhkosti ± 2 %. Senzor je napájen 3,3 V, měření teploty a vlhkosti je řízeno přes sběrnici I2C, pomocí které komunikuje senzor s procesorem. Větší přesnost měření teploty by byla dosažena použitím odporového senzoru PT1000, pro jeho využití ale nemá využitý procesor dostatečný počet analogových vstupů.

2.1.2 Prachové částice

K měření prachových částic byl vybrán senzor SPS30 vzhledem k jeho malým rozměrům a nutnosti umístění celého zařízení do krytu RK-7. Přesnost 10 % je stejná s ostatními senzory v podobné velikosti. Senzor je napájen 5 V, měření teploty a vlhkosti je řízeno přes sběrnici I2C, pomocí které komunikuje stejně jako senzor SHT30 s procesorem.

2.1.3 Ozón

Pro měření ozónu je použit senzor MQ131-LOW od firmy Winsen. Jedná se o polovodičový senzor, který jako citlivý materiál využívá WO_3 . S přítomností ozónu klesá vodivost senzoru v závislosti na koncentraci plynu. Senzor je zapojen do jednoduchého obvodu, který je na obrázku 2.3. Topné těleso je napájeno 5 V, pro snížení spotřeby je ošetřen obvod topného tělesa MOSFET tranzistorem, kterým je obvod spínán během provádění měření koncentrace plynu. K senzitivní části jsou do série připojeny zatěžové odpory tak, aby bylo možné snímat napěťový signál 0-3 V.

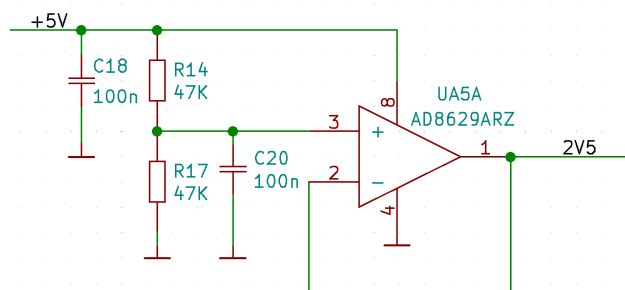


Obrázek 2.3: MQ131-LOW schéma

2.1.4 Oxid dusičitý, Oxid siřičitý

Pro měření koncentrace plynů NO_2 a SO_2 byly zvoleny senzory od firmy SGX Sensortech SGX-4NO2 a SGX-4SO2. Jedná se o elektrochemické senzory, které v závislosti na koncentraci cílového plynu generují proudový signál. Rozdíl mezi jednotlivými senzory je v polaritě generovaného proudu, zatímco senzor SGX-4SO2 generuje kladný proud, senzor SGX-4NO2 naopak záporný proud. Schéma zapojení senzoru SGX-4NO2 je zobrazeno na obrázku 2.5, pro senzor SGX-SO2 je schéma zapojení obdobné.

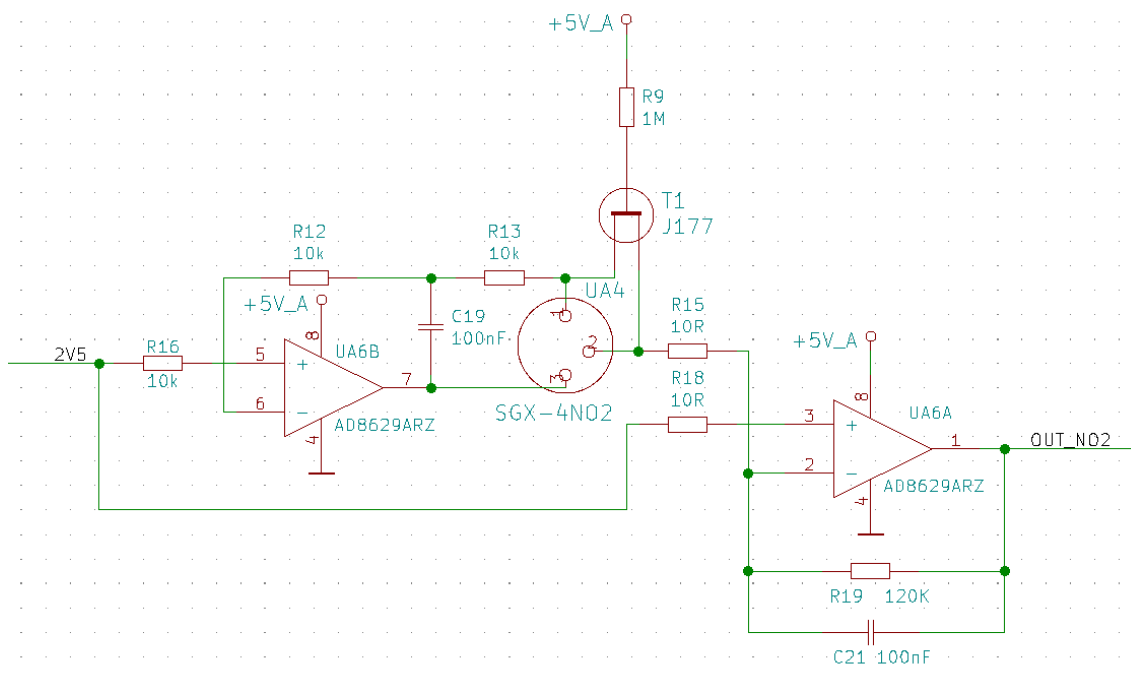
Vzhledem k nutnosti využití práce operačních zesilovačů bylo nutné vytvořit virtuální zem. Schéma zapojení tohoto obvodu je na obrázku 2.4. Výstup operačního zesilovače je poté přiveden na první z operačních zesilovačů obvodu. Tento operační zesilovač funguje jako obvod předpětí k udržení správného potenciálu mezi snímací a referenční elektrodou. V obou případech se jedná o udržení nulového potenciálu mezi elektrodami.



Obrázek 2.4: Virtuální zem

P kanálový FET tranzistor slouží v obvodu k udržení nulové odchylky mezi snímací a referenční elektrodou během vypnutého napájení. Podržení tohoto předpětí na 0 V během vypnutí umožňuje velmi rychlou stabilizaci senzoru při opětovném zapnutí napájení. Pokud by nebyl tranzistor použit, stabilizace senzoru po zapnutí napájení by mohla trvat několik hodin. Na doporučení výrobce byl pro obvod zvolen tranzistor J177.

Výstupní proud elektrochemického senzoru je nutné převést na napěťový signál, který bude poté možné AD převodníkem procesoru zpracovat. K tomuto účelu je určený druhý z operačních zesilovačů na obrázku 2.5. Na invertující vstup zesilovače je přiveden proudový signál ze senzoru přes zatěžovací rezistor, který zde plní funkci RC vyhlazování s vlastní kapacitou senzoru. Podle citlivosti senzoru byla pak vypočtena hodnota rezistoru pro zpětnou vazbu zesilovače. Paralelně s ním byl do obvodu doplněn kondenzátor pro snížení šumu na výstupu.

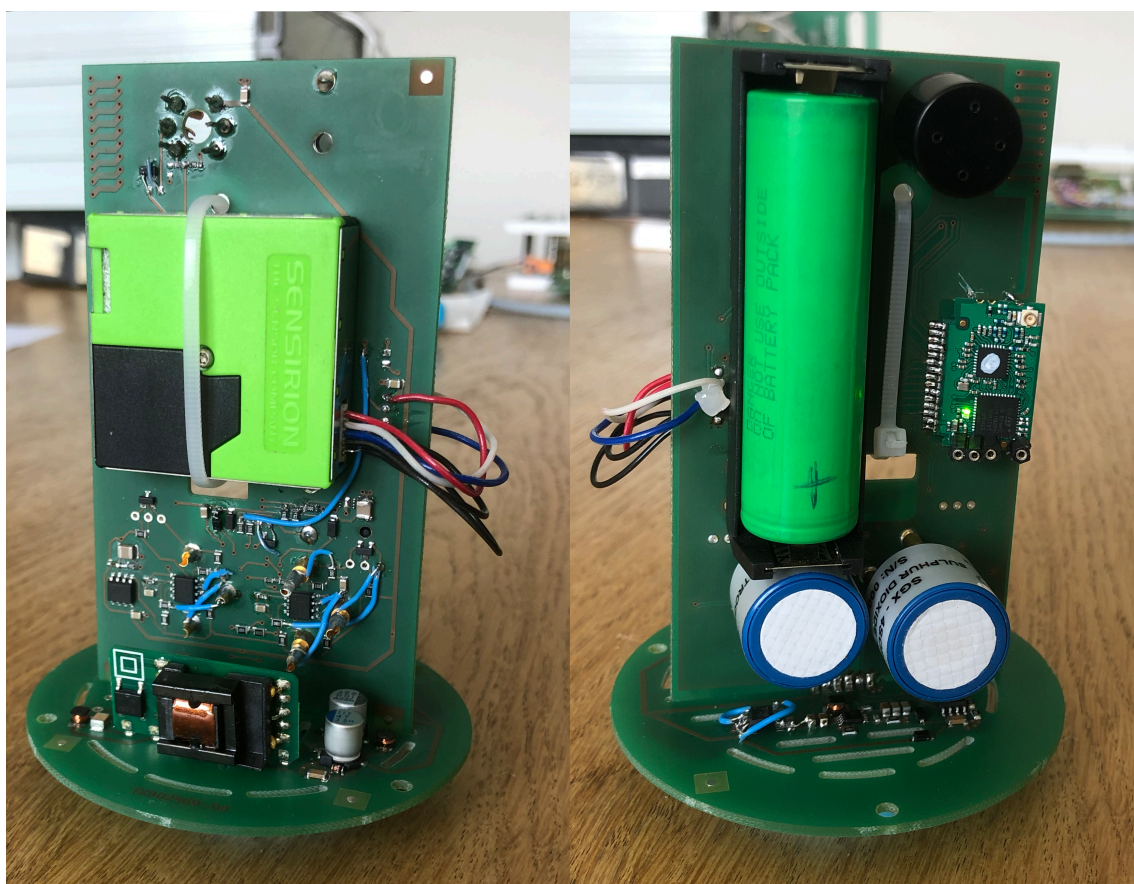


Obrázek 2.5: Schéma zapojení senzoru SGX-4NO2

2.1.5 Návrh desky plošného spoje

Vzhledem k umístění zařízení do radiačního krytu RK-7 viz obrázek 2.1, který je navržen pro ochranu snímačů teploty a relativní vlhkosti vzduchu před působením sálavého tepelného záření a deště, bylo nutné správně rozvrhnout rozložení senzorů tak, aby bylo možné umístit zařízení do krytu. Vnitřní část krytu tvoří válec o výšce 130 mm a průměru podstavy 65 mm. V závislosti na těchto rozměrech byly rozměry desky plošného spoje zvoleny 110 mm x 60 mm. Pro ukotvení desky bylo zařízení doplněno o druhou desku, která je upevněna zespodu ke šroubům krytu a zároveň je spojena s první deskou a slouží tak k upevnění první desky plošného spoje.

Kvůli velikostem senzorů, držáku baterky a zdroje stejnosměrného napětí bylo nutné využít k osazení obě desky. Spodní kruhová deska je osazena napěťovými zdroji. Zespodu je zde přivedeno přes konektor fázové napětí, které je poté přeměněno na 5 V a 3,3 V napájení. Pro co nejlepší zachování průchodu vzduchu byly do desky vyfrézovány drážky. Sensory jednotlivých veličin jsou umístěny na vertikální obdélníkové desce společně s držákem baterky.



Obrázek 2.6: Hardware multisenzoru

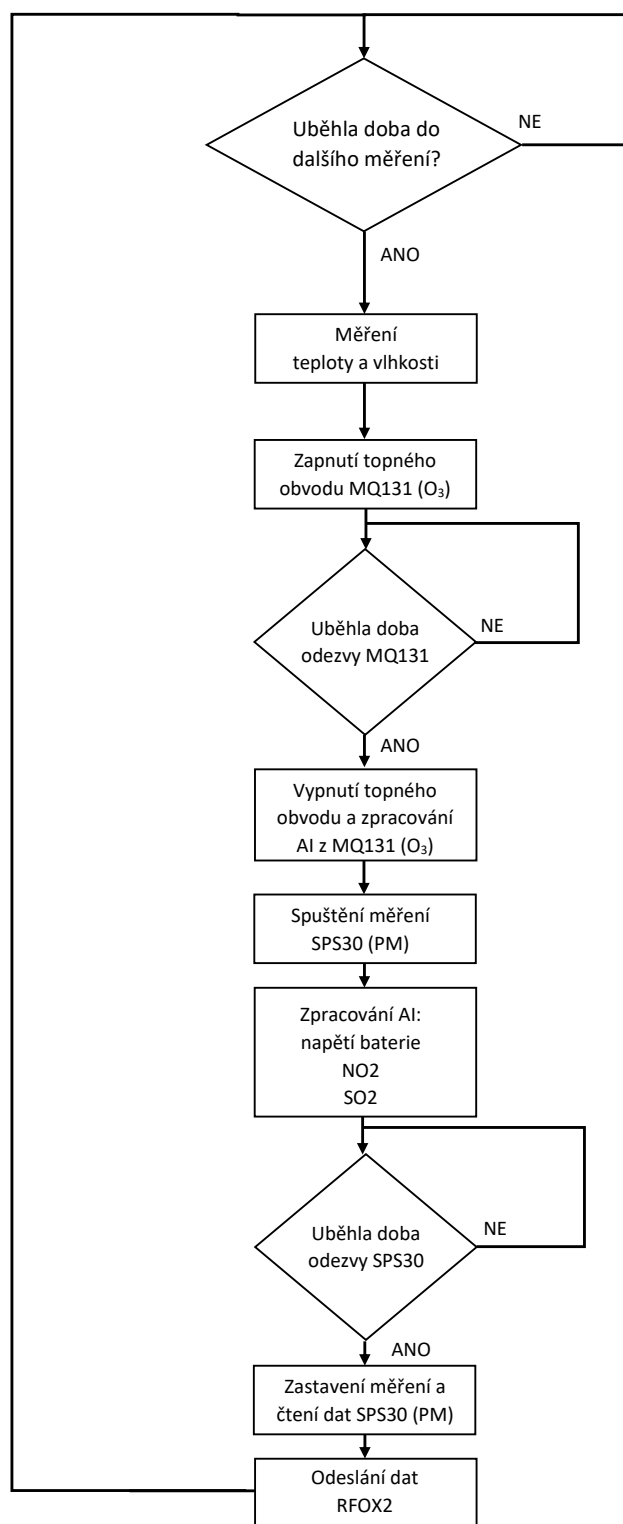
2.2 Software

O řízení celého mutlisenzoru se stará modulární deska firmy Teco a.s., která je osazena procesorem od firmy STmicroelectronic řady STM32L. Pro programování tohoto procesoru bylo využito vývojové prostředí STM32CubeIDE. Jedná se o all-in-one vývojový nástroj, založený na vývojovém prostředí Eclipse, který slouží jako pokročilá C/C++ vývojová platforma s periferními konfiguracemi, kompilací kódu a ladícími funkcemi pro mikrokontroléry a mikroprocesory rodiny STM32. Cílem softwaru je komunikace se senzory SHT30 pro měření vlhkosti s teplotou a SPS30 pro měření prachových částic po I2C sběrnici, zpracování analogových signálů od senzorů MQ131-LOW, SGX-4NO₂ a SGX-4SO₂, sloužících k měření koncentrace plynů O₃, NO₂, SO₂, a následné odeslání zpracovaných dat do řídicí jednotky Tecomat Foxtrot pomocí bezdrátové sběrnice RFox2.

2.2.1 Měřicí cyklus

Jelikož je senzor během dne, kdy není lampa veřejného osvětlení aktivní, napájen z baterie, je nutné snížit spotřebu senzoru na co nejnižší úroveň. Z tohoto důvodu je měření senzoru prováděno jednou za určitý časový úsek, který je zvolen uživatelem. Naměřená data jsou poté ihned po dokončení měření odeslána do centrální jednotky. Po odeslání dat je následně zařízení převedeno do klidového režimu, kdy jsou kromě mikroprocesoru všechny obvody odpojeny od napájení pro zachování minimální spotřeby. Algoritmus cyklu měření je znázorněn na 2.7.

Cyklus měření začíná jednorázovým měřením teploty a vlhkosti pomocí senzoru SHT30. Dalším krokem je spuštění zahřívacího tělesa senzoru MQ131-LOW, po jehož spuštění je nutné vyčkat, než budeme provádět měření. Po uběhnutí doby odezvy je změřena analogová hodnota signálu, následně je tato hodnota převedena na koncentraci O₃ v jednotkách ppb. Vzhledem ke zvýšenému odběru během sepnutého zahřívacího obvodu probíhá tato část samostatně. Po měření koncentrace O₃ dochází k zapnutí měření (spuštění větráčku) prachových částic. Stejně jako u senzoru MQ131 je i u senzoru SPS30 nutné vyčkat, než budeme moci provádět měření hodnot. Během čekání na data ze senzoru SPS30 je prováděno měření napětí baterie a analogových signálů senzorů SGX-4NO₂ a SGX-4SO₂ a následně proveden převod signálů na koncentrace plynů NO₂ a SO₂. Po uplynutí doby doporučené výrobcem od zapnutí měření prachových částic, dochází k načtení naměřených hodnot ze senzoru SPS30 a odeslání všech naměřených hodnot do centrální řídicí jednotky. Následně senzor přechází do klidového stavu a čeká na uběhnutí zadané doby, kdy opět zopakuje měřicí cyklus.



Obrázek 2.7: Algoritmus pro měření

Teplota, Vlhkost

Pro měření teploty a vlhkosti byl u senzoru SHT30 zvolen režim single shot. V tomto režimu je pomocí příkazu spuštěno pořízení jednoho datového páru. Jeden datový pár se skládá ze 16bitových hodnot teploty a vlhkosti. Při odesílání naměřených dat jsou jednotlivé hodnoty následovány kontrolním součtem CRC. Odeslaná 16bitová data jsou linearizovaná a je u nich provedena kompenzace napájecího napětí, jedná se ale o formát unsigned integer (celé číslo bez znaménka). Je tedy nutné tyto hodnoty převést na reálné hodnoty vlhkosti a teploty přes vzorce, které jsou uvedeny v datasheetu senzoru.

$$RH = 100 \frac{S}{2^{16} - 1} \quad [\%] \quad (2.1)$$

$$T = -45 + 175 \frac{S}{2^{16} - 1} \quad [^{\circ}C] \quad (2.2)$$

Ozón

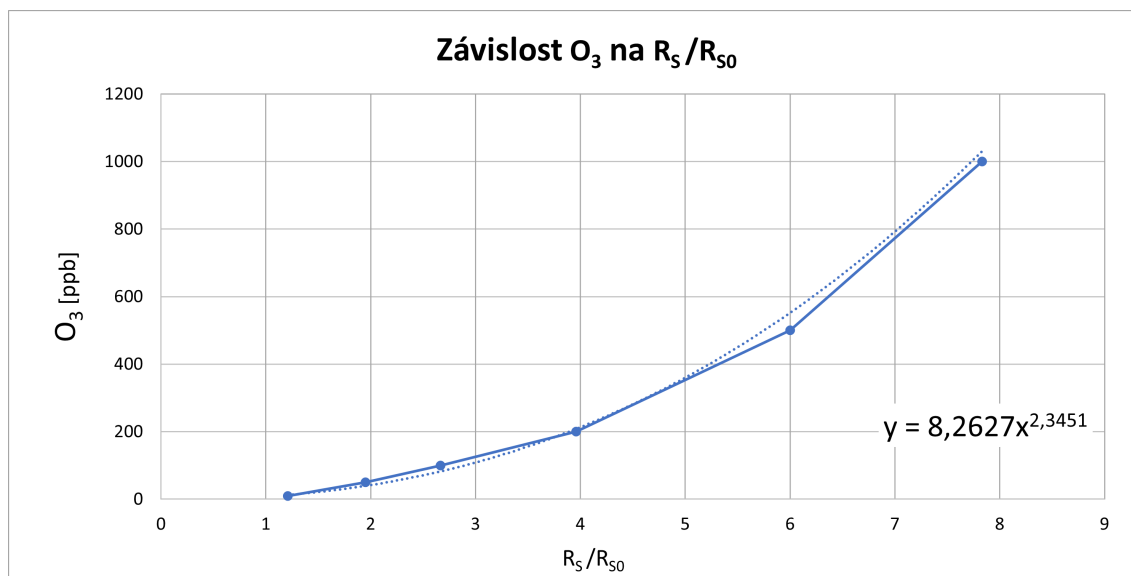
Získání koncentrace ozónu je prováděno pomocí měření napětí na zátěžovém rezistoru, který je zapojen v sérii se senzitivní částí senzoru. Vycházením ze vzorce napětového děliče je možné vypočítat z naměřené hodnoty napětí vnitřní odpor senzoru. Naměřená hodnota je poté porovnána s kalibrační hodnotou odporu, která je naměřena v prostředí s čistým vzduchem. Poměr těchto dvou hodnot odporů je pak vynásoben koeficientem, který je vypočten z rovnic trendu pro teplotu při konstantní hodnotě vlhkosti. Tyto rovnice byly získány z poskytnutých naměřených dat výrobcem na základě vlhkosti a teploty prostředí. Vhodná rovnice trendu 2.3 2.4 2.5 je vybrána na základě naměřené hodnoty vlhkosti. Jelikož není závislost odporu senzoru na koncentraci O_3 lineární, je následný výsledek dosazen do mocninné rovnice trendu, která jako u rovnice trendu teploty pro různé vlhkosti byla získána z dostupných naměřených dat od výrobce. 2.6 je výsledná rovnice pro výpočet koncentrace ozónu.

$$k1 = -0,0139 T + 1,5581 \quad RH = 30\% \quad (2.3)$$

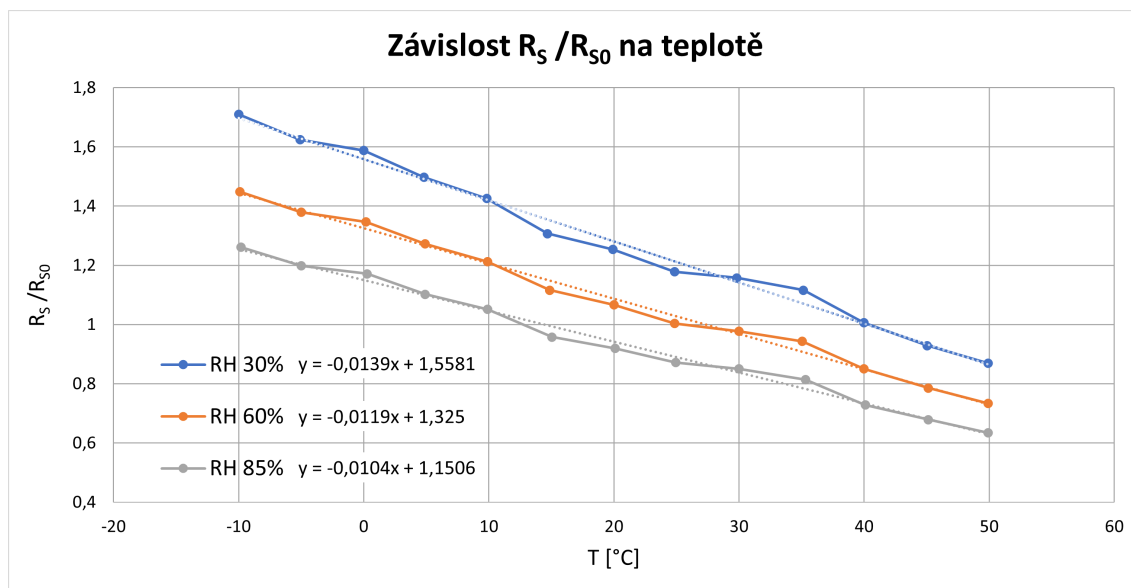
$$k2 = -0,0119 T + 1,325 \quad RH = 60\% \quad (2.4)$$

$$k3 = -0,0104 T + 1,1506 \quad RH = 85\% \quad (2.5)$$

$$O_3 = 8,2627 \left(\frac{R_s}{R_{s0} k_i} \right)^{2,3451} \quad [ppb] \quad (2.6)$$



Obrázek 2.8: Závislost MQ131-LOW O_3 na odporu



Obrázek 2.9: Závislost MQ131-LOW odporu na teplotě

Prachové částice

Měření prachových částic je prováděno pomocí senzoru SPS30, který je řízen příkazy přes sběrnici I2C. Senzor má tři režimy činnosti, spací režim pro nízkou spotřebu během nečinnosti, režim nečinnosti, který slouží k přechodu mezi režimem spánku a posledním režimem měření. Nastavením senzoru do režimu měření je spuštěn větrák senzoru a po uplynutí doby ustálení 30 s je možné provést čtení naměřených dat. Po provedeném měření je senzor převeden do režimu nečinnosti. Vzhledem k využití řízeného zdroje napájení pomocí procesoru není spací režim senzoru využíván, neprovádí-li senzor měření, není napájen.

Oxid dusičitý, Oxid siřičitý

Generované proudové signály I senzorů NO_2 a SO_2 jsou pomocí převodníků proudu na napětí převedeny na napěťový signál U. Tento napěťový signál je změřen pomocí AD převodníku v procesoru a pomocí vzorce 2.9, který vychází ze vzorců 2.7 a 2.8, přepočítán na hodnotu koncentrace plynů.

$$U = -I \cdot R \quad [V] \quad (2.7)$$

$$SO_2 = \frac{I}{I_{1ppm}} \quad [ppm] \quad (2.8)$$

$$SO_2 = -\frac{U}{\overline{R}} \quad [ppm] \quad (2.9)$$

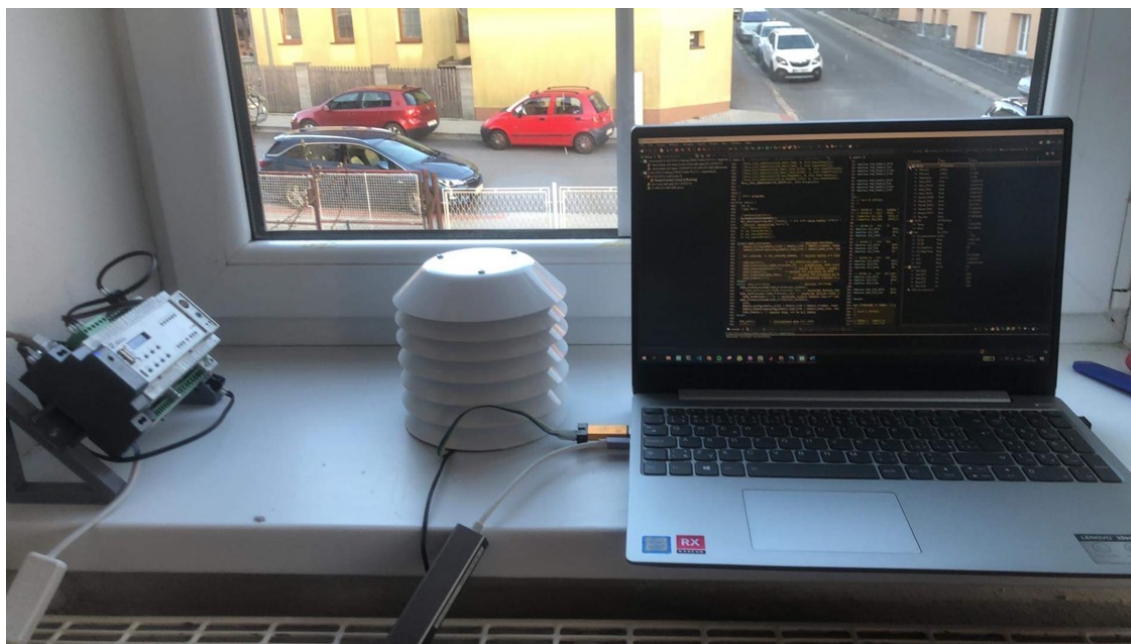
2.2.2 Komunikace

Jelikož senzor má za úkol zasílat naměřená data centrální jednotce Tecomat Foxtrot, byla zvolena pro komunikaci mezi centrální jednotkou a senzorem interní bezdrátová sběrnice RFox2.

Aby bylo možné komunikovat s centrální jednotkou pomocí sběrnice RFox2, je nutné vytvořit descriptor modulu. Tento soubor popisuje centrální jednotku modul, s kterým bude komunikovat, a definuje možnosti konfigurace uživatele v prostředí Mosaic viz obrázek 2.12. V ní uživatel nastavuje parametry sběrnice, periodu měření a adresu modulu. V descriptoru jsou popsána inicializační data, která jsou posílána na začátku komunikace a slouží k nastavení modulu a centrální jednotky pro správnou komunikaci. Zároveň jsou zde popsána data, která jsou posílána mezi modulem a centrální jednotkou.

2.3 Testování

Po sestavení senzoru došlo k jeho oživení a testování funkcí 2.10. Byla zrealizována komunikace senzoru s centrální jednotkou. Ověřena funkčnost senzoru při napájení z Li-Ion článku a také ověřena funkčnost integrovaných obvodů pro řízení článku, jako je ochrana před přebitím nebo podbitím článku. Následně bylo provedeno měření spotřeby během měřicího cyklu a ověřena doba funkčnosti senzoru bez napájení ze sítě. Měření bylo provedeno multimetrem UNI-T UT50C, naměřené hodnoty spotřeby jsou uvedeny v tabulce 2.1.



Obrázek 2.10: Ožívování senzoru

Pro testování doby fungování senzoru s napájením z Li-Ion článku byl použit článek VTC6 od firmy SONY, s uváděnou kapacitou článku 3000 mAh. Během jednoho měřicího cyklu byla doba měření u senzoru SPS30 pro PM částice 30 sekund a doba nabití senzoru MQ131-LOW 60 sekund. Měřicí cykly byly prováděny v intervalu 10 minut. Senzor během této doby odeslal 158 zpráv a vydržel tak fungovat přes 26 hodin. Při umístění senzoru k sloupu veřejného osvětlení a jeho napájení z fáze určené pro lampu by nastala nejdelší doba pro fungování z článku po dobu 17 hodin, která odpovídá nejdelšímu dni v roce. Tato doba byla překročena a nemělo by během dne dojít k vybití senzoru.

Tabulka 2.1: Spotřeba senzoru

Režim	Spotřeba	Čas (1 cyklus)
Stand-by	$22,0 \pm 0,4mA$	510 s
Měření O_3 (MQ-131)	$155,2 \pm 2,4mA$	60 s
Měření PM (SPS30)	$78,8 \pm 1,3mA$	30 s

2.3.1 Testovací program

Pro účely testování byl vytvořen v prostředí Mosaic program pro centrální řídicí jednotku CP-2005. Tento program zprostředkovává komunikaci se senzorem a naměřená data zobrazuje zásluhou prostředí Webmaker na serveru a zároveň zapisuje naměřená data na SD kartu vloženou v řídicí jednotce. Uživatel po zadání IP adresy má přístup k aktuálně naměřeným datům, zároveň jsou vykresleny grafy naměřených hodnot. Naměřené hodnoty koncentrace plynů jsou uživateli zobrazovány v jednotkách ppb a ppm, v kterých probíhá měření. Současně jsou naměřené hodnoty přepočteny na hodnoty v jednotkách $\mu g/m^3$, v kterých udávají naměřené hodnoty automatizované stanice českého hydrometeorologického ústavu. Převod z jednotek ppb na $\mu g/m^3$ je proveden pomocí rovnice 2.10, která zobrazuje výpočet pro ozon, kde M je molekulární hmotnost plynu a T je teplota ve stupních Celsia. Pro plyny SO_2 a NO_2 je rovnice stejná, pouze se mění hodnota molekulární hmotnosti v závislosti na měřeném plynu.

$$O_3[\mu g/m^3] = \frac{O_3[ppb] * 12.187 * M}{273.15 + T} \quad [32] \quad (2.10)$$

Nastavení senzoru v prostředí Mosaic

V prostředí Mosaic je pro nastavování konfigurace využíván nástroj I/O Configurator. Při přidávání senzoru do konfigurace se zobrazí uživateli okno konfigurace senzoru 2.12. V tomto okně uživatel nastavuje adresu modulu, pozici na rámu, periodu vysílání, skupinu a routování. Konfiguraci uživatel dokončí stisknutím tlačítka Uložit.

R-AQ-0101X-A

Datum a čas

RSSI

Pocet zpráv

Napětí baterie

Zápis dat Povoleno

Název Souboru

SHT30

Teplota °C

Vlhkost %

SPS30

PM1 µg/m3

PM2.5 µg/m3

PM4 µg/m3

PM10 µg/m3

Velikost µm

Plyny

O3 ppb

NO2 µg/m3

NO2 ppb

NO2 µg/m3

SO2 ppb

SO2 µg/m3

Obrázek 2.11: Webová stránka s naměřenými daty

Konfigurace
— □ ×

R-AQ-0101X-A

RFox2 periferní modul -
Multisenzor kvality vzduchu

Prodejce

Produktová řada

Číslo produktu

Objednací číslo

☒ Modul povolen HW adresa:

BusID 16#40

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

Vlastnosti Procesní data

:: **Nastavení**

- Perioda vysílání stavových dat [s]	600
+ Zařadit do skupiny	
+ Routování	

Uložit

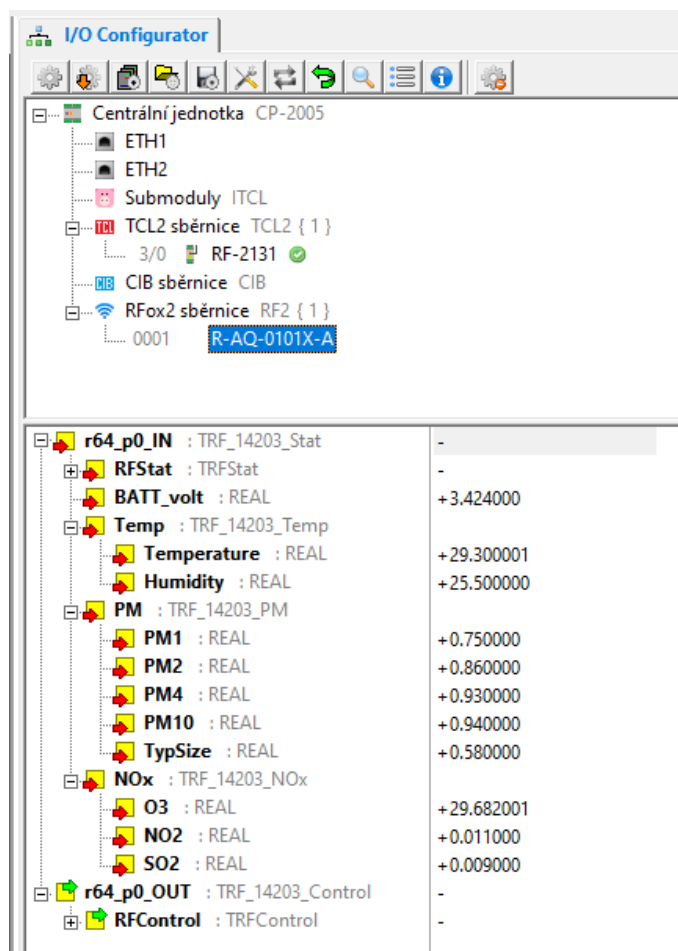
Nápověda

Zrušit

Obrázek 2.12: Konfigurace multisenzoru

Po dokončení konfigurace se v okně I/O Configurator zobrazí uživateli ikona senzoru. Po kliknutí na ikonu se uživateli zobrazí okno s přijatými daty, které je možné vidět na obrázku 2.13. Data jsou rozdělena do sekcí RFStat, Temp, PM a NOx.

- **RFStat:** Stavová data sběrnice, uživatel zde nalezne informace o síle přijatého signálu, času poslední přijaté zprávy, indikaci přijaté zprávy atd.
- **BATT_volt:** Hodnota napětí Li-Ion baterie [V].
- **Temp:** Naměřená hodnota teploty [°C] a vlhkosti [%].
- **PM:** Naměřené koncentrace prachových částic [$\mu g/m^3$], typická velikost částic [μm].
- **NOx:** Naměřené koncentrace plynů O₃ [ppb], NO₂ [ppm], SO₂ [ppm].



Obrázek 2.13: I/O Konfigurator

2.3.2 Ověření relevance dat

Po oživení senzoru bylo pro prvotní ověření funkčnosti provedeno testovací měření u automatizované stanice Českého hydrometeorologického ústavu 2.14. Stanice se nachází v Kutné Hoře na volném pozemku v zástavbě rodinných domů nedaleko centra města a měření provádí v jednohodinových intervalech. Naměřená data jsou zpracovávána klouzavým filtrem z dat naměřených během posledních třech hodin a zveřejněna na webu Českého hydrometeorologického ústavu.



Obrázek 2.14: Automatizovaná stanice Kutná Hora-Orebitská

Automatizovaná stanice provádí měření koncentrace NO_2 zařízením T200 od firmy Teledyne, které pro měření využívá chemiluminiscenci, snímání záření, vznikajícího při chemické reakci. Pro měření prachových částic je používáno zařízení MP101M od firmy Envea, které pracuje na principu absorpce beta záření. U koncentrace O_3 jsou data získávána pomocí modelování. Měření koncentrace NO_x je prováděno s přesností 0,5 %, zařízení MP1001M pro měření PM měří s přesností $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Senzor byl umístěn na lampu veřejného osvětlení v blízkosti měřicí stanice do výšky asi dvou metrů, obrázek 2.15 vlevo. Ke čtení dat naměřených senzorem byla použita řídicí jednotka Tecomat Foxtrot 2005 s jednokanálovým externím masterem sítě RFox2 RF-2131-A, který komunikuje s centrální jednotkou pomocí sběrnice TCL2. Celá tato soustava byla během měření napájena z olověných akumulátorů na obrázku 2.15 vpravo.



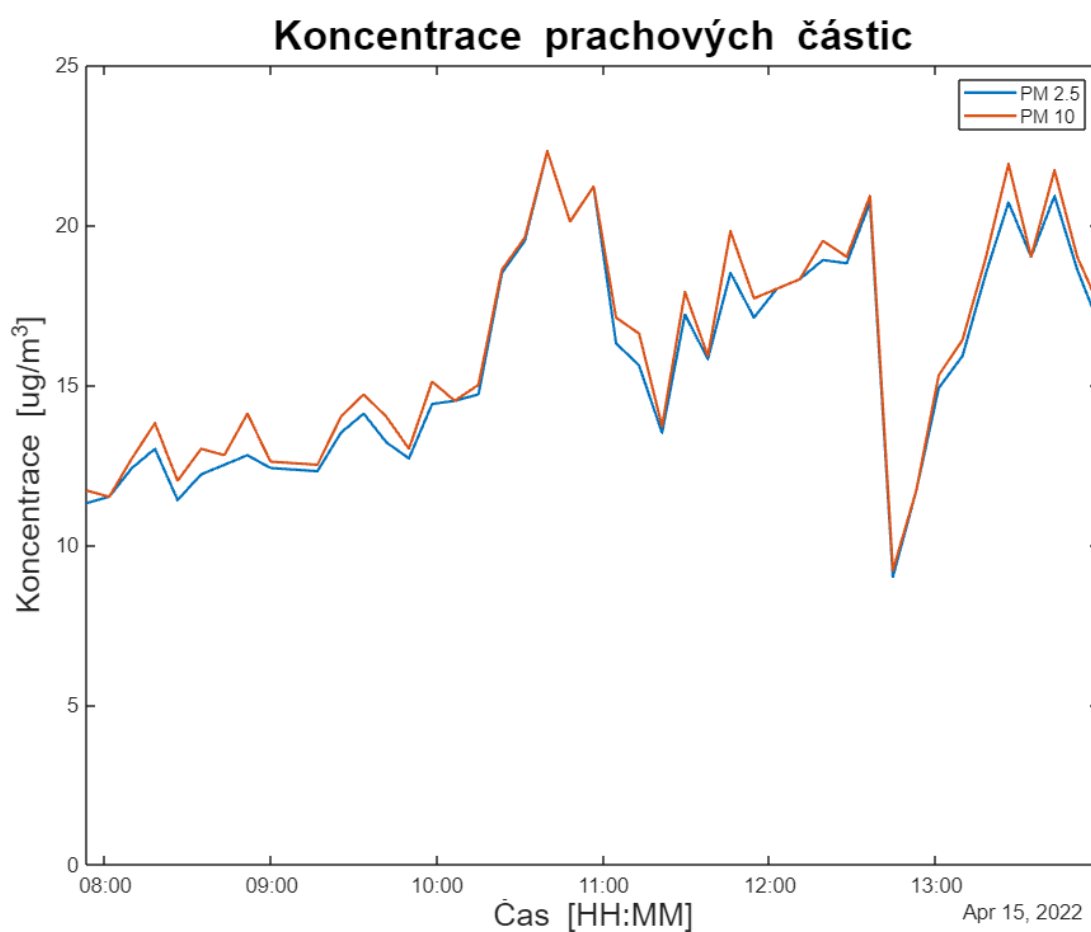
Obrázek 2.15: Senzor kvality ovzduší a centrální jednotka CP2005

V další části práce jsou zobrazeny a okomentovány naměřené hodnoty zhotoveného senzoru a automatizované stanice. Při porovnání dat je nutné brát zřetel na skutečnost, že se jedná o prvotní ověření funkčnosti senzoru. Pro dosažení kvalitnějších výsledků ověření přesnosti měření je nutné provést testovací měření v uzavřené komoře, kde bude dosaženo stejných podmínek jak pro zhotovený senzor, tak i pro referenční snímač. Tento způsob ověření nebyl cílem práce a z časového důvodu nebylo možné testování provést. Jedná se však o další krok, který je nutné před komerčním použitím provést.

Prachové částice

Z naměřených dat senzoru prachových částic 2.16 lze vyčíst mírně rostoucí trend prachových částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} . Rostoucí trend odpovídá naměřeným datům $PM_{2,5}$ u automatické stanice 2.2. Rozdíly naměřených dat se v absolutních hodnotách pohybovaly v rozmezí 2 až $3 \mu g/m^3$. Tato hodnota odpovídá chybě měření automatizované stanice.

U naměřených hodnot částic PM_{10} automatizovanou stanicí dochází ke stagnaci a dokonce jsou naměřené hodnoty PM_{10} nižší než $PM_{2,5}$, i když částice $PM_{2,5}$ jsou podmnožinou částic PM_{10} . Tato skutečnost je způsobena měřením jednotlivých velikostí částic dvěma různými přístroji a jejich nejistotou měření. Naměřené hodnoty částic PM_{10} se liší v absolutních hodnotách až o $9,14 \mu m^3$, relativní odchylka je až 110 %.



Obrázek 2.16: Graf naměřených hodnot částic $PM_{2,5}$ a PM_{10}

Tabulka 2.2: Naměřené hodnoty $PM_{2,5}$

Čas	Senzor $PM_{2,5}$	Meteo $PM_{2,5}$	$\Delta PM_{2,5}$	$\Delta PM_{2,5}$
8:00 - 11:00	14,77 $\mu g/m^3$	12,7 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	2,07 $\mu g/m^3$	16.3 %
9:00 - 12:00	16,11 $\mu g/m^3$	14,0 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	2,11 $\mu g/m^3$	14.4 %
10:00 - 13:00	17,15 $\mu g/m^3$	14,3 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	2,85 $\mu g/m^3$	20 %
11:00 - 14:00	16,97 $\mu g/m^3$	14,3 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	2,67 $\mu g/m^3$	18.67 %

Tabulka 2.3: Naměřené hodnoty PM_{10}

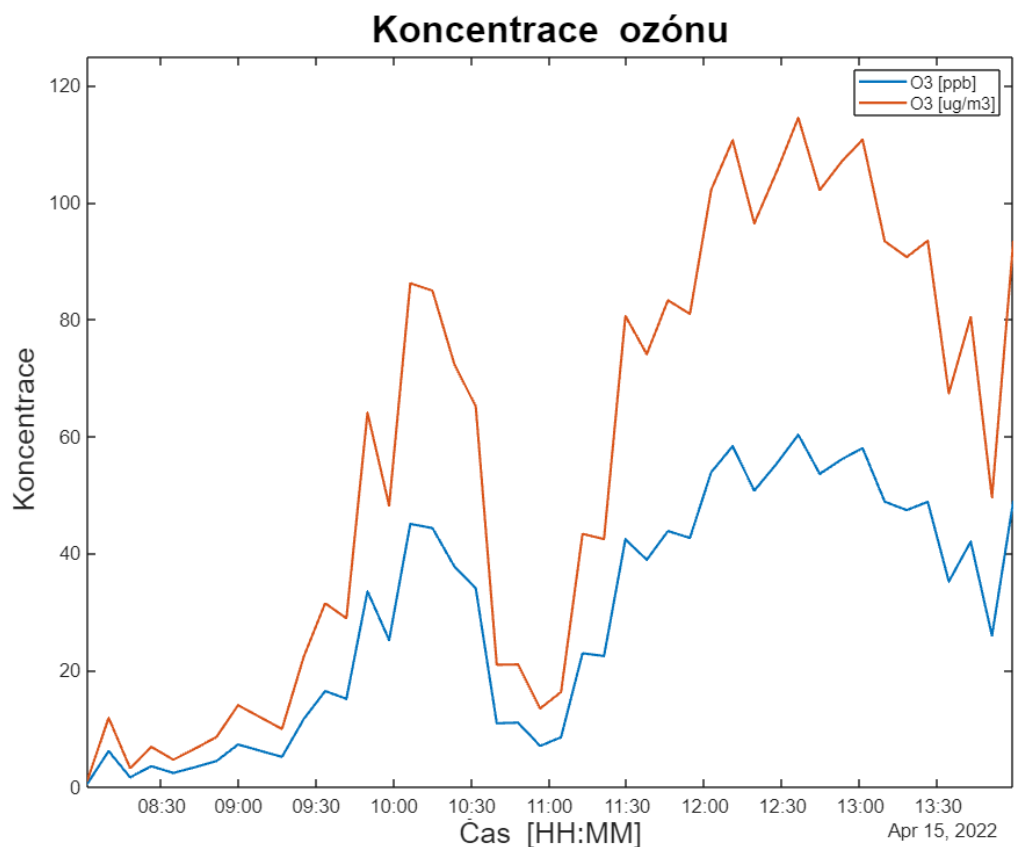
Čas	Senzor PM_{10}	Meteo PM_{10}	ΔPM_{10}	ΔPM_{10}
8:00 - 11:00	15,15 $\mu g/m^3$	9,0 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	6,15 $\mu g/m^3$	68,3 %
9:00 - 12:00	16,53 $\mu g/m^3$	9,3 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	7,23 $\mu g/m^3$	77,7%
10:00 - 13:00	17,45 $\mu g/m^3$	9,0 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	8,45 $\mu g/m^3$	93,9 %
11:00 - 14:00	17,44 $\mu g/m^3$	8,3 $\pm$ 3 $\mu g/m^3$	9,14 $\mu g/m^3$	110,1 %

Ozón

Graf 2.17 ukazuje naměřené koncentrace O_3 polovodičovým senzorem MQ-131. Z naměřených hodnot jsou vidět změny koncentrace O_3 v závislosti na počasí, v 10 hodin slunečno, v 11 hodin mrholení, ve 12 hodin opět slunečno. Výsledné naměřené tříhodinové hodnoty koncentrace ale neodpovídají hodnotám automatizované stanice. Tříhodinové průměry jsou porovnány v tabulce 2.4. Nepřesnost měření může být způsobena značnou závislostí senzoru na teplotě a vlhkosti. Z dostupných dat od výrobce byly vytvořeny pouze tři rovnice trendu pro tři různé hodnoty relativní vlhkosti. Vyšší počet naměřených závislostí by měl pomoci k větší přesnosti měření. Vliv na nepřesnost měření má i citlivost senzoru na jiné plyny a to zejména na oxid dusičitý NO_2 , nežli pouze na O_3 . Tyto plyny mohly značně ovlivnit měření.

Tabulka 2.4: Naměřené hodnoty O_3

Čas	Senzor O_3	Meteo O_3	ΔO_3	ΔO_3
8:00 - 11:00	31,10 $\mu g/m^3$	59,4 $\mu g/m^3$	28,3 $\mu g/m^3$	47,6 %
9:00 - 12:00	48,76 $\mu g/m^3$	66,7 $\mu g/m^3$	17,94 $\mu g/m^3$	26,9 %
10:00 - 13:00	72,52 $\mu g/m^3$	69,5 $\mu g/m^3$	3,02 $\mu g/m^3$	5 %
11:00 - 14:00	83,48 $\mu g/m^3$	69,1 $\mu g/m^3$	14,38 $\mu g/m^3$	20,1 %



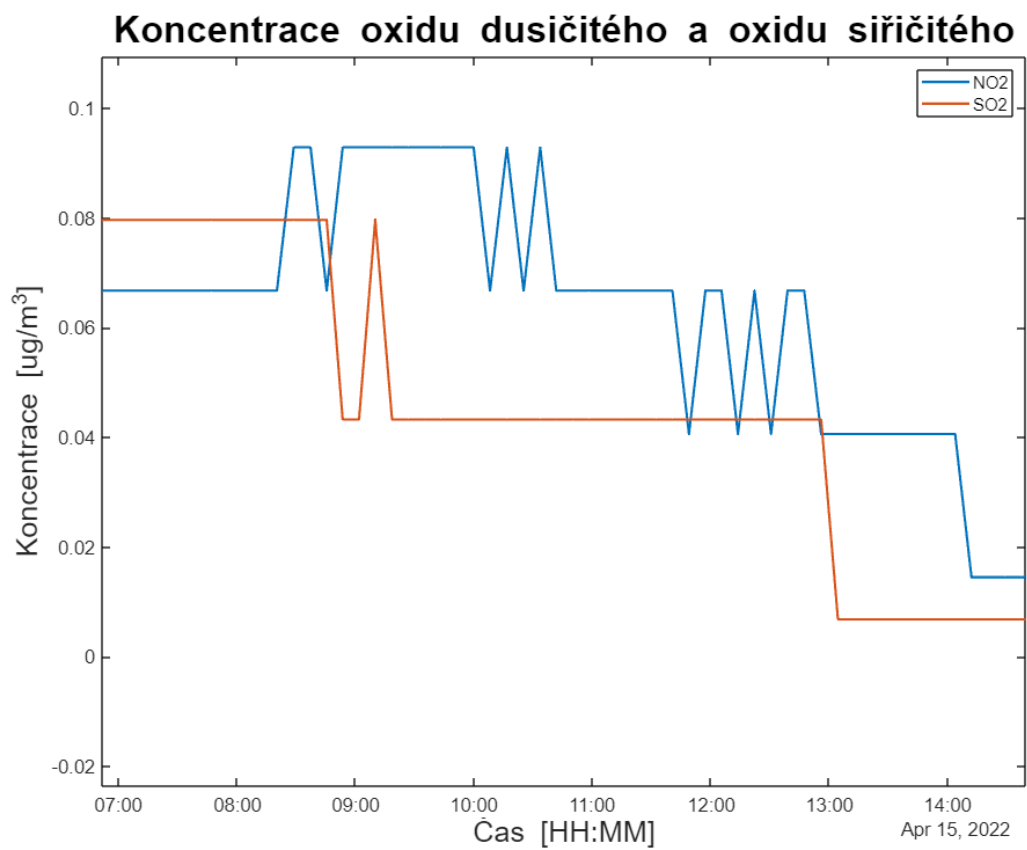
Obrázek 2.17: Graf naměřených hodnot koncentrace O_3

Oxid dusičitý a Oxid siřičitý

Měření koncentrací plynů NO_2 a SO_2 bylo prováděno elektrochemickými senzory určenými primárně na měření koncentrací v řádu ppm. Na trhu se aktuálně neobjevují dostupné senzory, které by byly schopny měření nižších koncentrací. I přes snahu pokusit se pomocí ladění převodníku proudu na napětí, dosáhnout měření v jednotkách ppb, byla naměřená data ze senzorů velmi nepřesná. Naměřené hodnoty senzorem jsou zobrazeny v grafu 2.18. Tříhodinové průměry jsou porovnány v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5: Naměřené hodnoty SO_2 a NO_2

Čas	Senzor SO_2	Senzor NO_2	Meteo NO_2	ΔNO_2
8:00 - 11:00	55,2 $\mu g/m^3$	81,7 $\mu g/m^3$	5,4 $\mu g/m^3$	76.3 $\mu g/m^3$
9:00 - 12:00	44,7 $\mu g/m^3$	76,7 $\mu g/m^3$	5,4 $\mu g/m^3$	71.3 $\mu g/m^3$
10:00 - 13:00	43,2 $\mu g/m^3$	64,3 $\mu g/m^3$	5,4 $\mu g/m^3$	58.9 $\mu g/m^3$
11:00 - 14:00	31,1 $\mu g/m^3$	53,1 $\mu g/m^3$	5,9 $\mu g/m^3$	47.2 $\mu g/m^3$



Obrázek 2.18: Graf naměřených hodnot koncentrace O₃

Závěr

První část diplomové práce je teoretického rázu a čtenáře seznamuje s jednotlivými měřenými veličinami, které jsou sledovány za účelem zjišťování kvality ovzduší automatizovanými stanicemi Českého hydrometeorologického ústavu a s metodami měření těchto veličin, které jsou následně použity v praktické části práce. Současně je čtenář seznámen s dalšími tématy, která se týkají tvorby bezdrátového senzoru, jako jsou baterie a bezdrátové komunikace.

Druhá část je věnována praktické části. Teoretické znalosti z úvodní části jsou zde využity k vytvoření senzoru pro sledování kvality ovzduší malých rozměrů pro umístění do radiačního krytu RK-7 od firmy Fiedler. Senzor komunikuje s centrální jednotkou CP2005 přes bezdrátovou sběrnici RFOX2 v předem definovaných intervalech uživatelem a je schopen provádět měření bez připojeného napájení po dobu 18 hodin. Práce obsahuje informace jak o návrhu, tak i tvorbě hardwaru a softwaru pro tento senzor. V závěru práce je provedeno testování funkce senzoru za pomoci měření u automatizované stanice Českého hydrometeorologického ústavu v Kutné Hoře.

Z výsledných dat lze pozorovat, že realizace takto malých senzorů nemůže aktuálně konkurovat přístrojům, které využívá Český hydrometeorologický ústav. Nejpřesnější měření vykazoval senzor měření prachových částí SPS30. Z měření koncentrace O_3 bylo možné pozorovat změny koncentrace, výsledné hodnoty byly ale značně limitovány vlastnostmi senzoru MQ-131, který při měření vnějšího prostředí vykazoval značné ovlivnění měřených koncentrací. Měření NO_2 a SO_2 v takto nízkých koncentracích, které se vyskytují ve vzduchu, nebylo pro takto malý senzor možné realizovat. Pro kvalitnější ověření přesnosti měřených dat je nutné provést se zhotoveným senzorem měření v uzavřené komoře, kde bude dosaženo stejných podmínek jak pro zhotovený senzor, tak i pro referenční snímač.

Použitá literatura

- [1] MCGRATH, Michael J.; SCANAILL, Clíodhna Ni. *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications*. Apress, 2013. ISBN 978-1-4302-6013-4.
- [2] ANDREOVSKÝ, Jan; HENELOVÁ, Vladimíra. *Příručka ochrany kvality ovzduší*. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7.
- [3] PROSTŘEDÍ, Ministerstvo životního. *INFORMACE O ZDRAVOTNÍCH RIZICÍCH SPOJENÝCH S KVALITOU OVZDUŠÍ V ROCE 2020*. 2020. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/%5C\\$FILE/000-zdravotni_rizika_2020-20220105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/%5C$FILE/000-zdravotni_rizika_2020-20220105.pdf).
- [4] *Index kvality ovzduší*. Dostupné také z: <https://www.chmi.cz/?tab=2>.
- [5] BRZEZINA, Jáchym. *Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi*. 2018. Dostupné také z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>.
- [6] BRZEZINA, Jáchym. *Není ozon, jako ozon*. 2018. Dostupné také z: <https://chmibrno.org/blog/2018/08/01/neni-ozon-jako-ozon/>.
- [7] *Oxid siřičitý (SO₂)*. Dostupné také z: <https://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/13cs-oxid-siricity-so2>.
- [8] JELÍNEK, Jiří. *Prezentace: Měření teploty*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019.
- [9] *Měření teploty*. MEFANET, 2020. Dostupné také z: https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_teploty.
- [10] JELÍNEK, Jiří. *Prezentace: Měření vlhkosti plynů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019.
- [11] *Vlhkost vzduchu a její charakteristiky*. 2013. Dostupné také z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vlhkost-vzduchu/>.
- [12] *Particulate matter sensing for air quality measurements*. Dostupné také z: <https://sensirion.com/products/product-insights/specialist-articles/particulate-matter-sensing-for-air-quality-measurements/>.
- [13] SENSORTECH, SGX. *Introduction to Electrochemical (EC) Gas Sensors*. 2007. Dostupné také z: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2014/08/Introduction-to-Electrochemical-EC-Gas-Sensors1.pdf>.

- [14] YURISH, Sergey Y. *Chemical Sensors and Biosensors*. 6. vyd. 2018. ISBN 978-84-09-03030-9.
- [15] RIVAI, Muhammad; TALAKUA, Eddy Lybrech. *The Implementation of Pre-concentrator in Electronic Nose System to Identify Low Concentration of Vapors Using Neural Network Method*. 6. vyd. Surabaya: International Conference on Information, Communication Technology a System, 2014. ISBN 978-84-09-03030-9.
- [16] RANH, C. D.; C.Y.WANG. *Battery systems engineering*. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0.
- [17] INC., Cadex Electronics. *Types of Lithium-ion*. 2019. Dostupné také z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [18] MICHALEC, Libor. *Technologie NB-IoT a LTE Cat M1 jsou krok napřed*. 2018. Dostupné také z: <https://vyvoj.hw.cz/technologie-nb-iot-a-lte-cat-m1-jsou-krok-napred.html>.
- [19] PHIFER, Lisa. *Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE)*. 2014. Dostupné také z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Bluetooth-Low-Energy-Bluetooth-LE>.
- [20] *Wi-Fi CERTIFIED HaLow*. Dostupné také z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Bluetooth-Low-Energy-Bluetooth-LE>.
- [21] *IEEE 802.11ah alias WiFi HaLow - The best of WiFi and LPWAN*. 2021. Dostupné také z: <https://www.rutronik.com/article/ieee-80211ah-alias-wifi-halow-the-best-of-wifi-and-lpwan/>.
- [22] VOJÁČEK, Antonín. *SIGFOX - princip, struktura, protokol, použití*. 2017. Dostupné také z: <https://vyvoj.hw.cz/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti.html>.
- [23] REPUBLIKA, Sigfox Česká. *O nás*. Dostupné také z: <https://sigfox.cz/cs/o-nas>.
- [24] MÁCHA, Miroslav. *LoRa Technology: plocha rozsáhlá, dat poskrovnu a spotřeba skoro žádná*. 2016. Dostupné také z: <https://vyvoj.hw.cz/rf-wireless/lora-technology-plocha-rozsahla-dat-poskrovnu-a-spotreba-skoro-zadna.html>.
- [25] PEŠKA, Robert. *Internet of Things (3.část) – Technologie pro bezdrátový přenos dat*. 2017. Dostupné také z: <https://vyvoj.hw.cz/internet-of-things-3cast-technologie-pro-bezdratovy-prenos-dat.html>.
- [26] *LoRaWAN, Sigfox nebo NB-IoT? Srovnání 3 významných typů IoT sítí*. 2020. Dostupné také z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti>.
- [27] VOS, Gus. *What is Narrowband IoT (NB-IoT)?* 2021. Dostupné také z: <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/what-is-nb-iot/>.
- [28] *Základní parametry modulů RFox2*. Tecomat, 2020. Dostupné také z: <https://wiki.tecomat.cz/clanek/zakladni-parametry-modulu-rfox2>.

- [29] URBAN, Luboš. *Tecomat Foxtrot – nový modulární PLC od firmy Teco*. 2007. Dostupné také z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/tecomat-foxtrot-novy-modularni-plc-od-firmy-teco-2007_10_34290_1227/.
- [30] *CP-2007.11NDNN*. Dostupné také z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/cp-200711ndnn>.
- [31] *RK5, RK7 - radiační kryty pro přesné měření teploty a vlhkosti*. Dostupné také z: <https://www.fiedler.company/en/node/199>.
- [32] *Conversion between $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and ppb*. National Environmental Research Institute, 2003. Dostupné také z: https://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/expost/database/docs/ppm_conversion.pdf.