

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Senzorická platforma pro monitoring parametrů venkovního prostředí

Bc. Martin Faltus

Vedúci: Ing. Jan Včelák, Ph.D.
Odbor: Kybernetika a robotika
Študijný program: Kybernetika a robotika
Január 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Faltus** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **452770**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Senzorická platforma pro monitoring parametrů venkovního prostředí

Název diplomové práce anglicky:

Sensor platform for monitoring outdoor environmental conditions

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete prototyp stanice pro měření parametrů venkovního prostředí využívající komunikační rozhraní NB-IoT. Proveďte rešerši vhodných senzorů pro měření parametrů prostředí zahrnující měření T, RH, UV, PM, Nox, Sox, Ozon, CO, hluk včetně jejich požadavků na napájení, spotřebu a možnosti integrace do měřicí stanice. Stanici navrhnete pro napájení ze zdroje SELV, ale zároveň proveďte analýzu a výpočet parametrů komponent pro variantu napájení z baterie v kombinaci s PV panelem.

Navrhnete vhodné mechanické provedení umístění jednotlivých senzorů a jejich zapouzdření tak, aby se potlačilo jejich vzájemné ovlivňování při měření veličin i nepříznivé vlivy okolního prostředí na měřené veličiny. Naprogramujte FW knihovnu pro podporu komunikace NB-IoT i pro zvolené senzory (pokud to senzory budou vyžadovat).

Seznam doporučené literatury:

- [1] Jan Mrňa: Bezdrátová platforma pro monitoring kvality vnitřního vzduchu. Diplomová práce 2018
- [2] Chong-Min Kyung: Smart Sensors for Health and Environment Monitoring, Springer, 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Včelák, Ph.D., UCEEB

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

Datum zadání diplomové práce: **25.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2021/2022

Ing. Jan Včelák, 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

Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať predovšetkým môjmu školiteľovi Ing. Janovi Včelákovi, Ph.D. za poskytnuté konzultácie, cenné rady a možnosť realizovať moju prácu v UCEEB. Vďaka patrí aj Ing. Marekovi Maškovi, Karlovi Studenému a Ing. Alešovi Vodičkovi za mnoho nápadov a ochotu diskutovať o vylepšeniach pri návrhu zariadenia. Za sprostredkovanie možnosti umiestniť zariadenie v areáli ČHMÚ patrí moja vďaka Ing. Janovi Šilhavému. Ďakujem aj mojej rodine a kamarátom, ktorí ma podporovali počas štúdia.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne, a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

Práznovce, 3. januára 2022

Abstrakt

Úlohou tejto diplomovej práce bolo navrhnúť technické riešenie a skonštruovať prototyp stanice na meranie vybraných parametrov vonkajšieho prostredia.

Teoretická časť práce sa venuje popisu vplyvu životného prostredia na človeka a predovšetkým na jeho zdravie. Na základe materiálov z WHO a iných zdrojov je poukázané na dôležité škodlivé faktory v životnom prostredí a ich hlavných producentov. Uvádzajú sa špecifické účinky jednotlivých škodlivín na živé organizmy. Popisujú sa normami stanovené postupy a metódy merania hlavných škodlivých faktorov, ale aj alternatívne – jednoduchšie, lacnejšie, ale aj menej presné princípy merania.

Konštrukčná časť práce sa zaoberá výberom vhodných súčiastok, komponentov a konštrukčných celkov z ktorých by sa dal postaviť prototyp stanice na meranie určených parametrov životného prostredia použitím alternatívnych princípov merania. Na základe výberu bol navrhnutý a skonštruovaný funkčný prototyp stanice, ktorý spĺňa podmienky zadania diplomovej práce. Na meranie boli vybrané nasledovné parametre: teplota, vlhkosť, atmosférický tlak, koncentrácia prachových častíc, intenzita UV žiarenia, hluk a koncentrácia škodlivých plynov NO, NO₂, O₃, SO₂. Škodlivé plyny sú merané elektrochemickými senzormi. Namerané údaje sa posielajú pomocou komunikačného rozhrania NB-IoT na určený dátový server, ale môžu sa ukladať aj na SD kartu umiestnenú priamo v stanici. Tieto dáta sú dostupné jednak v číselnej forme, ale aj vo forme grafov cez naprogramované webové rozhranie. Riadenie funkcie meracej stanice zabezpečuje modul ESP32-WROOM. Celé zariadenie je napájané z rozvodnej siete 230 V AC. Ako alternatíva je teoreticky analyzovaná možnosť napájania z kombinácie batéria a fotovoltaický panel.

Funkčný prototyp zariadenia bol do-

časne umiestnený v areáli meracej stanice ČHMÚ v Prahe – Libuš. Takéto porovnanie dlhšej časovej rady nameraných údajov umožní do budúcnosti lepšie zhodnotenie presnosti a správnosti merania a poskytne tak podklady na ďalší rozvoj prototypovej stanice.

Kľúčové slová: meranie kvality prostredia, vonkajšie prostredie, ESP32, NB-IoT, koncentrácie plynov, NO, NO₂, SO₂, O₃, CO, prachové častice, hluk, UV index

Vedúci: Ing. Jan Včelák, Ph.D.

Abstract

The task of this thesis was to design a technical solution and construct a prototype of a weather station for measuring selected parameters of the outdoor environment.

The theoretical part of the thesis describes the influence of the environment on humans and especially on their health. On the basis of materials from WHO and other resources the important harmful factors in the environment and their main producers are pointed out. The specific effects of individual pollutants on living organisms are presented. Standard procedures and methods for measuring the main harmful factors are described, as well as alternatives – simpler, cheaper, but also less accurate measurement principles.

The practical part of the thesis discusses the selection of suitable parts, components and structural units from which a prototype station could be built to measure specific environmental parameters using alternative measurement principles. Based on the selection, a functional prototype of the station was designed and constructed, which meets the requirements of the thesis assignment. The following parameters were selected for measurement: temperature, humidity, atmospheric pressure, dust particle concentration, UV radiation intensity, noise and concentration of harmful gases NO, NO₂, O₃, SO₂. Concentrations of harmful gases are measured by electrochemical sensors. Measured data is sent via the NB-IoT communication interface to a designated data server, but can also be stored on an SD card located directly in the station. This data is available both in numerical format and as graphs via a custom-made web interface. The measuring station uses ESP32-WROOM module as control unit. The station is powered by the 230 V AC mains. The thesis also theoretically analyses the

possibility of using a power supply from a combination of battery and photovoltaic panel.

A prototype of the device was temporarily placed in the premises of the measurement station of the Czech National Institute of Meteorology in Prague – Libuš. Such comparison of a longer time series of measured data will allow a better evaluation of the accuracy and precision of the measurements in the future and thus provide the basis for further development of the prototype station.

Keywords: environmental quality measurement, outdoor environment, ESP32, NB-IoT, gas concentrations, NO, NO₂, SO₂, O₃, CO, dust particles, UV radiation index

Title translation: Sensor platform for monitoring outdoor environmental conditions

Obsah

1 Úvod	1	5 Konštrukcia	53
2 Činitele vplývajúce na kvalitu životného prostredia	5	5.1 Návrh elektrickej schémy	53
2.1 Znečisťovatele ovzdušia	5	5.1.1 Napájacia časť	53
2.1.1 Oxid siričitý (SO ₂)	6	5.1.2 Riadiaca jednotka	56
2.1.2 Oxidy dusíka NO _x (NO, NO ₂)	6	5.1.3 AD prevodník pre senzory plynov	57
2.1.3 Oxid uhoľnatý (CO)	6	5.1.4 Modul NB-IoT komunikácie	58
2.1.4 Ozón O ₃	7	5.1.5 Riadenie a snímanie otáčok ventilátorov	59
2.1.5 Pevné častice (Prachové častice) (PM _{2,5} , PM ₁₀)	7	5.1.6 Meranie hluku	60
2.2 Niektoré ďalšie škodlivé faktory	8	5.1.7 Kompletná schéma zapojenia	61
2.2.1 UV žiarenie	8	5.2 Mechanická konštrukcia	62
2.2.2 Hluk	13	5.2.1 Testovacie zariadenie	62
3 Meranie kvality ovzdušia	17	5.2.2 Prototypová stanica	64
3.1 Referenčné metódy na sledovanie kvality ovzdušia	17	5.2.3 Návrh plošných spojov	72
3.2 Alternatívne metódy na sledovanie kvality ovzdušia	18	5.2.4 Finálna podoba zostaveného zariadenia	77
3.2.1 Senzory plynov	18	6 Program riadiacej jednotky a dátového servera	79
3.2.2 Elektrochemické senzory plynov	22	6.1 Program riadiacej jednotky prototypovej stanice	79
3.2.3 Detekcia prachových častíc (PM)	24	6.1.1 SETUP	79
6.1.2 LOOP	81	6.2 Program dátového servera	83
6.2.1 Algoritmus dodatočnej kompenzácie vplyvu teploty na meranie plynov	86		
3.3 Existujúce zariadenia využívajúce iné ako referenčné metódy sledovania kvality ovzdušia	25	7 Výsledky skúšania a merania	87
4 Komponenty a technológie	29	7.1 Testovacia prevádzka pri stanici ČHMÚ	88
4.1 Požiadavky na zariadenie	29	7.2 Porovnanie nameraných údajov	88
4.2 Výber komponentov	30	8 Možnosti ďalšieho rozvoja prototypovej stanice	95
4.2.1 Senzor teploty a vlhkosti	30	8.1 Analýza a výpočet komponentov napájania z batérie a FV panelu	95
4.2.2 Senzor prachových častíc - PM	33	8.2 Ďalšie možnosti rozvoja prototypovej stanice	98
4.2.3 Riadiaca jednotka	34	9 Záver	99
4.2.4 Senzor atmosférického tlaku	35	A Literatúra	101
4.2.5 Senzor UV žiarenia	37	B Kompletná schéma prototypu stanice	111
4.2.6 Analógovo – digitálny prevodník	38	C Štruktúra dátovej správy JSON	117
4.2.7 Primárny napájací zdroj	39	D Zoznam externých príloh	119
4.2.8 Moduly napájacieho napätia 3,3 V DC a 5,0 V DC	40		
4.2.9 Senzory plynov	41		
4.3 Komunikačné technológie	48		
4.3.1 NB-IoT (NarrowBand Internet of Things)	48		
4.3.2 Iné komunikačné technológie	50		
4.3.3 Komunikačný modul	51		

Obrázky

2.1 Normy kvality ovzdušia EÚ a usmernenia WHO	8
2.2 Približné energetické zastúpenie žiarenia dopadajúceho na zemský povrch	9
2.3 Vertikálny profil množstva ozónu	10
2.4 Akčné spektrá (váhové funkcie) .	12
2.5 Grafy niektorých akustických váhových funkcií	15
3.1 Príklad závislosti priepustnosti vzduchu od vlnovej dĺžky IR žiarenia	21
3.2 Schéma elektrochemického senzora plynu	23
3.3 Princíp optickej detekcie častíc .	25
4.1 Blokový diagram vnútorného zapojenia senzora SHT31	31
4.2 Presnosť merania teploty	32
4.3 Presnosť merania vlhkosti.....	32
4.4 Princíp merania SPS30	33
4.5 Particulate Matter Sensor SP30	34
4.6 Vzhľad modulu ESP32-WROOM-32	35
4.7 Senzor BMP280	36
4.8 Bloková schéma UV senzora....	37
4.9 UV index	37
4.10 Blokový diagram AD prevodníka	39
4.11 Blokový diagram primárneho zdroja	40
4.12 Vzhľad primárneho zdroja	40
4.13 Vzhľad spínaného regulátora série VXO078xx-1000	41
4.14 Senzor MQ-7	43
4.15 Senzor ZE03-CO.....	43
4.16 Senzor UPLSM-NO2 968-047..	44
4.17 Súprava senzorov a vyhodnocovacej elektroniky	45
4.18 Senzor OX-B431 aj s ISB	45
4.19 ISB zo strany súčiastok	47
4.20 Schéma ISB	47
4.21 Komunikačná doska MIKROE-3072 LTE IoT	51
4.22 Schéma dosky MIKROE-3072 LTE IoT.....	52
5.1 Bloková schéma prototypového zariadenia	54
5.2 Schéma zapojenia napájacej časti	55
5.3 Schéma zapojenia modulu ESP32-WROOM-32	56
5.4 Schéma zapojenia AD prevodníka s príslušenstvom	57
5.5 Schéma zapojenia modulu NB-IoT	58
5.6 Schéma riadenia ventilátorov ...	59
5.7 Schéma snímača hluku	60
5.8 Zostava testovacieho zariadenia bez krytu.....	62
5.9 Tunel so senzormi plynov a prachu bez krytu	63
5.10 Rozvádzačová skrinka	65
5.11 3D model skrinky s potrebnými otvormi.....	65
5.12 3D model tunelu – podklad pre tlač	66
5.13 Vytlačený vzduchový tunel....	66
5.14 Vytlačený držiak aj s osadeným vzduchovým filtrom	66
5.15 Zostavený vzduchový tunel....	67
5.16 Kryt vstupného otvoru vzduchu (3D model).....	67
5.17 Kompletný kryt mikrofónu	68
5.18 Segmenty radiačného krytu ...	69
5.19 Diely radiačného filtra	69
5.20 Držiak UV senzora	70
5.21 Celkový 3D model zariadenia..	71
5.22 Hlavná doska vrchná strana spojov (top vrstva).....	72
5.23 Hlavná doska spodná strana spojov (bottom vrstva)	73
5.24 Vizualizácia hlavnej dosky	73
5.25 Doska AD prevodníka, vrchná strana spojov (top vrstva)	74
5.26 Doska AD prevodníka, spodná strana spojov (bottom vrstva)	74
5.27 Vizualizácia dosky AD prevodníka	74
5.28 Doska snímača hluku.....	75
5.29 Doska snímača T/RH	76
5.30 Výsledná podoba zostaveného zariadenia zvnútra	77

5.31 Výsledná podoba zostaveného zariadenia zvonka	78
6.1 Vývojový diagram programu riadiacej jednotky	80
6.2 Vývojový diagram programu dátového a webového servera	85
6.3 Ukážka zobrazenia nameraných dát	85
7.1 Umiestnenie v ČHMÚ Praha - Libuš	88
7.2 Porovnania meraní	89
7.3 Porovnania meraní	90
7.4 Príklad nameraných dát za obdobie 20 dní	93
B.1 Hlavná doska elektroniky 1. časť	111
B.2 Hlavná doska elektroniky 2. časť	112
B.3 Hlavná doska elektroniky 3. časť	113
B.4 AD prevodník	114
B.5 Snímač hluku	115
B.6 Snímač teploty a vlhkosti	116
C.1 Štruktúra správy JSON – 1. časť	117
C.2 Štruktúra správy JSON – 2. časť	118

Tabuľky

2.1 Hladiny hluku vybraných zvukov	16
4.1 Základné parametre senzorov SHT21 a SHT31	31
4.2 Rozdiel parametrov VXO7803 a VXO7805	41
4.3 Hraničné hodnoty niektorých znečisťujúcich plynov	42
4.4 Vybrané parametre niektorých 3GPP LPWAN štandardov	49
8.1 Spotreba elektrickej energie prototypovej stanice	95
8.2 Batérie použité pre výpočet	96
8.3 FV panely použité pre výpočet	97
8.4 Nefunkčné dni podľa kombinácie FV panelu a batérie	97

Kapitola 1

Úvod

„Po väčšinu histórie musel človek bojovať s prírodou, aby prežil; v tomto storočí si začína uvedomovať, že aby prežil, musí prírodu chrániť.“ (Jacques-Yves Cousteau)

„Až keď sa vyrúbe posledný strom, otrávi posledná rieka, uloví posledná ryba, až vtedy pochopíme, že peniaze sa nedajú jesť.“ (Indiáni kmeňa Cree)

Ľudia sa snažia po stáročia stále viac izolovať od okolitej prírody. Snažia sa vytvárať bezpečné a pohodlné obydlia, ale aj pracoviská, ktoré ich chránia pred nepriaznivými poveternostnými vplyvmi a uľahčujú im život. Aj tak je ale stále existencia človeka a kvalita jeho života veľmi výrazne závislá na parametroch okolitého prírodného prostredia – životného prostredia.

Životné prostredie môže byť opísané ako všetko, čo vytvára prirodzené podmienky existencie organizmov, vrátane človeka a je predpokladom ich ďalšieho vývoja. Medzi základné parametre kvality životného prostredia sa radia hlavne kvalita ovzdušia, kvalita povrchových a podzemných vôd, intenzita slnečného žiarenia a niektoré ďalšie. Vo funkčnom ponímaní je životné prostredie súhrn materiálnych zložiek sveta, prírodných i umelo vytvorených, v ktorých a za pomoci ktorých si človek uspokojuje svoje materiálne a duchovné potreby. Tým tieto zložky aj mení, pretvára a súčasne vytvára materiálne podmienky svojho ďalšieho života a života budúcich generácií. Životné prostredie je jednou z určujúcich zložiek kvality života spoločnosti. [1]

Súbežne s rozvojom ľudskej spoločnosti, najmä s industrializáciou, exponenciálnym rastom počtu obyvateľstva a bezohľadným využívaním prírodných zdrojov dochádza k hromadeniu odpadov a všeobecne k znečisťovaniu a poškodzovaniu životného prostredia.

Znečistenie životného prostredia výrazne negatívne vplýva na chorobnosť a dĺžku života ľudí. Podľa údajov WHO len znečistenie okolitého ovzdušia má na svedomí približne 4,2 milióna predčasných úmrtí ročne v dôsledku mŕtvice, srdcových ochorení, rakoviny pľúc, akútnych a chronických ochorení dýchacích ciest. [2]

Približne 91% svetovej populácie žije na miestach, kde je kvalita ovzdušia horšia ako limity WHO. Hoci znečistenie okolitého ovzdušia postihuje rovnako rozvinuté aj rozvojové krajiny, krajiny s nízkymi a strednými príjmami sú

najviac zaťažené, pričom najväčšie straty na životoch si vyžiadali regióny v západnom Tichomorí a juhovýchodnej Ázii [2].

Zdroje znečistenia ovzdušia sú rôznorodé. Medzi hlavné vonkajšie zdroje znečistenia patrí vykurovanie a varenie v domácnostiach, vozidlá, výroba energie, poľnohospodárstvo, spaľovanie odpadu a priemysel.

Investície, ktoré podporujú udržateľné využívanie pôdy, čistejšiu energiu v domácnostiach, dopravu, energeticky účinné bývanie, výrobu energie, priemysel a lepšie nakladanie s komunálnym odpadom, môžu účinne znížiť hlavné zdroje znečistenia vonkajšieho ovzdušia.

Kvalita ovzdušia je úzko prepojená s klímou¹ a ekosystémami Zeme na celom svete. Mnohé z príčin znečistenia ovzdušia (napr. spaľovanie fosílnych palív) sú zároveň zdrojmi emisií skleníkových plynov. Rozhodnutia zamerané na zníženie znečistenia ovzdušia preto predstavujú obojstranne výhodnú stratégiu pre klímu aj zdravie, pretože znižujú záťaž vyvolanú chorobami spôsobenými znečistením ovzdušia a prispievajú k zmierneniu klimatickej zmeny² v blízkej i dlhodobej perspektíve. [2]

Je preto mimoriadne dôležité pre spoločnosť prijímať adekvátne opatrenia, ktoré by viedli k zníženiu škodlivých vplyvov prostredia na človeka. Na to je ale potrebné poznať mieru vplyvu jednotlivých zložiek prostredia na človeka a tiež vedieť merať a dlhodobo monitorovať vybrané parametre prostredia.

V rámci smernice Európskej únie (EÚ) o kvalite ovzdušia sú členské štáty povinné monitorovať kvalitu ovzdušia v oblastiach, kde sa predpokladá prekročenie limitov stanovených týmto orgánom [5], [6]. Na meranie a monitorovanie parametrov životného prostredia vznikajú a rozširujú sa siete monitorovacích staníc. Sú to jednak na úrovni jednotlivých štátov oficiálne národné monitorovacie siete, ktoré sú napríklad na našich územiach prevádzkované SHMÚ (Slovenský hydrometeorologický ústav) a ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). Tieto siete využívajú certifikované prístroje, ktoré sú ale veľmi drahé a náročné na údržbu a prevádzku.

Vznikajú ale aj lokálne monitorovacie stanice v rôznych organizáciách a podnikoch väčšinou postavených na jednoduchších, lacnejších, ale aj menej presných prístrojoch. Existuje napríklad aj neziskový projekt World Air Quality Index ([7]), ktorý združuje viac ako 30 000 „amatérskych“ staníc na meranie kvality ovzdušia vo viac ako 130 krajinách sveta.

Všetky tieto merania majú poskytovať fundované podklady jednak pre dlhodobé sledovanie a následné plánovanie strategických rozhodnutí štátov a medzinárodných organizácii, ale aj na rýchle reagovanie na náhle odchýlky v konkrétnych lokalitách.

Na meranie a dlhodobé monitorovanie niektorých základných parametrov

¹Klíma, alebo aj podnebie je dlhodobý priebeh atmosférických dejov (počasia) konkrétneho miesta alebo územia. Tento priebeh je určený hlavne súborom meteorologických parametrov ako teplota vzduchu, vlhkosť vzduchu, zrážky, slnečné žiarenie, vietor, oblačnosť a pod. [3]

²Podľa IPCC (Medzivládny panel pre klimatickú zmenu) treba rozlišovať medzi pojmi „klimatické zmeny“, ktoré majú prirodzený pôvod a „klimatická zmena“, ktorá má antropogénny pôvod. Tieto antropogénne vplyvy sa začali intenzívnejšie prejavovať od začiatku priemyselnej revolúcie cca od roku 1750. [4]

životného prostredia som sa pokúsil navrhnuť a skonštruovať pomerne jednoduché, a v porovnaní s profesionálnymi, aj cenovo výhodné zariadenie, ktoré je popísané v tejto práci.

Kapitola 2

Činitele vplyvajúce na kvalitu životného prostredia

2.1 Znečisťovatele ovzdušia

Znečistené ovzdušie označuje stav, keď sa vplyvom vypúšťaných plynov, prachových častíc a dymu do atmosféry stáva ovzdušie škodlivé pre ľudí, infraštruktúru a celkovo životné prostredie. Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) označuje znečistenie ovzdušia ako najväčšie environmentálne riziko pre zdravie v Európe. V EÚ je znečistenie ovzdušia príčinou v priemere vyše 1 000 predčasných úmrtí denne, čo je desaťkrát viac než počet ľudí, ktorí zahynú pri dopravných nehodách [8]. Na základe údajov Európskej environmentálnej agentúry (EEA) bola v roku 2018 približne jedna tretina obyvateľstva EU žijúcich v mestských oblastiach aspoň krátkodobo vystavená hladinám znečisťujúcich látok, ktoré prekračujú limity EU. Podľa štandardov, ktoré organizácia WHO považuje za škodlivé to ale bolo až 99% obyvateľstva žijúcich v mestských oblastiach [9]. Zvyčajne je expozícia znečisteným ovzduším vyššia v mestách ako na vidieku vzhľadom na vyššiu hustotu obyvateľstva, dopravy a priemyslu.

Svetová zdravotnícka organizácia označila suspendované častice (PM), oxid dusičitý (NO_2), oxid siričitý (SO_2) a prízemný ozón (O_3) za látky znečisťujúce ovzdušie, ktoré najviac poškodzujú ľudské zdravie [10]. O týchto hlavných škodlivých faktoroch sa píše podrobnejšie v nasledujúcich častiach. Možné princípy merania týchto faktorov budú spomenuté v samostatnej časti tejto práce.

Štúdie preukázali, že ľudské zdravie a znečistenie ovzdušia plynmi a pevnými časticami v mestách, sú úzko prepojené [10]. Z hľadiska znečisťujúcich látok v plynnej fáze je oxid dusičitý (NO_2) považovaný za kľúčovú zlúčeninu, ktorá môže ovplyvniť kvalitu života a úmrtnosť [11]. Tak NO_2 , ako aj oxid uhoľnatý (CO) sú známe ako respiračné senzibilizátory [12] a oba majú väčší vplyv na osoby s existujúcim respiračným alebo kardiovaskulárnym ochorením [13]. Dlhodobé vystavenie NO_2 tiež nepriaznivo ovplyvňuje funkciu pľúc, zatiaľ čo CO znižuje schopnosť organizmu prenášať kyslík, čím ovplyvňuje kognitívne funkcie pri nižších koncentráciách a je toxický pri zvýšených koncentráciách [14], [15]. Hoci sa zdá, že priamy vplyv (NO) na zdravie nie je primárne dôležitý,

■ 2.1.4 Ozón O₃

Jedná sa o troj atómovú molekulu kyslíka a je veľmi dobre rozpustný vo vode. Má silné oxidačné vlastnosti. Na rozdiel od stratosférického ozónu, ktorý plní dôležitú ochrannú funkciu, tzv. troposférický (prízemný) ozón má nepriaznivé vplyvy na zdravie ľudí a vegetáciu. Prízemný ozón nie je vypúšťaný do ovzdušia žiadnym znečisťujúcim procesom, ale ide o druhotne vznikajúcu znečisťujúcu látku. Zvýšený vznik prízemného ozónu pozorujeme najmä počas horúcich letných dní v lokalitách s vysokou koncentráciou výfukových plynov spaľovacích motorov, kde dochádza k nárastu obsahu oxidov dusíka a plynných uhľovodíkov vo vzduchu.

V posledných rokoch sú všetky novo vyrábané osobné automobily vybavené katalyzátormi, ktoré premieňajú oxidy dusíka na inertný plynný dusík a toxický oxid uhoľnatý premieňajú na relatívne neškodný CO₂. Zavedením týchto opatrení sa podarilo znížiť koncentráciu prízemného ozónu [18].

Ozón môže spôsobovať dráždenie očí, dýchacie ťažkosti, negatívne pôsobí na srdce a cievy a pri dlhodobej expozícii môže viesť k zápalovým ochoreniam. Účinky ozónu sú v dôsledku jeho štruktúry voľného radikálu podobné účinkom ionizujúceho žiarenia [19]. Prízemný ozón taktiež poškodzuje bunkové membrány rastlín a môže spôsobovať degeneratívne zmeny (rastliny dorastajú do menšej veľkosti a spomaľuje sa rast listov).

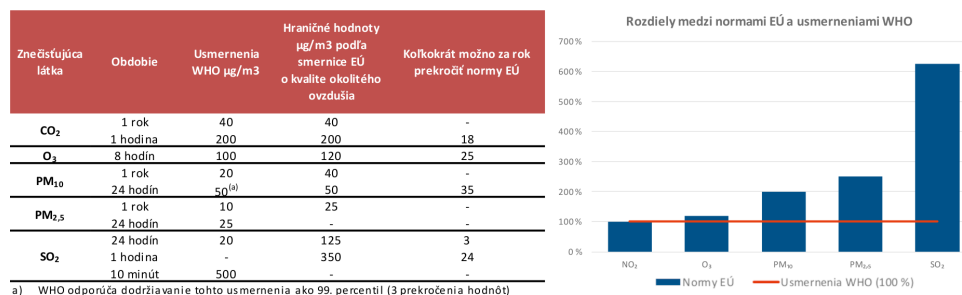
■ 2.1.5 Pevné častice (Prachové častice) (PM_{2,5} , PM₁₀)

Jedná sa o drobné pevné alebo kvapalné častice rozptýlené vo vzduchu. Označenie PM₁₀ sa používa pre častice s veľkosťou do 10 μm a označenie PM_{2,5} sa používa pre častice s veľkosťou do 2.5 μm. Znečistenie prachovými časticami vzniká buď ich priamym vypúšťaním od ovzdušia alebo rozvírením častíc usadených na zemskom povrchu (tzv. sekundárna prašnosť). Medzi najvýznamnejšie ľudské zdroje pevných častíc celosvetovo patrí poľnohospodárstvo. Ďalšie významné zdroje pevných častíc sú taktiež automobily (predovšetkým dieselové) a hlavne v zimnom období sú to domácnosti kde sa na vykurovanie používa tuhé palivo [20], [21].

Vplyv pevných častíc na zdravie je závislé od ich veľkostí. Čím sú prachové častice menšie tým hlbšie do dýchacej sústavy sa dostávajú. V prípade úplne najmenších prenikajú až do krvného obehu. A preto dlhodobá expozícia pevnými časticami môže mať negatívne účinky na dýchací a srdcovocievny systém. V krajnom prípade môže spôsobiť aj predčasnú smrť. Medzi najčastejšie zdravotné problémy spojené s pevnými časticami patrí dráždenie očí, nosa, hrdla a bolesti hlavy, astmatické záchvaty a akútne zápaly priedušiek, taktiež môže dôjsť k nárastu citlivosti k infekciám dýchacích ciest. V závislosti od chemického zloženia pevných častíc môžu v prírode prispievať k negatívnym účinkom kyslých dažďov, ovplyvňovať diverzitu ekosystémov, spôsobovať pokles živín v pôde. Podobne ako u ľudí aj pri zvieratách prenikajú hlboko do pľúc a môžu spôsobovať závažné zdravotné problémy [17].

Pre všetky vyššie spomenuté znečisťovatele ovzdušia platia limity koncentrácií,

ktoré sa členské krajiny EU zaviazali dodržiavať a monitorovať. Presné údaje o spôsobe monitorovania, konkrétnych koncentráciách a celkovej problematike znečistenia ovzdušia sa zaoberá smernica európskeho parlamentu a rady Európy 2008/50/ES z roku 2008 o kvalite okolitého ovzdušia a čistejšom ovzduší v Európe [22]. Avšak limity koncentrácií jednotlivých znečisťujúcich látok, ktoré sú ešte pre ľudí bezpečné, stanovené organizáciou WHO sú ešte prísnejšie. Zatiaľ čo sa krajiny EU snažia dodržiavať smernicu EU, k prekročovaniu limitov WHO dochádza mimoriadne často. Na obrázku 2.1 sa nachádzajú konkrétne hodnoty limitov stanovené smernicou EU ako aj organizáciou WHO [23].



Obrázok 2.1: Normy kvality ovzdušia EÚ a usmernenia WHO. Zdroj: [23]

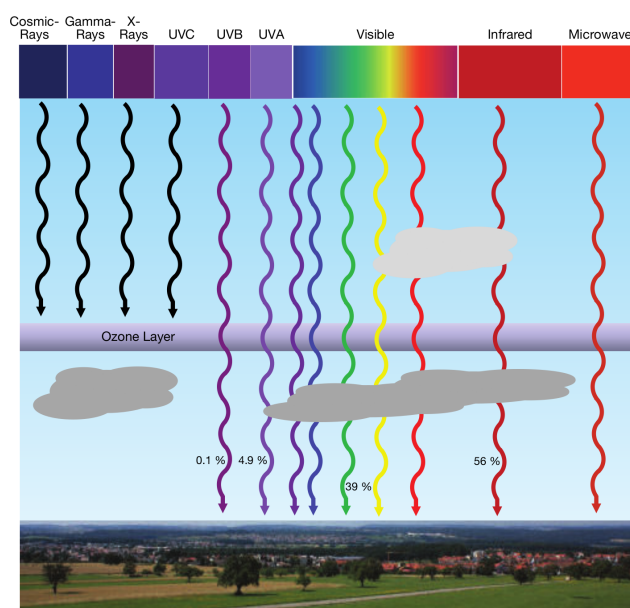
2.2 Niektoré ďalšie škodlivé faktory

V nasledujúcich častiach textu sa bližšie rozoberú základné informácie o niektorých ďalších parametroch, ktoré ovplyvňujú kvalitu životného prostredia. Jednak o ich vplyve na človeka a tiež o princípoch merania týchto parametrov.

2.2.1 UV žiarenie

Zo slnka dopadá na zemský povrch elektromagnetické žiarenie rôznych vlnových dĺžok. Z pohľadu vplyvu tohto žiarenia na životné prostredie sú zaujímavé hlavne vlnové dĺžky od 100 nm do 10000 nm. Celé toto pásmo sa zvykne ešte vzhľadom na viditeľnú časť spektra deliť na tri významné oblasti:

- Ultrafialové žiarenie (UV) – 100 nm – 400 nm
- Viditeľné žiarenie (VIS) – 400 nm – 700 nm
- Infračervené žiarenie (IR) – 700 nm – 10000 nm



Obrázok 2.2: Približné energetické zastúpenie žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Zdroj: [24]

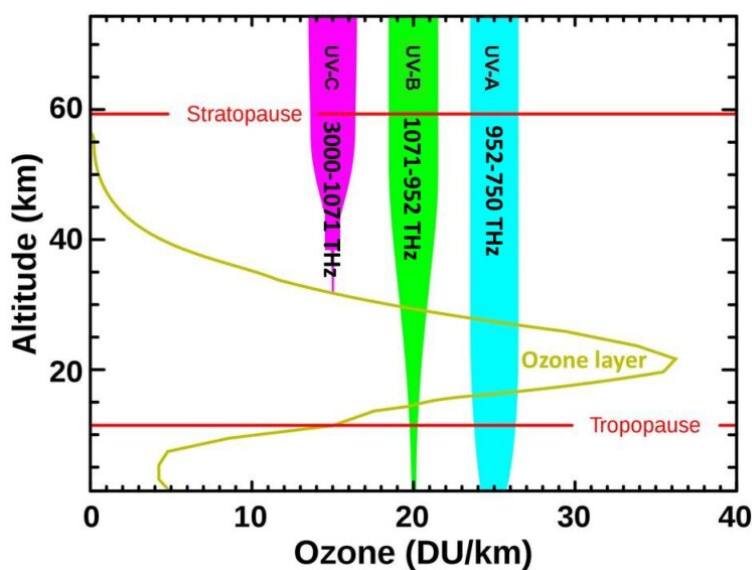
Žiarenie v UV oblasti spektra predstavuje iba 3 – 5 % z celkovej energie slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch pri polohe slnka v nadhlavníku. Nemá výraznejšie tepelné účinky, pre ľudské oko je neviditeľné (až na pár výnimiek), ale zato je dobre absorbované organickými molekulami. UV žiarenie ešte ďalej, jemnejšie delíme na tri pásma:

- UVC žiarenie – 100 nm - 280 nm
- UVB žiarenie – 280 nm - 315 nm
- UVA žiarenie – 315 nm - 400 nm

UVC žiarenie je prakticky úplne pohlcované ozónovou vrstvou Zeme. Časť UVB žiarenia preniká až na zemský povrch. Jeho množstvo je veľmi závislé od viacerých faktorov – viď nižšie. Pri zemskom povrchu predstavuje táto zložka iba 5 – 6 % celkového UV žiarenia. UVA žiarenie predstavuje výraznú väčšinu UV žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Je tiež čiastočne zoslabované atmosférou, ale výrazne menej ako UVB. (Obr. 2.3)

V tomto obrázku sa udáva množstvo ozónu v atmosfére v rôznych výškach v jednotkách DU/km¹.

¹Dobsonova jednotka, DJ, angl. Dobson unit, DU — jednotka celkového množstva plynu prítomného v zemskej atmosfére definovaná ako množstvo plynu prítomného v zvislom stĺpci atmosféry jednotkového prierezu, ktorý po stlačení na 1 013 hPa pri teplote 10 °C vytvorí vrstvu s hrúbkou 0,001 cm (10^{-5} m); $1 \text{ DU} = 2,69 \cdot 10^{20}$ molekúl/m². Dobsonova jednotka sa používa najmä ako jednotka celkového množstva atmosférického ozónu. Napr. dlhodobý priemer množstva ozónu v našich polohách je zhruba 400 DU, tj. iba 4 mm! Svetový priemer je 350 DU (3,5 mm) a v Antarktíde bol pozorovaný i pokles pod 90 DU. Jednotka je nazvaná podľa britského fyzika Gordona Millera Bournu Dobsona (*1889, †1976).[26]



Obrázok 2.3: Vertikálny profil množstva ozónu v miernom pásme severnej pologule – žltozelená krivka. Vertikálne farebné pásy zobrazujú intenzitu zložiek UV žiarenia v závislosti od výšky. Zdroj: [25]

Ako bolo už vyššie spomenuté, je intenzita UV žiarenia na zemskom povrchu závislá od viacerých faktorov:

- Denná a ročná doba – keď je slnko vysoko na oblohe, je dráha slnečných lúčov v zemskej atmosfére krátka, a teda aj zoslabenie je podstatne menšie, ako pri polohe slnka nízko nad obzorom. Hodnoty intenzity UV žiarenia vykazujú u nás výraznú dennú a ročnú zmenu. Maximálne sú na poludnie počas letného slnovratu.
- Ozón – je to plyn, ktorý najvýznamnejšie ovplyvňuje koľko UVB a tiež UVA žiarenia dopadá na zemský povrch. Ozón má výrazné absorpčné maximá pri vlnových dĺžkach 230 nm - 290 nm – Hartleyove absorpčné pásy.
- Aerosól – tvoria ho kvapalné a pevné častice prítomné v atmosfére. Sú to najmä vodné kvapky, ľadové kryštáliky, morská soľ, prach, peľ, ktoré majú prirodzený pôvod, ale aj sadze a iné produkty spaľovacích procesov, ktoré vznikajú činnosťou človeka. Slnečné UV žiarenie sa na týchto aerosólových častočkách môže odrážať, absorbovať alebo rozptyľovať, teda intenzita UV žiarenia sa znižuje.
- Oblaky – vo všeobecnosti UV žiarenie zoslabujú. Intenzita zoslabenia závisí hlavne od ich optickej hrúbky. Môžu však spôsobiť aj krátkodobé zvýšenie intenzity a to pri bielych kopovitých oblakoch, ktoré neprekrývajú slnečný kotúč.

Vplyv UV žiarenia na rastliny a živočíchy závisí jednak od vlnovej dĺžky žiarenia, ale aj od hustoty toku žiarenia (výkonu) a tiež od dĺžky expozície organizmu týmto žiarením (dávky žiarenia).

- UVC má najdeštruktívnejší vplyv na živé organizmy – germicídne účinky – používa sa na dezinfekciu. Našťastie sa táto časť slnečného žiarenia prakticky na zemský povrch nedostane
- UVB žiarenie zo slnka je výrazne zoslabované zemskou atmosférou, ale dostane sa až na zemský povrch. Môže poškodzovať deoxyribonukleovú kyselinu v jadrách buniek, pri nadmernej expozícii môže spôsobovať zápal očných spojiviek, alebo zápal kože (erytém ²) a tiež zníženie obranyschopnosti organizmu (imunosupresívne účinky). Na druhej strane je dôležité pri tvorbe vitamínu D u cicavcov.
- UVA žiarenie je výrazne menej ovplyvnené absorpciou v atmosfére. V porovnaní s UVB preniká do hlbších vrstiev kože, kde spôsobuje zvýšenie koncentrácie voľných radikálov a tým nepriamo poškodzuje bunky.

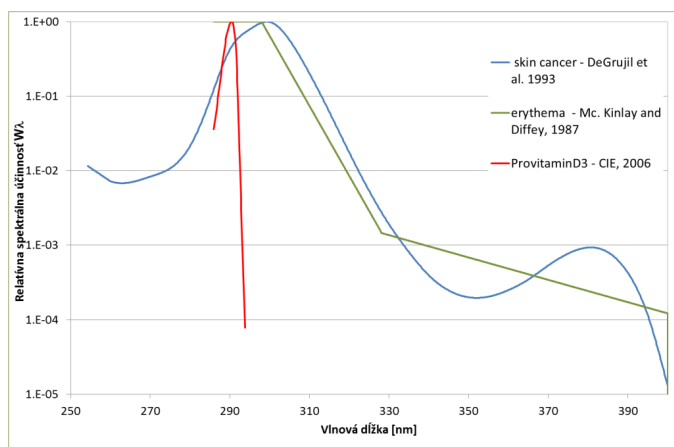
WHO v roku 2011 UV žiarenie zaradilo medzi karcinogény. Pre tvorbu dostatočného množstva vitamínu D v ľudskom tele nie je potrebná nadmerná expozícia celého ľudského tela slnečným UV žiarením [28].

Organizmy si počas dlhého vývoja v prirodzených podmienkach vytvorili obranné mechanizmy pred slnečným UV žiarením (napr. tvorba melanínu spôsobujúceho po vystavení ľudskej kože slnečnému žiareniu jej hnednutie), nemajú však obranné mechanizmy pre žiarenie, ktoré na zemský povrch prirodzene nedopadá (napr. UVC žiarenie). Biologické účinky slnečného UV žiarenia sa prejavujú najviac na tých častiach ľudského tela, ktoré sú mu najviac vystavené (oči, nechránená koža).

Aby sa dalo číselne vyjadriť a porovnávať pôsobenie celého pásma UV žiarenia na biologické procesy, bol vytvorený pojem *Akčné spektrum*. Je to váhová funkcia popisujúca účinok UV žiarenia v závislosti od jeho vlnovej dĺžky. Hodnota relatívnej účinnosti 0 znamená, že žiarenie s touto vlnovou dĺžkou sledovaný proces neovplyvňuje. Hodnota 1 hovorí, že žiarenie s touto vlnovou dĺžkou sa na sledovanom procese podieľa najviac. V súvislosti s ľudským zdravím sa najviac používajú akčné spektrá *Erytémové*, *Melanómové*, prípadne akčné spektrum pre tvorbu *provitamínu D3*.

Na obrázku 2.4 sú znázornené tieto tri akčné spektrá (váhové funkcie).

²Erytém je akútny zápal kože, ktorý je vyvolávaný ultrafialovým žiarením pri nadmernom slnečnom žiarení. Asi šesť až osem hodín po pôsobení slnečného žiarenia sa objavujú bolesti a svrbenie. Pri veľkoplošnom erytému sa okrem toho môže objavovať tvorenie pluzgierov a horúčka. Sčervenanie kože sa obmedzuje na ožiarené miesta. Vrchol ochorenia je dosiahnutý po 24 až 36 hodinách. Po jednom až dvoch týždňoch sa erytém vylieči. Zostáva po ňom zhrubnutie (mozole) a zhnednutie kože.[27]



Obrázok 2.4: Akčné spektrá (váhové funkcie) pre niektoré biologické účinky UV žiarenia. Zdroj: [28]

Ak sa merané spektrálne hodnoty slnečného žiarenia vynásobia váhovou funkciou pre erytém ľudskej kože, potom následnou integráciou spektrálnych hodnôt žiarenia získame hodnotu hustoty toku erytémového UV žiarenia

$$E_{er} = \int E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda$$

E_{er} je hustota toku erytémového žiarenia [$W \cdot m^{-2}$].

E_{λ} je meraná spektrálna hustota UV žiarenia [$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$].

$S_{er}(\lambda)$ je erytémové akčné spektrum normalizované na jeho maximum.

Erytémové akčné spektrum zobrazené na obr. 2.4 navrhli a predstavili v roku 1987 McKinley a Diffey [29]. Matematicky je popísané nasledovne [24]:

$$S_{er}(\lambda) = 1 \text{ pre } 250nm < \lambda < 298nm$$

$$S_{er}(\lambda) = 10^{(0,094(298-\lambda))} \text{ pre } 298nm < \lambda < 328nm$$

$$S_{er}(\lambda) = 10^{(0,015(139-\lambda))} \text{ pre } 328nm < \lambda < 400nm$$

$$S_{er}(\lambda) = 0 \text{ pre } 400nm < \lambda$$

V tom istom roku bolo toto spektrum prijaté ako referenčné aj Medzinárodnou organizáciou pre žiarenie CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) (International Commission on Illumination) [30].

Od globálneho erytémového UV žiarenia je odvodený aj slnečný UV index (UVI), ktorý bol v roku 1994 prijatý WHO (Svetová zdravotnícka organizácia) aj WMO (Svetová meteorologická organizácia) ako štandard pre prezentáciu informácií o úrovni slnečného UV žiarenia. Je to jednoduchá celočíselná stupnica. Matematicky je UVI definované ako

$$UVI = \frac{1}{25[mW \cdot m^{-2}]} \int_{286,5nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda$$

Meranie E_{λ} má byť robené s krokom 0,5 nm.

Hodnota 1 UVI zodpovedá hustote toku globálneho erytémového žiarenia $25mW \cdot m^{-2}$ a stupnica je lineárna. Podľa UVI sa rozdeľuje intenzita slnečného ultrafialového žiarenia na niekoľko kategórií: 0 – 2 nízka, 3 – 5 mierna, 6 – 7 vysoká, 8 – 10 veľmi vysoká, od 11 extrémna. Ako bolo písané vyššie pre hodnotu intenzity UV žiarenia, tak isto aj hodnotu UVI určujú oblačnosť, celkový ozón, množstvo a druh aerosólov v ovzduší, ale aj vlastnosti povrchu od ktorého sa UV žiarenie môže odrážať. Uvádzaná hodnota UVI je teda viazaná na danú dobu, miesto a nadmorskú výšku. Pre jednotlivé intervaly UVI odporúča WHO použitie určitých ochranných prostriedkov pred UV žiarením [28].

Na certifikované merania sa používajú buď Brewerove spektrofotometre, alebo UV rádiometre. Spektrofotometre majú nevýhodu, že jedno meranie trvá asi 10 minút. Pri UV rádiometroch sa dá robiť meranie približne každých 5 sekúnd. Tieto prístroje sú však pomerne veľké a veľmi drahé. Cena najlacnejších začína asi na 5000 € bez DPH a teda sa nedajú použiť v jednoduchých zariadeniach na meranie kvality prostredia. V týchto zariadeniach sa preto používajú rôzne typy polovodičových senzorov, ktoré sú jednoduché, malé a lacné. Väčšinou mávajú samostatný fotocitlivý prvok pre UVA a UVB pásmo.

2.2.2 Hluk

Hluk je akýkoľvek nežiadúci zvuk, ktorý pôsobí na človeka rušivo, nepríjemne, prípadne poškodzuje jeho zdravie.

Približne od polovice minulého storočia rast hladín hluku ako sprievodný jav technického pokroku začal predstavovať vážny problém nielen pracovného, ale aj životného prostredia. Hluk sa stal jedným z faktorov škodlivého ovplyvňovania životného prostredia. Je to asi najčastejšie pôsobiaca „škodlivina“ v životnom prostredí. Vážnym problémom sa stáva hlavne v posledných desaťročiach, keď nastal významný rozvoj priemyslu a dopravy. Dnes už možno hovoriť o tzv. akustickom smogu (noise pollution).

Zatiaľ čo pri iných fyzikálnych, chemických a biologických faktoroch nebýva až také ťažké určiť mieru škodlivosti a odozvu ich pôsobenia na ľudský organizmus, pri hluku tomu tak nie je. Najčastejšie dochádza k poškodeniu sluchového orgánu a tu je aj škodlivý účinok hluku ako jednotlivého faktora najlepšie dokázaný a najdlhšie známy. Sú však známe aj významné účinky hluku na ďalšie funkcie ľudského organizmu, ktoré sú výsledkom pôsobenia na vegetatívny nervový systém³, retikulárnu formáciu⁴ a kôrové a podkôrové mozgové centrá. Tieto účinky sa nazývajú nesluchové, resp. nešpecifické účinky hluku.

³Vegetatívny nervový systém (VNS) patrí medzi hlavné časti periférneho nervového systému. Je to systém neovládateľný vôľou a tvorí ho osobitná skupina periférnych nervov. Jeho úlohou je regulácia vnútorného prostredia organizmu. Napája sa na hladkú svalovinu ciev, tráviacej trubice, žľazy endo - aj exokrinné a má úzke prepojenie s endokrinným systémom. [31]

⁴Retikulárna formácia (RF) je šedá mozgová hmota, ktorú tvorí asi 50 mozgových oblastí umiestnených v mozgovom kmeni, (teda predĺženej mieche), strednom mozgu, ale aj v talamuse. Jedná sa o multisenzorický systém, ktorý prijíma vzruchy zo všetkých špecifických nervových dráh. [32]

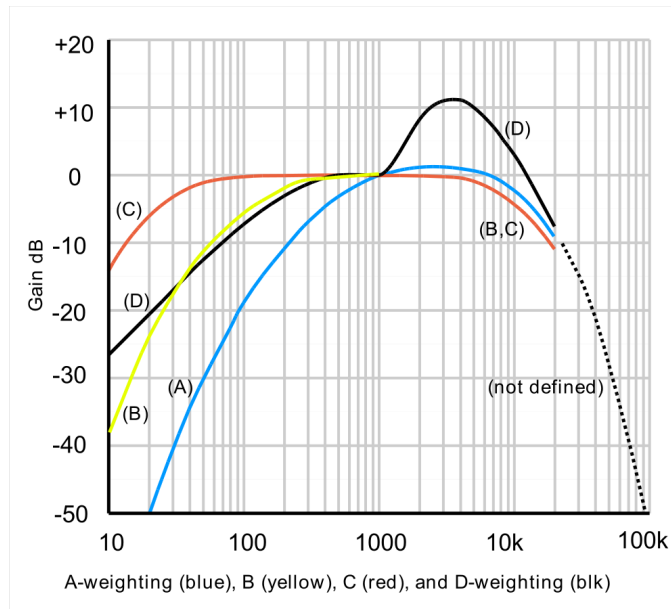
funkcii:

$$R_A(f) = \frac{12194^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20,6^2)\sqrt{(f^2 + 107,7^2)(f^2 + 737,9^2)(f^2 + 12194^2)}}$$

$$A(f) = 20 \cdot \log(R_A(f)) - 20 \cdot \log(R_A(1000)) = 20 \cdot \log(R_A(f)) + 2$$

$$R_C(f) = \frac{12194^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20,6^2)(f^2 + 12194^2)}$$

$$C(f) = 20 \cdot \log(R_C(f)) - 20 \cdot \log(R_C(1000)) = 20 \cdot \log(R_C(f)) + 0,06$$



Obrázok 2.5: Grafy niektorých akustických váhových funkcií. Zdroj: [45]

Ekvivalentná hladina A zvuku v dB je určená vzťahom

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

$p_A(t)$ je časová funkcia akustického tlaku váženého frekvenčnou váhovou funkciou A

T je integračný interval $T = t_2 - t_1$ v sekundách

p_0 je referenčný akustický tlak, $p_0 = 2.10 - 5 Pa$

Zvuková expozícia v $Pa^2 \cdot s$ je určená vzťahom

$$E = \int_{t_1}^{t_2} (p_A(t))^2 dt$$

$p_A(t)$ je časová funkcia akustického tlaku váženého frekvenčnou váhovou funkciou A.

Nasledujúca tabuľka 2.1 slúži pre predstavu hladín hluku pre vybrané zvuky.

Hladina zvuku [dB]	Zvuk
10	Dýchanie
20	Padanie listov
30	Šepot
40	Chladnička
50	Mierny dážď
60	Rozhovor
70	Mestská doprava
80	Kamión
90	Fén
100	Helikoptéra
130	Tryskový motor

Tabuľka 2.1: Hladiny hluku vybraných zvukov

Meranie zvuku sa robí prevodom akustického signálu (tlaku) pomocou mikrofónu na elektrický signál. Používajú sa väčšinou rôzne varianty kondenzátorových mikrofónov pre ich široký frekvenčný rozsah. Nasleduje spracovanie elektrického signálu analógovými elektronickými obvodmi, digitalizácia, digitálne spracovanie a zobrazenie výsledku. Celé jednoúčelové zariadenie sa zvykne nazývať zvukomerom prípadne hlukomerom.

Profesionálne jednoúčelové hlukomery umožňujú ukladanie nameraných údajov v rôznom režime, ich prenos a následné spracovanie v počítači. Takéto jednoduchšie ručné zariadenia majú obvykle cenu od 400 € bez DPH. Profesionálne prístroje (napríklad od firmy Kipp & Zonen začínajú cenovo niekde na 1500 € bez DPH).

Kapitola 3

Meranie kvality ovzdušia

Spôsoby merania jednotlivých znečisťujúcich faktorov sa môžu rozdeliť medzi metódy používané v špecializovaných inštitúciách napr. SHMÚ, ČHMÚ, ktoré sú nákladné ale aj najpresnejšie a metódy využívajúce alternatívne spôsoby merania, ktoré sú síce menej presné, ale výrazne lacnejšie a umožňujú podstatne zahustiť sieť meracích miest ¹.

3.1 Referenčné metódy na sledovanie kvality ovzdušia

Zo smernice EU o kvalite ovzdušia 2008/50/ES [22] priamo vyplývajú referenčné metódy pre meranie jednotlivých znečisťovateľov ovzdušia. Tieto referenčné metódy sú využívané aj v analyzátoroch monitorovacích staníc prevádzkovaných na Slovensku SHMÚ [47], [48] a v Českej republike ČHMÚ [49]. Ceny týchto analyzátorov sú však mimoriadne vysoké a pohybujú sa v rozmedzí cca od 300 tisíc Kč do 1 miliónu Kč za jeden analyzátor merajúci jeden parameter. Rovnako prevádzka takýchto meracích staníc znečistenia je nákladná a pohybuje sa v rozmedzí 150 tisíc až 500 tisíc Kč za rok prevádzky.

Gravimetria

Slúži pre stanovenie koncentrácie pevných prachových častíc (ČSN EN 12341) [50]. Metóda spočíva v určení rozdielu v hmotnosti príslušného filtra pred a po jeho expozícii na vzduchu v príslušnej lokalite a po príslušnú dobu.

Ultrafialová fluorescencia

Je metóda slúžiaca na stanovenie koncentrácie oxidu siričitého (SO₂) v ovzduší (ČSN EN 14212)[51]. Analyzovaná vzorka je ožarovaná UV svetlom a tým dochádza k excitácií molekúl SO₂. Pri prechode molekúl do základného

¹Požiadavok na meranie a hodnotenie kvality ovzdušia je taktiež stanovený v legislatíve EU v smernici o kvalite ovzdušia 2008/50/ES [22] prijatej v roku 2008, ktorá bola do legislatívneho rámca ČR implementovaná Zákonem o ochrane ovzduší č. 201/2012 Sb. [46] v znení neskorších predpisov. Uvedená smernica respektíve zákon definuje všetky aspekty merania kvality ovzdušia vrátane metodických princípov merania.

energetického stavu dochádza k uvoľneniu energie vo forme fluorescenčného žiarenia, ktoré je ďalej detegované a zosilnené fotonásobičom. Toto žiarenie je úmerné koncentrácií oxidu siričitého.

■ Chemiluminiscencia

Je určená na stanovenie koncentrácií NO, NO₂, NO_x (ČSN EN 14211)[52]. Chemiluminiscencia je založená na excitácii molekúl plynu pri reagovaní s iným vhodným plynom – reagentom (čínidlom). Pri následnom prechode molekuly z excitovaného stavu do základného dochádza k uvoľneniu žltosele- ného chemiluminiscenčného žiarenia, ktoré má špecifickú vlnovú dĺžku. Toto žiarenie je následne detegované fotonásobičom. Intenzita žiarenia je lineárnou funkciou koncentrácie plynu. Takto sa dá priamo merať koncentrácia NO. Pre detekciu celkovej koncentrácie NO_x je potrebné plyn previezť cez molybdénový konvertor, v ktorom sa NO₂ redukuje na NO. Koncentrácia NO₂ sa následné dopočítava z rozdielu koncentrácií NO a NO_x.

■ Ultrafialová fotometria

Slúži na stanovenie koncentrácie prízemného ozónu (ČSN EN 14625)[53]. Metóda spočíva v absorpcii UV žiarenia vhodnej vlnovej dĺžky ozónom, čím dochádza k poklesu intenzity UV žiarenia. Pokles intenzity je úmerný koncentrácii absorbentu vo vzorke.

■ Infračervená spektrometria

Metóda určená pre stanovenie koncentrácie CO (ČSN EN 14626)[54]. Pracuje na podobnom princípe ako ultrafialová fotometria. Infračervená svetlo vhodnej vlnovej dĺžky je absorbované molekulami CO čím dochádza k poklesu intenzity žiarenia.

■ 3.2 Alternatívne metódy na sledovanie kvality ovzdušia

Ako už bolo vyššie napísané, prístroje používajúce referenčné metódy na meranie kvality ovzdušia sú veľmi nákladné. Na trhu existujú aj rádovo lacnejšie zariadenia na meranie kvality ovzdušia. V samostatnej časti 3.3 tejto práce budú popísané podrobnejšie niektoré z nich. Medzi senzory využívajúce alternatívne metódy patria nasledujúce.

■ 3.2.1 Senzory plynov

Veľmi dôležitou skupinou v rámci merania kvality ovzdušia je meranie koncentrácií vybraných škodlivých plynov. Existuje pomerne veľké množstvo senzorov plynov založených na rôznych princípoch [55]. Tu budú bližšie zmienené iba tie najrozšírenejšie princípy. Najnovšie údaje z tejto oblasti sa dajú

vyhľadať v špecializovaných časopisoch napr. *Sensors*, *Sensors and Actuators*, *IEEE Sensors Journal* atď.

Najrozšírenejšie sú senzory založené na elektrochemickom princípe. Tieto budú bližšie popísané v samostatnej časti 3.2.2.

■ Metaloxidové senzory

Táto skupina senzorov je založená na meraní zmien elektrónovej vodivosti určitých materiálov v prítomnosti niektorých plyných látok. Sú to takzvané metaloxidové senzory (MOS) a chemirezistory.

Niektoré kysličníky kovov sa chovajú ako polovodiče a sú schopné za zvýšenej teploty na svojom povrchu redukovať kyslík. Ak sa do kontaktu s týmto povrchom dostanú niektoré ľahko oxidovateľné plyny (napr. uhľovodíky) dochádza k reakcii pri ktorej sa uvoľňujú elektróny, čím sa zníži odpor polovodiča.

Konštrukčne sa tieto typy senzorov realizujú buď ako malé trubičky z aktívneho materiálu, vo vnútri trubičky je vyhrievacie vlákno, alebo z tenkovrstvových plochých štruktúr s vyhrievacou plôškou na spodnej strane.

Tieto senzory je možné používať pre širokú škálu plynov, majú pomerne vysokú citlivosť a dlhú životnosť (roky, až do 10 rokov), ale veľkou nevýhodou je zlá selektivita [55].

■ Pelistory

Samostatná skupina senzorov využíva meranie zmien teploty pri chemických reakciách, predovšetkým pri katalytickej oxidácii plyných látok. Tieto senzory sa nazývajú pelistory.

Pelistory sú senzory detegujúce prítomnosť horľavých plynov. Niektoré materiály (kysličníky kovov, čisté kovy) sú schopné pôsobiť ako katalyzátory oxidácie (horenia) pri podstatne nižšej teplote, ako je normálna teplota vzplanutia. Takéto horenie plynu je sprevádzané zvýšením teploty a to je snímané teplotným sensorom. Konštrukčne bývajú riešené ako malé keramické guľôčky alebo valčeky s priemerom cca 1 mm. Na ich povrchu je nanosený potrebný katalyzátor. Vo vnútri je tenký platinový drôtik, ktorý slúži jednak ako výhrevné teliesko a jednak sa využíva jeho zmena odporu v závislosti od teploty. Pri meraní bývajú zapojené do mostíka dva konštrukčne rovnaké pelistory, ale jeden z nich nemá na svojom povrchu katalyzátor. Ich citlivosť sa udáva približne nad 100 ppm. Táto skupina senzorov má pomerne vysokú spotrebu elektrickej energie – vyhrievanie [55].

■ Pyroelektrické senzory

Tieto senzory taktiež využívajú meranie zmien teploty pri chemických reakciách. Pyroelektrické senzory využívajú vlastnosti materiálov označovaných ako pyroelektriká (napr. monokryštál LiTaO_3). Tieto materiály generujú na svojom povrchu zmenu napätia pri zmene toku tepla cez ne. V senzoroch plynov sa používa usporiadanie, kde je napríklad hranolček pyroelektrika

na svojej spodnej strane ohrievaný konštantným výkonom. Na protilahlej strane je nanosená vrstvička chemicky citlivej látky. Na bočných stranách sú snímacie elektródy na meranie pyroelektrického napätia. Pokiaľ na chemicky aktívnu vrstvičku nepôsobí detegovaný plyn, je merané napätie konštantné. Ak sa chemicky citlivá vrstva dostane do kontaktu s detegovaným plynom, dôjde k interakcii spojenej so zmenou teploty tejto vrstvy a tým aj k zmene toku tepla, čo sa prejaví zmenou pyroelektrického napätia. Napríklad pre stanovenie CO je chemicky citlivou vrstvou platinová čerň. Táto skupina senzorov má pomerne vysokú spotrebu elektrickej energie – vyhrievanie [55].

■ QCM a SAW senzory

U iných typov senzorov sa využíva zmena hmotnosti piezoelektrických materiálov spôsobená absorpciou (objemové pohlcovanie) alebo adsorpciou (schopnosť látok viazať na svojom povrchu iné pevné alebo plynné látky) stanovovaných plynov. Táto zmena hmotnosti spôsobuje zmenu ich rezonančnej frekvencie. Na tomto princípe sú založené tzv. kremenné mikrováhy, alebo aj senzory s povrchovou akustickou vlnou.

Senzory typu kremenné mikrováhy bývajú tiež označované skratkami QCM (Quartz Crystal Microbalance), alebo BAW (Bulk Acoustic Wave). Konštrukčne sa jedná o vhodne vyrezanú doštičku z kremenného kryštálu. Na dvoch protilahlých stranách má naparené elektródy, ktorými sa zapojí do obvodu elektronického oscilátora. Frekvencia je určená geometrickými a mechanickými vlastnosťami kryštálového rezu. Na povrchu doštičky je nanosená vhodná chemicky citlivá vrstvička. Býva to najčastejšie látka, ktorá analyt absorbuje. Tým sa zvýši hmotnosť a poklesne frekvencia oscilácii. Veľkosť zmeny frekvencie je okrem iného závislá od druhej mocniny základnej rezonančnej frekvencie. Preto sa používajú frekvencie rádovo jednotky až desiatky MHz. Napríklad pri frekvencii 10 MHz vyvolá merateľnú zmenu (cca 0,1 Hz) už zmena hmotnosti $10^{-10} g \cdot cm^{-2}$. Aby sa dala zmena čo najpresnejšie stanoviť, meria sa zvyčajne rozdiel frekvencií dvoch rovnakých oscilátorov, pričom jeden je v referenčnom prostredí a druhý je exponovaný zisťovaným plynom. Pri meraní je nutné dodržať konštantnú teplotu a konštantný prietok meraného plynu. Závislosť zmeny frekvencie od koncentrácie nie je lineárna.

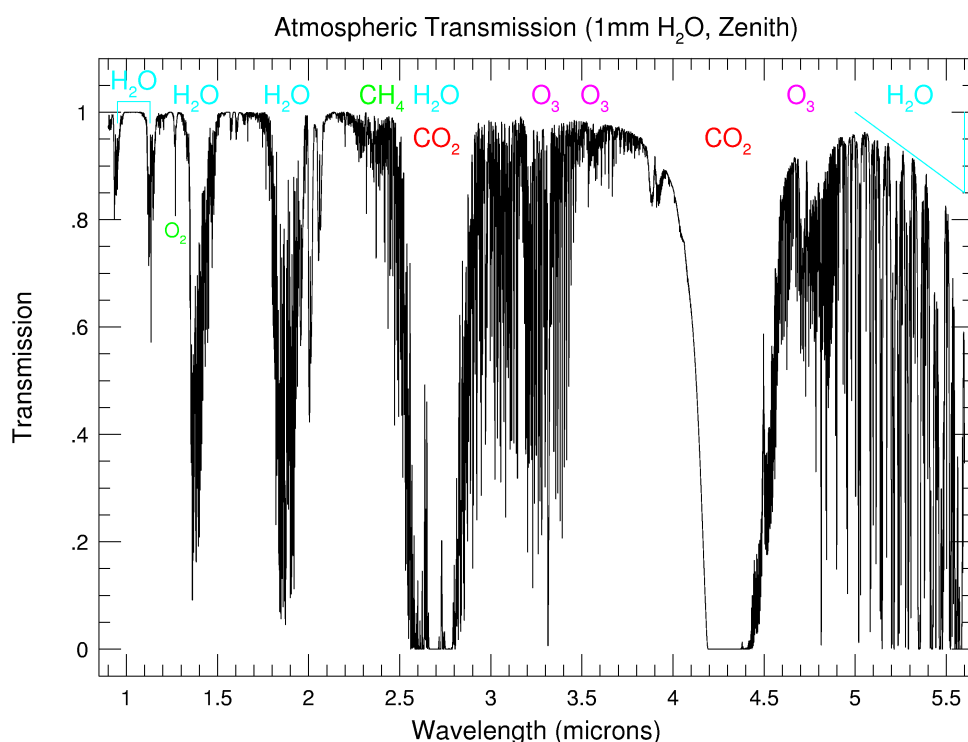
Senzory s povrchovou akustickou vlnou označované skratkou SAW (Surface Acoustic Wave) využívajú piezoelektrický materiál [56]. Na jednom jeho konci sú vytvorené budiace elektródy, ktoré sú pripojené na RF (rádio frekvenčný) vysielač, ktorý rozkmitá piezoelektrický materiál. Po jeho povrchu potom postupuje tzv. Rayleighova povrchová vlna. Na opačnom konci sú generačné elektródy, ktoré túto povrchovú vlnu prevedú späť na elektrický signál. Na povrchu piezoelektrického materiálu je nanosená chemicky citlivá vrstva, ktorá selektívne absorbuje stanovovaný plyn. Tým sa zmení hmotnosť a teda aj rezonančná frekvencia piezoelektrického materiálu. Podobne ako u BAW senzorov, aj tu je zmena rezonančnej frekvencie úmerná druhej mocnine základnej rezonančnej frekvencie. Keďže povrchovú vlnu je možné vyvolať u tenkých piezoelektrických filmov, môže byť aj rezonančná frekvencia až rádu GHz. Preto sú SAW senzory citlivejšie ako BAW a je nimi možné detegovať

zmeny hmotnosti až $10^{-15} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$. Napríklad je nimi možné detegovať NO_2 v koncentrácii od 0,5 ppm, alebo SO_2 od 10 ppb.

Oba tieto typy senzorov (BAW, SAW) vyžadujú pomerne komplikovanú vyhodnocovaciu elektroniku.

■ Optické senzory

Ďalšou skupinou senzorov plynov sú senzory optické. Využívajú interakciu detegovaného plynu a elektromagnetického vlnenia (svetla), ktoré je selektívne absorbované týmto plynom. Na detekciu plynov sa najčastejšie používa infračervené žiarenie v rozsahu 800 nm až $2,5 \mu\text{m}$ a tiež ultrafialové žiarenie v rozsahu 200 nm až 350 nm.



Obrázok 3.1: Príklad závislosti priepustnosti vzduchu od vlnovej dĺžky IR žiarenia. Zdroj: [57]

Závislosť absorpcie od koncentrácie absorbujúcej látky možno z makroskopického pohľadu popísať Lambert-Beerovým zákonom: $I = I_0 e^{-c \cdot \alpha \cdot d}$ [58], kde I_0 je intenzita žiarenia vstupujúceho do detekčnej oblasti (komory), I je intenzita žiarenia po prechode oblasťou detekcie, c je látková koncentrácia detegovaného plynu, d je vzdialenosť na ktorej dochádza k pohlcovaniu žiarenia (hrúbka vrstvy), α je molárny absorpčný koeficient. Porovnaním intenzity vstupujúceho a vystupujúceho žiarenia dokážeme teda určiť koncentráciu absorbujúcej látky.

Tieto senzory sú často pomerne citlivé na mechanické poškodenie.

Na tomto princípe sú bežne dostupné komerčne vyrábané senzory na kontinu-

álne meranie CO₂ vo vzduchu, napríklad od firmy Sensirion.

■ Optoakustické senzory

Viacere molekuly v plynnej fáze majú v infračervenej oblasti (vlnové dĺžky od 1 μm do 15 μm) výrazné absorpčné pásy. Do meracej komôrky (kyvety) s analyzovaným plynom sa vysiela pulzné, alebo amplitúdovo modulované žiarenie s vlnovou dĺžkou, ktorá je absorbovaná stanovovaným plynom. Zdrojom žiarenia sú väčšinou laserové diódy. Absorpciou žiarenia dochádza k zahriatiu plynu úmernému absorbovanej energii a tým aj k zvýšeniu tlaku plynu v kyvete. Tlakové zmeny sú snímané akustickými detektormi napr. elektretovými mikrofónmi. Vhodné mikrofóny a elektronika spracúvajúca signál z nich dokážu detegovať tlakové zmeny vyvolané zmenou teploty rádovo 10^{-7} °C. Amplitúda takto snímaného signálu je úmerná koncentrácii absorbujúcej látky. Detekčné limity týchto senzorov sú rádovo desiatiny až jednotky ppb.

■ 3.2.2 Elektrochemické senzory plynov

Najstaršie elektrochemické senzory sa začali objavovať v 60-tych rokoch dvadsiateho storočia. Významným medzníkom bolo zostrojenie elektródy použiteľnej na meranie koncentrácie kyslíka v krvi, vode a iných tekutinách. Jej vynálezcom je americký biochemik Leland C. Clark (1918 – 2005). Využitím princípu tejto elektródy sa neskôr podarilo zostrojiť aj elektródu na sledovanie hladiny glukózy v krvi. Princípy oboch týchto elektród sa využívajú dodnes v medicíne a sú nepostrádateľnou zložkou diagnostiky a liečby [59], [60], [61].

Sledovanie bezpečnosti pri práci a ochrana zdravia si vyžadovala sledovanie jedovatých, horľavých a škodlivých plynov najprv vo výrobných prevádzkach a postupne aj v externom prostredí. To privedlo k vývoju nových elektrochemických snímačov hlavne v 80-tych rokoch 20-teho storočia. Vznikli tak malé elektrochemické snímače s dobrou citlivosťou a relatívne dobrou špecifickosťou (selektivitou). Dnes sa používa široký sortiment takýchto snímačov v rôznych oblastiach, ako napríklad výrobné závody, automobilový priemysel, zdravotníctvo, monitoring životného prostredia.

Elektrochemické senzory sú založené na princípe, kedy je prúd generovaný v elektrolytickom článku závislý na redukčných alebo oxidačných (redox) reakciách, ktoré prebiehajú na povrchu elektród. Veľkosť prúdu je závislá na koncentrácii detegovaného plynu.

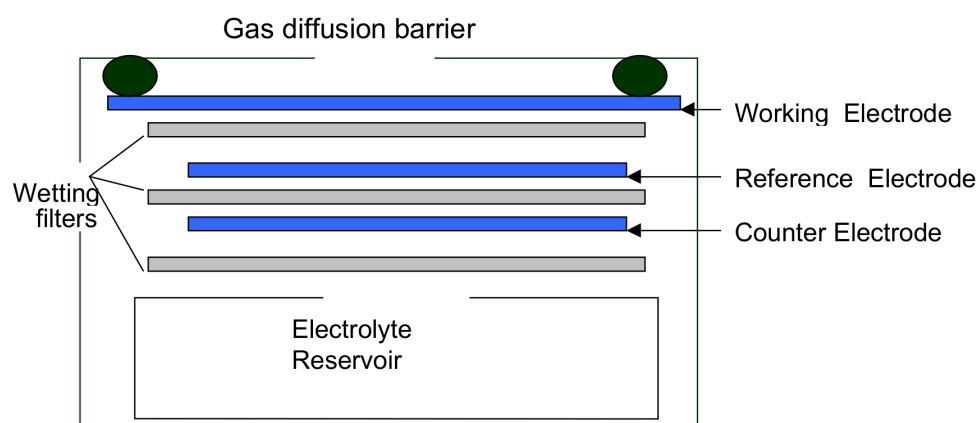
Tieto senzory sa môžu rozdeliť na skupiny podľa rôznych hľadísk. Jedno rozdelenie môže byť podľa toho, či používajú tekutý alebo pevný elektrolyt.

Iné delenie môže byť podľa spôsobu merania výstupného signálu. Jedna skupina sú potenciometrické snímače, u ktorých sa ako výstupný signál berie rozdiel potenciálov na elektródach, pričom vonkajším obvodom prúd (prakticky) netečie. Druhá skupina sú ampérometrické snímače, kde meriame prúd pretekajúci medzi elektródami vonkajším obvodom.

Najjednoduchší elektrochemický senzor pozostáva s dvoch elektród spojených elektrolytom. Na jednu elektródu, ktorá je označovaná ako snímacia

alebo pracovná (working, sensing) elektróda pôsobí detegovaný plyn. Na druhú elektródu, ktorá je označovaná ako protielektróda (counter), plyn nepôsobí. Medzi snímacou elektródou a meraným plynom je väčšinou difúzna bariéra, ktorá obmedzuje množstvo plynu difundujúceho k snímačej elektróde. Vlastnosti tejto bariéry sú dôležité pre citlivosť a rýchlosť reakcie senzoru na detegovaný plyn. Samotné oxidačnoredukčné reakcie detegovaného plynu prebiehajú na povrchu snímačej elektródy. Druh reakcie závisí na detegovanom plyne. Napríklad plyny ako kysličník uhoľnatý, sírovodík, alebo kysličník dusný sú oxidované na snímačej elektróde. Naproti tomu plyny ako dioxid dusíku (kysličník dusičitý), chlór alebo kyslík sú na tejto elektróde redukované. Tieto reakcie vytvárajú prúd tečúci vonkajším obvodom, ktorého veľkosť je úmerná koncentrácii detegovaného plynu. Merať môžeme priamo tento prúd, alebo napätie vznikajúce na zaťažovacom odpore zapojenom medzi elektródami.

Komerčne dostupné elektrochemické senzory sú väčšinou vylepšené verzie hore popísaného princípu. Skladajú sa z membrány, pracovnej elektródy, referenčnej elektródy, protielektródy, elektrolytu a prípadne aj z filtra. Všetko uložené v spoločnom púzdre 3.2.



Obrázok 3.2: Schéma elektrochemického senzora plynu. Zdroj: [62]

Snímaný plyn vstupuje difúziou do senzora cez membránu až na povrch pracovnej elektródy. Membrána má póry, ktoré slúžia tiež na obmedzenie množstva prenikajúceho plynu a zároveň bráni časticiam vody z vonkajšieho prostredia, aby vnikala do elektródy vlhkosť. Veľkosť pórov ovplyvňuje citlivosť a tiež aj selektivitu snímača. Niektoré snímače obsahujú navyše filter na zachytenie nežiaducich častíc, čím sa zlepšuje selektivita senzora.

Keďže reakcie prebiehajúce na pracovnej elektróde menia jej potenciál, používa sa referenčná elektróda na zníženie vplyvu tejto zmeny na celkovú funkčnosť a citlivosť snímača. Referenčná elektróda slúži na udržanie stáleho potenciálu pracovnej elektródy. Pohyb iónov v senzore, vznikajúcich pri elektrochemických reakciách na pracovnej elektróde zabezpečuje elektrolyt.

Prúd pretekajúci vonkajším obvodom medzi pracovnou a protielektródou je úmerný koncentrácii detegovaného plynu. Na získanie samotného výstupného signálu zo snímača (senzora) sa často používa prevodník prúd – napätie [62].

Dnes sa bežne používajú elektrochemické senzory plynov so štyrmi elektró-

dami. Štvrtá elektróda sa zvykne označovať ako pomocná elektróda (auxiliary electrode). Konštrukčne je totožná s pracovnou elektródou, ale nemá k nej prístup meraný plyn. Slúži tak ako stála „referencia nuly“ a dá sa pomocou signálu z nej zistiť okamžitý vplyv zmien prostredia (hlavne teploty) na výstupnú veličinu senzora.

Elektrochemické senzory plynov na monitorovanie prostredia vyrába a predáva viaceró firmám (napr.: Alphasense Ltd, SGX Sensortech (IS) Ltd, Delphian Corporation, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd, ...) a bežne sa používajú v lacných prístrojoch na monitorovanie ovzdušia.

■ 3.2.3 Detekcia prachových častíc (PM)

Optické systémy na detekciu častíc rozptýlených či už v plynnom alebo kvapalnom prostredí vo všeobecnosti pozostávajú z týchto častí:

- Laser ako zdroj svetla s príslušnou optiku na osvetlenie detekčného priestoru.
- Detekčný priestor s riadeným prietokom média – plynu alebo kvapaliny.
- Fotodetektor, ako zariadenie citlivé na intenzitu svetla a jeho prevod na elektrický signál. Reaguje na zvýšenie, alebo pokles intenzity spôsobenej prechodom častíc cez dráhu svetelného lúča.
- Analyzátor intenzity impulzov z fotodetektora. Triedi elektrické impulzy z fotodetektora podľa veľkosti, ktorá zodpovedá veľkosti častíc prechádzajúcich lúčom.
- Podporné elektronické obvody. Slúžia hlavne na konvertovanie veľkosti impulzov na výstupné dáta.

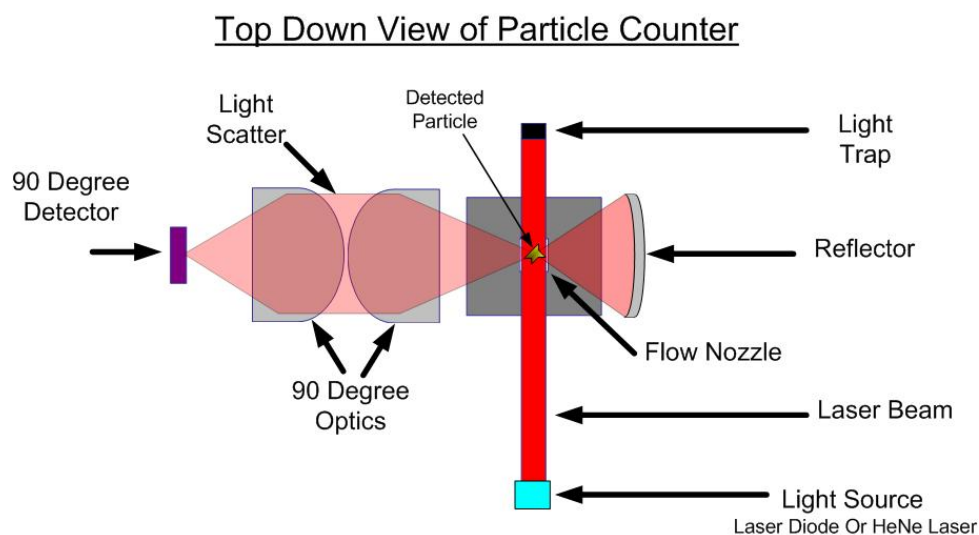
Tieto systémy sa môžu ešte rozdeliť podľa metódy detekcie častíc na:

- Systémy detegujúce pokles intenzity svetla spôsobenej prechodom častice cez svetelný lúč. Tu je zdroj svetla (laser), optika a fotodetektor v jednej línii. Tento spôsob je typicky použiteľný na detekciu častíc väčších ako $1\mu m$.
- Systémy detegujúce zvýšenie intenzity svetla, ktoré vzniká rozptylom na detegovaných časticiach. Tu je svetelný lúč kolmý na smer snímania fotodetektora a optiku. Tento spôsob je schopný detegovať výrazne menšie častice. Typická citlivosť je viac ako $0,05\mu m$. Rozšírením tejto techniky využitím počítania kondenzačných jadier (CNC / CPC)² je

²Princíp techniky CNC (Condensation Nucleus Counter) / CPC (Condensation Particle Counter) je založená na jave, že aj tie najmenšie častice znečistenia v plyne (vzduchu) sa stávajú za vhodných podmienok kondenzačnými jadrami okolo ktorých môže kondenzovať vhodná plynná látka a vytvárať tak väčšie kvapôčky, ktoré sa už dajú detegovať metódou rozptylu svetla. V takomto zariadení prechádza plyn (vzduch), v ktorom chceme častice detegovať, najprv cez komoru s nasýtenými parami napríklad alkoholu. Potom táto zmes vstupuje do chladiacej časti, kde dochádza ku kondenzácii a následne už ide do „klasického“ zariadenia na stanovenie častíc [63].

3.3. Existujúce zariadenia využívajúce iné ako referenčné metódy sledovania kvality ovzdušia

možné detegovať častice s rozmermi nanometrov alebo ešte menej. Táto technika sa využíva hlavne na detekciu v ultračistých priestoroch.



Obrázok 3.3: Princíp optickej detekcie častíc. Zdroj: [62]

3.3 Existujúce zariadenia využívajúce iné ako referenčné metódy sledovania kvality ovzdušia

Vzhľadom na vysoké ceny zariadení, ktoré využívajú referenčné metódy merania znečistenia, existuje aj druhá skupina zariadení, používajúca alternatívne metódy merania, hlavne na meranie koncentrácie jednotlivých plynov. Nespornou výhodou takýchto zariadení je výrazne nižšia obstarávacía cena a nízke prevádzkové náklady.

Aby však tieto zariadenia mohli byť používané k oficiálnemu dlhodobému meraniu kvality ovzdušia, museli by buď používať metódy definované v platných zákonoch resp. v európskej legislatíve o kvalite ovzdušia 2008/50/ES [22], alebo by museli splniť náročné požiadavky danej legislatívy a získať tak test ekvivalencie. Následne by mohli byť používané na dlhodobé odborné meranie kvality ovzdušia.

Medzi dostupné zariadenia, ktoré slúžia na cenovo prístupné monitorovanie kvality ovzdušia s využitím alternatívnych spôsobov merania patria napríklad:

Agdata city

Jedná sa o zariadenie českej firmy Agdata sídliacej v Brne. Medzi merané parametre patrí teplota, vlhkosť vzduchu, atmosférický tlak, koncentrácia plynov NO_2 , SO_2 , O_3 , CO , prachové častice. Dáta sú odosielané pomocou bezdrôtových sietí LoraWan alebo NB-IoT. Namerané dáta sú zbierané a

archivované u dodávateľa a prístup k nim je umožnený cez webové rozhranie. Firma poskytuje aj službu zasielania výstražných SMS po prekročení stanovených limitov. Zariadenie je napájané napätím 230V. Cena zariadení sa pohybuje podľa počtu meraných parametrov rozmedzí od 890 Kč do 6990 Kč mesačne [64].

Airly

Zariadenie od Polskej firmy, ktoré v základnej verzii poskytuje meranie teploty, vlhkosti, atmosférického tlaku a prachových častíc PM₁ až PM₁₀. Existujú aj dve rozšírené verzie, ktoré dokážu merať koncentráciu vybraných dvojíc plynov, a to konkrétne buď NO₂ a O₃ alebo SO₂ a CO. Prachové častice sú merané pomocou laserovej metódy a koncentrácie plynov využitím elektrochemických senzorov. Zariadenie využíva na prenos dát GSM technológiu prípadne vie komunikovať aj s využitím WiFi či LoRa rozhrania. Kompaktné zariadenie je vybavené aj indikačnou diódou, ktorá zmenami farby informuje o aktuálnej kvalite ovzdušia. Namerané dáta je možné zobrazit v interaktívnej mape výrobcu alebo v mobilnej aplikácii. Výrobca taktiež poskytuje API, cez ktoré je možný prístup k surovým aktuálnym ako aj historickým dátam za účelom ďalšieho spracovania. Zariadenie vyžaduje napájanie napätím 5 V, ktoré je poskytované externým zdrojom so vstupným striedavým napätím 110 - 230 V. Cena zariadenia je v prípade lacnejšej verzie 465 € (11 812 Kč) a pre drahšie verzie s meraním koncentrácie plynov 1195 € (30 357 Kč). Základný prístup do API rozhrania je zadarmo v prípade vyšších požiadaviek je cena približne 300 € (7 620 Kč) za mesiac [65].

ARISense

Zariadenie ARISense od firmy Aerodyne Research, Inc. sídliacej v USA disponuje možnosťami orientačného merania koncentrácie štyroch plynov (CO, NO, NO₂, O₃) pomocou elektrochemických senzorov a koncentráciu CO₂, ktorá je meraná využitím NDIR infračerveným sensorom. Na meranie prachových častíc je využitý laserový senzor, ktorý poskytuje dáta o veľkosti a počtu prachových častíc. Medzi ďalšie merané veličiny patrí teplota, vlhkosť a tlak vzduchu. Zariadenie ARISense taktiež poskytuje údaje o intenzite slnečného žiarenia a údaje o intenzite okolitého hluku. Vzduch je do zariadenia aktívne vhaňaný pomocou ventilátorov, čím sa znižuje čas potrebný na odozvu na zmenu podmienok. Merané údaje sa buď môžu zhromažďovať lokálne v zariadení alebo môžu byť posielané prostredníctvom internetového pripojenia do Cloudu a to v nastaviteľnom intervale každých 5-60 sekúnd. Dáta je možné následne si prezerat v grafoch či na mape priamo na stránkach výrobcu, prípadne si ich stiahnuť. Zariadenie je možné doplniť senzormi na meranie rýchlosti a smeru vetra. Napájanie je možné striedavým napätím 120 - 240 V [66].

Cenu zariadenia sa nepodarilo verejne dohľadať.

■ AirTracker

AirTracker je zariadenie, ktoré vzniklo na dopravnej fakulte ČVUT. Jedná sa o kompaktné zariadenie určené na online orientačné meranie životného prostredia. Medzi merané parametre patrí prach, hlučnosť, koncentrácia prchavých organických látok a voliteľné koncentrácie plynov (CO, H₂S, NO, NO₂, O₃, SO₂). Zariadenie umožňuje bezdrôtovú komunikáciu prostredníctvom siete SigFox alebo LoRa. Na zobrazovanie aktuálne meraných ale aj historických dát je poskytovaný vizualizačný systém, ktorý poskytuje aj možnosť vyhodnocovania trendov. Zariadenie je možné napájať napätím 24 - 230 V / 50Hz a je zapúzdrené s krytím IP 65 [67].

■ AQM-09

AQM-09 je zariadenie na monitorovanie kvality ovzdušia od čínskej spoločnosti Oceanus. Medzi parametre, ktoré zariadenie meria patrí teplota, vlhkosť, rýchlosť a smer vetra, tlak vzduchu, koncentrácie prachových častíc a koncentrácie vybraných plynov (CO, O₃, SO₂, NO₂). Prachové častice sú merané pomocou technológie rozptylu svetla a na meranie koncentrácie plynov sú použité elektrochemické senzory. Za účelom zrýchlenia odozvy je vzduch aktívne vháňaný do zariadenia. Spôsoby komunikácie sú buď pomocou metalického vedenia a to komunikačnými rozhraniami RS485/RS232/Ethernet, alebo bezdrôtovo využitím technológie 3G/4G/WiFi. Pre okamžité zobrazenie dát je možné zariadenie doplniť LED displejom zobrazujúcim merané dáta. Zariadenie disponuje krytím IP65 a je možné ho napájať buď striedavým napätím 230 V alebo pomocou solárneho panela. Cena zariadenia sa pohybuje v rozsahu od 2000 \$ (43 816 Kč) do 8000 \$ (175 264 Kč) v závislosti od konfigurácie [68].

Kapitola 4

Komponenty a technológie

Podľa zadania sa má urobiť výber vhodných senzorov, navrhnuť a realizovať prototyp. Keďže hlavne u senzorov plynov sa zvažovalo viacero variant a viacero výrobcov, tak sa nakoniec rozhodlo navrhnuť a realizovať najprv testovacie zariadenie, kde by sa dala vyskúšať funkčnosť niekoľkých druhov senzorov plynov a tiež zapojenie niektorých elektronických obvodov. Až potom by sa navrhol a zrealizoval prototyp zariadenia v ktorom by sa využili skúsenosti z testovacieho kusu. Niektoré komponenty, bloky a obvody z testovacieho zariadenia sa ukázali ako vyhovujúce, ale niektoré sa museli prepracovať. Pri popise jednotlivých komponentov sa preto bude uvádzať, či boli použité v oboch zariadeniach alebo iba v jednom. Podrobnejšie sa bude v tejto kapitole popisovať zloženie a konštrukciu prototypu. Obe zariadenia, testovacie aj prototyp boli navrhované s tým, aby spĺňali základné požiadavky zadania, ale testovací kus mal jednoduchšiu hlavne mechanickú konštrukciu, aby sa dala ľahšie a rýchlejšie realizovať.

Vzhľadom na zlú epidemiologickú situáciu pre pandémiu COVID-19 a z toho vyplývajúce problémy s cestovaním, karanténami a zatváraním škôl boli obe zariadenia kompletne skonštruované a vyhotovené v domácich podmienkach. Problémy sa vyskytli aj s objednávaním niektorých súčiastok („čipová kríza“) hlavne z priestoru mimo EU, kde sa dodacie lehoty ešte natahovali aj kvôli nutnosti oficiálneho prelievania.

4.1 Požiadavky na zariadenie

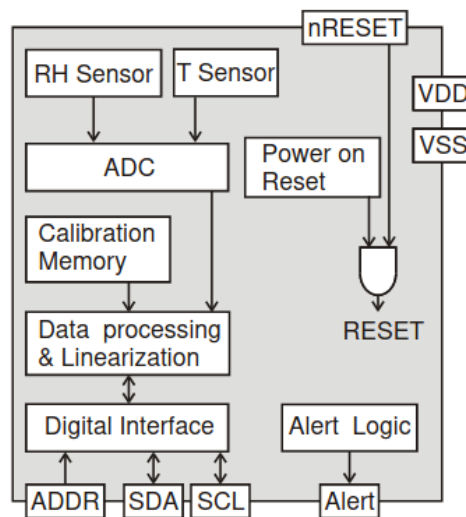
Podľa zadania práce má zariadenie merať rôzne parametre vonkajšieho prostredia. Jednak to budú merania koncentrácie niekoľkých plynov, potom je to meranie koncentrácie prachových častíc, meranie UV žiarenia, meranie teploty, vlhkosti a meranie intenzity hluku. Na meranie týchto rozmanitých parametrov sa budú musieť použiť senzory založené na rôznom princípe, rozlične konštrukčne vyhotovené a s rozličnými požiadavkami na prevádzkové podmienky. Z toho vyplývajú aj niektoré, na prvý pohľad protichodné, požiadavky na konštrukciu zariadenia, aby sa vytvorili vhodné podmienky na prácu všetkých senzorov. Vyhotovenie vonkajšieho obalu zariadenia musí byť dostatočne robustné a musí poskytovať ochranu pred poveternostnými vplyvmi pre všetky jeho komponenty, keďže sa predpokladá dlhodobé umiestnenie

Typ SHT21 má iba jednu pevnú adresu, ale inú ako SHT31-DIS, takže všetky tri senzory môžu byť na jednej I2C zbernici.

V nasledujúcej tabuľke sú zhrnuté základné technické parametre oboch senzorov na základe údajov výrobcu [69], [70].

Parameter	SHT21	SHT31-DIS	Jednotka
Rozmery	3 x 3 x 1,1	2,5 x 2,5 x 0,9	mm
Napájacie napätie	2,1 - 3,6	2,4 - 5,5	V
Spotreba pri meraní	0.9	2	mW
Response time - T	5 - 30	>2	s
Response time - RH	8	8	s

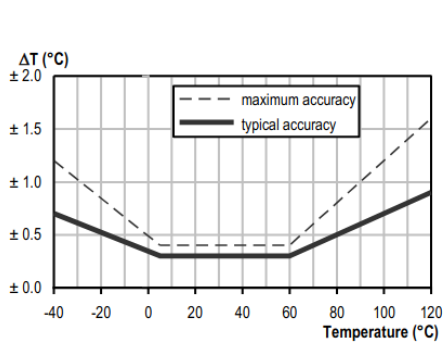
Tabuľka 4.1: Základné parametre senzorov SHT21 a SHT31



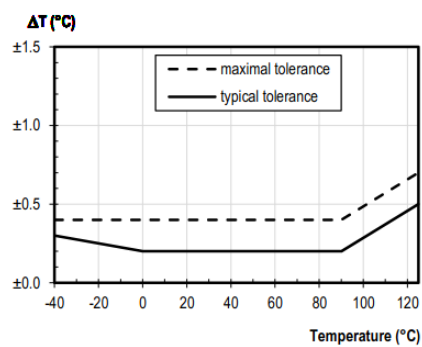
Obrázok 4.1: Blokový diagram vnútorného zapojenia senzora SHT31. Zdroj: [70]

Presnosti merania oboch parametrov pre oba typy senzorov v celom meracom rozsahu sú v grafoch na obrázkoch 4.2 a 4.3.

Tieto typy senzorov sa veľmi osvedčili či už v zariadeniach, realizovaných dávnejšie ale aj v skúšobnom zariadení v rámci tejto práce, a tak boli použité aj v prototypy senzorickej platformy pre monitoring parametrov vonkajšieho prostredia.

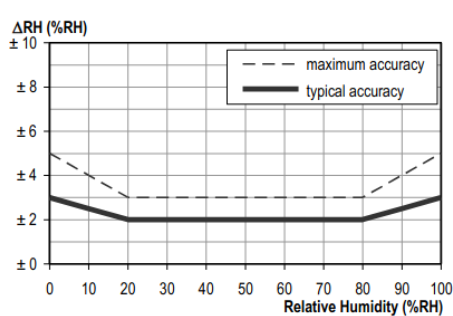


(a) : SHT21. Zdroj: [69]

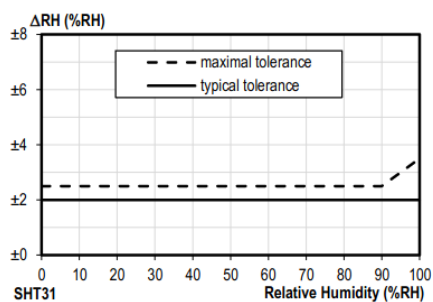


(b) : SHT31. Zdroj: [70]

Obrázok 4.2: Presnosť merania teploty



(a) : SHT21. Zdroj: [69]



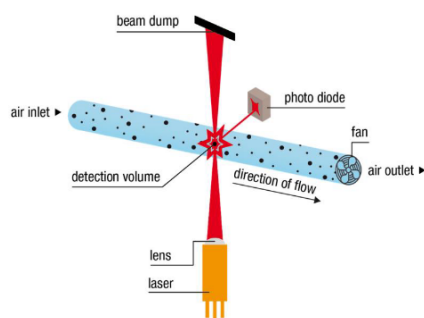
(b) : SHT31. Zdroj: [70]

Obrázok 4.3: Presnosť merania vlhkosti

4.2.2 Senzor prachových častíc - PM

Pre zariadenie bol z komerčne a cenovo prijateľných senzorov na detekciu prachových častíc vybraný na základe porovnania dostupných údajov senzor Particulate Matter Sensor SPS30 od švajčiarskej firmy Sensirion.

Pracuje na základe detekcie rozptylu laserového svetla na časticách znečistenia. Viď obrázok 4.4.



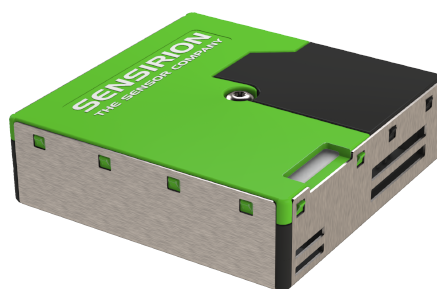
Obrázok 4.4: Princíp merania SPS30. Zdroj: [71]

Senzor poskytuje výsledky jednak ako počet častíc v cm^3 a tiež v $\mu g/m^3$. Obe hodnoty udáva pre štyri kategórie prachových častíc: $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, $PM_{4,0}$, PM_{10} .

Údaj o počte častíc v jednotlivých kategóriách je primárny údaj, ktorý senzor meria a je dostatočne presný. Údaj o množstve mikrogramov v metri kubickom je údaj odvodený, získaný určitým algoritmom, lebo vzťah medzi hmotnosťou a veľkosťou častice nie je jednoznačný a je závislý aj od tvaru častice a jej indexu lomu. Preto sa údaje senzorov od jednotlivých výrobcov, založených na rozptyle svetla môžu odlišovať navzájom a tiež od presnejších gravimetrických metód používaných v drahých a rozmerných referenčných prístrojoch.

Firma Sensirion zabezpečuje kontrolu a správnosť kalibrácie svojich senzorov podľa referenčných prístrojov (napr. TSI Optical Particle Sizer Model 3330, alebo TSI DustTrak™ DRX 8533). Aby senzory pevných častíc od firmy Sensirion založené na rozptyle svetla mohli dávať výsledky PM_{10} a $PM_{4,0}$ v $\mu g/m^3$ v reálnom čase, používajú určité zjednodušenie a tieto hodnoty vypočítavajú na základe stanovenia $PM_{0,5}$, $PM_{1,0}$ a $PM_{2,5}$ a použitia typických profilov aerosólov [71].

- Rozsah stanovenia počtu častíc v objeme je 0 - 3000 častíc/ cm^3
- Presnosť stanovenia počtu častíc $PM_{0,5}$, $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ v objeme 1 cm^3 pre rozsah 0 - 1000 častíc/ cm^3 je ± 100
- pre rozsah 1000 - 3000 častíc/ cm^3 je $\pm 10\%$ meranej hodnoty
- Rozmery samotného senzora sú: 41,2 x 41,2 x 12,3 mm
- Napájacie napätie senzora je 5,0 V, (povolený rozsah je od 4,5 V - 5,5 V)



Obrázok 4.5: Particulate Matter Sensor SP30. Zdroj: [72]

- Prúd senzora je závislý od toho v akom móde sa nachádza. Najnižší je v „Sleep-Mode“ a to maximálne $50 \mu\text{A}$. V „Idle-Mode“ je to maximálne $360 \mu\text{A}$. V „Measurement-Mode“ je to typicky 55 mA , ale môže sa pohybovať v rozsahu od 45 mA do 65 mA

S okolím dokáže senzor komunikovať pomocou rozhrania UART rýchlosťou 115200 bit/s a tiež I2C s adresou $0x69$ a maximálnou rýchlosťou 100 kbit/s . [71]

Tento senzor bol použitý aj v testovacom zariadení aj v prototypu.

4.2.3 Riadiaca jednotka

Jej úlohou je predovšetkým zber a základné spracovanie všetkých signálov z meracích senzorov z rôznych komunikačných protokolov a zberníc. Ukladá tieto predspracované údaje a v pravidelných intervaloch ich posiela cez NB-IoT na ďalšie spracovanie a prezentáciu. Taktiež ich môže ukladať priebežne na SD kartu, ktorá je súčasťou zariadenia. Riadiaca jednotka tiež ovláda ventilátory zabezpečujúce cirkuláciu vzduchu.

Po zvážení potrebných výpočtových a komunikačných parametrov, možnosti pripojenia perifériei, rýchlosti a jednoduchosti tvorby programov, ale aj dobrých skúsenostiach z použitia v iných zariadeniach bol vybraný mikrokontrolér ESP32.

ESP32 je SoC (System on Chip) integrovaný obvod obsahujúci procesor Xtensa s Harvardskou architektúrou a jedným ULP (Ultra Low Power) procesorom. Vyvinula ho čínska spoločnosť Espressif Systems založená v Šanghaji. Najstaršia verzia sa začala predávať v septembri 2016. Na jeho výrobu je použitá 40 nm CMOS technológia. Jeho hlavné zameranie je ako lacná a výkonná riadiaca jednotka do embedded, IoT a nositeľných (wearable) zariadení. Medzi hlavné výhody patrí priamo zabudované Wi-Fi a Bluetooth rozhranie. Obsahuje v sebe antény prepínač, výkonový výstupný RF zosilňovač, nízkošumový vstupný RF zosilňovač. Má širokú paletu komunikačných protokolov s perifériami, napríklad: $4 \times \text{SPI}$, $2 \times \text{I}^2\text{S}$, $2 \times \text{I}^2\text{C}$, $3 \times \text{UART}$, 16 kanálové PWM. Má k dispozícii 34 programovateľných GPIO pinov, 2×12 -bit SAR ADC (dohromady 18 kanálov), 2×8 -bit DAC a množstvo ďalších výhodných vlastností.

Firma Espressif Systems vyrába viacero variant integrovaného obvodu ESP32 líšiacich sa veľkosťou zabudovanej pamäte, počtom jadier a výkonnosťou hlavného procesora.

Keďže integrovaný obvod ESP32 má veľmi malé rozmery iba 5 x 5 mm a tiež pre jeho správnu funkciu je potrebné pridať ešte ďalšie periférne komponenty vrátane antény je jeho samostatné praktické použitie náročnejšie. Preto sú na trhu dostupné moduly s integrovaným obvodom ESP32, flash pamäťou a potrebnými pasívnymi periférnymi komponentami. Ako sú napríklad filtračné kondenzátory, pull-up a pull-down rezistory, ale aj impedančné prispôsobenie medzi integrovaným obvodom a anténou vo forme π - článku. Existujú moduly s PIFA anténou priamo umiestnenou na PCB, ale aj moduly s U.FL konektorom na pripojenie externej antény

Konkrétne v našom zariadení sme použili modul ESP32-WROOM-32 s integrovanou anténou na PCB [73].

- Celkový rozmer modulu je 18 x 25,5 x 3,1 mm
- Napájacie napätie typicky je 3,3 V, povolený pracovný rozsah od 3,0 V do 3,6 V
- Priemerná hodnota odoberaného prúdu je 80 mA, pričom maximálna hodnota je 500 mA
- Rozsah pracovných teplôt je od -40 do +85 °C

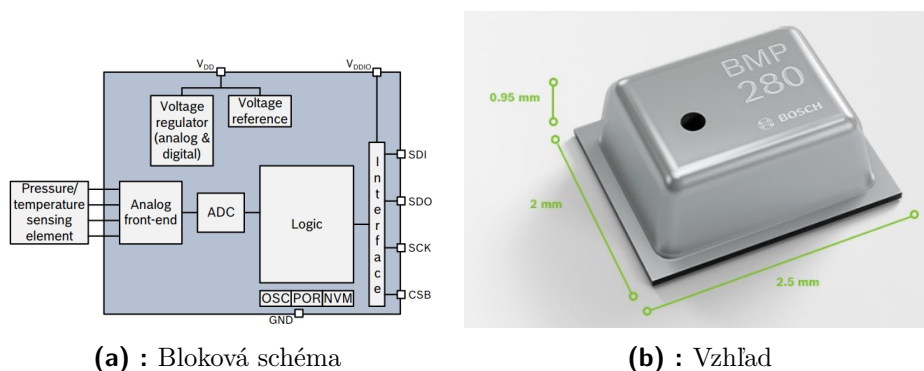


Obrázok 4.6: Vzhľad modulu ESP32-WROOM-32. Zdroj: [73]

Tento modul bol použitý aj v testovacom zariadení aj v prototypu.

■ 4.2.4 Senzor atmosférického tlaku

Podľa katalógových údajov, ale aj zo skúsenosti s ich použitím sa rozhodlo použiť na meranie atmosférického tlaku senzor BMP280 od nemeckej firmy Bosch.



(a) : Bloková schéma

(b) : Vzhľad

Obrázok 4.7: Senzor BMP280. Zdroj: [74]

Je to senzor merajúci absolútny atmosférický tlak. Pre svoje miniatúrne rozmery a veľmi nízku spotrebu je určený do mobilných zariadení napájaných batériami.

Je založený na osvedčenej technológii piezorezistívneho snímača tlaku Bosch. Táto technológia sa vyznačuje vysokou presnosťou a linearitou, ako aj dlhodobou stabilitou a vysokou odolnosťou voči elektromagnetickému rušeniu [74].

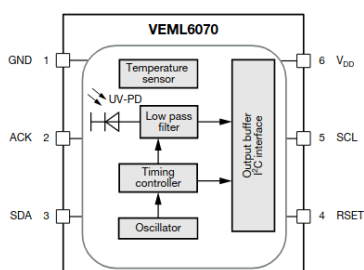
Základné parametre tohto senzora sú nasledovné:

- Rozsah meraného tlaku: od 300 do 1100 hPa
- Operačný rozsah teploty: od -40 do +85 °C
- Absolútna presnosť: ± 1 hPa v rozsahu 950 až 1050 hPa a teplôt od 0 do 40 °C
- Relatívna presnosť: $\pm 0,12$ hPa
- Napájacie napätie: od 1,71 do 3,6 V
- Napájanie komunikačného rozhrania: od 1,2 do 3,6 V
- Prúd odoberaný pri meraní: typicky 720 μA , maximálne 1120 μA
- Odber mimo merania: maximálne 0,5 μA
- Mechanické rozmery: 2,5 x 2,0 x 0,95 mm
- Komunikačné rozhranie: I2C a SPI

Pri tomto senzore sa tiež prejavila kríza vo výrobe mikroelektronických súčiastok a v čase, keď sa realizovalo testovacie zariadenie, sa vôbec nepodarilo tento senzor zohnať. Našťastie sa ho podarilo aspoň dodatočne doplniť do hotového prototypu.

4.2.5 Senzor UV žiarenia

Na meranie intenzity ultrafialového žiarenia bol vybraný senzor VEML6070. Výber bol realizovaný iba na základe katalógových údajov, údajov o jeho aplikáciách dostupných na internete a možnosti obstarania senzora v primeranom čase a finančnom rozsahu. Senzor vyrába firma Vishay Intertechnology, Inc. z USA. Je vyrobený CMOS technológiou. Obsahuje fotodiódu, zosilňovače a analógovo – digitálne obvody v jednom integrovanom obvode. Používa Filtron™ UV technológiu, ktorá poskytuje najlepšiu spektrálnu citlivosť na pokrytie želaného pásma a linearitu.



Obrázok 4.8: Bloková schéma UV senzora. Zdroj: [75]

Základné technické parametre tohto senzora sú nasledovné:

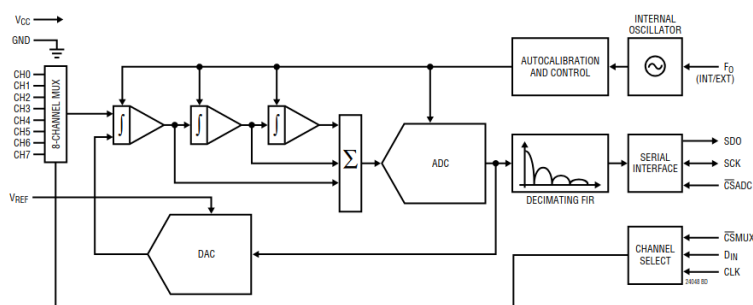
- Napájacie napätie: 2,7 – 5,5 V
- Odoberaný prúd počas merania: typicky 100 μA
- Najvyššia citlivosť pri: 355 nm
- Operačný rozsah teploty: od -40 do +85 °C, v tomto rozsahu účinkuje aj teplotná kompenzácia
- Rozmery: 2,35 x 1,8 x 1,0 mm
- Komunikačné rozhranie: I2C

Podľa aplikačného listu výrobcu [24] je možné zmenou hodnoty jedného odporu pripojeného na vstup RSET meniť integračnú dobu snímania od 62,5 do 2000 ms. Týmto nastavením sa dá vlastne meniť citlivosti senzora.

V tom istom dokumente výrobca uvádza aj tabuľky prevodu nameranej číselnej hodnoty vyčítanej zo senzora a hodnotou UV indexu pre rôzne nastavenia citlivosti senzora:

UVI	R _{SET} = 270 k Ω ; IT = 1T	R _{SET} = 270 k Ω ; IT = 2T	R _{SET} = 270 k Ω ; IT = 4T	UV-INDEX
≥ 11	≥ 2055	≥ 4109	≥ 8217	Extreme
8 to 10	1494 to 2054	2989 to 4108	5977 to 8216	Very High
6, 7	1121 to 1494	2242 to 2988	4483 to 5976	High
3 to 5	561 to 1120	1121 to 2241	2241 to 4482	Moderate
0 to 2	0 to 560	0 to 1120	0 to 2240	Low

Obrázok 4.9: UV index. Zdroj: [24]



Obrázok 4.10: Blokový diagram AD prevodníka. Zdroj: [77]

4.2.7 Primárny napájací zdroj

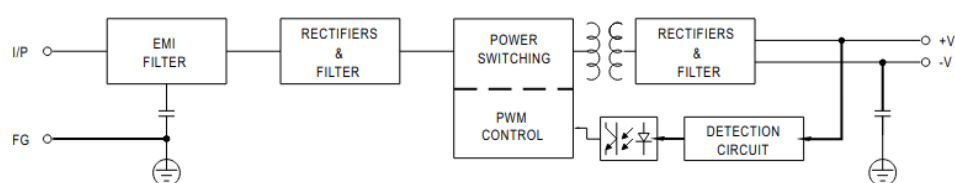
Na základe vyhodnotenia nárokov jednotlivých komponentov na napájacie napätie a odoberaný výkon, bolo rozhodnuté použiť jedno hlavné napájacie napätie 12 V DC pre všetky elektrické bloky zariadenia. Pre toto napätie sa rozhodlo jednak preto, že žiadna súčiastka nevyžaduje na svoju prevádzku vyššie napätie a tiež z ohľadom na budúce možné napájanie z fotovoltaického panelu a vstavaného akumulátora. Pre komponenty (súčiastky), ktoré vyžadujú nižšie napájacie napätie boli na hlavnej doske elektroniky realizované sekundárne napájacie zdroje. Jeden, ktorý zníži centrálné napätie 12 V DC na napätie 5 V DC s maximálnym odberom 1 A. Druhý, ktorý zníži centrálné napätie 12 V DC na napätie 3,3V DC s maximálnym odberom 1 A.

Ako zdroj centrálného napájania 12 V DC pre prototypovú stanicu bol vybraný hotový továrenský modul RS-15-12 od čínskej firmy Mean Well.

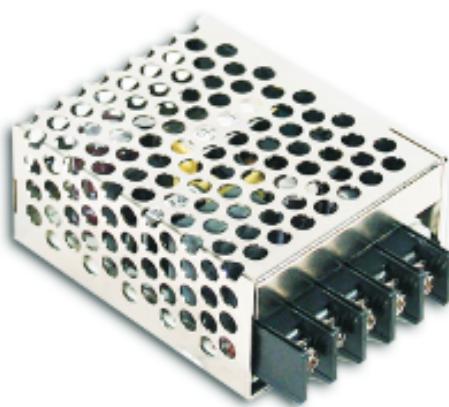
Je to impulzný napájací zdroj v kovovej krabicike určený na priemyselné použitie v náročných podmienkach. [79]

Základné technické parametre:

- Vstupné napätie: 85 – 264 V AC
- Frekvenčný rozsah vstupného napätia: 47 – 63 Hz
- Účinnosť: 81 %
- Rozsah nastavenia výstupného napätia: 10,8 – 13,2 V
- Výstupný prúd: do 1,3 A
- Rozsah pracovnej teploty: od -20 °C do +70 °C
- Rozsah pracovnej vlhkosti: 20 – 90 % - nekondenzujúca
- Vstavaná ochrana proti: skratu, preťaženiu, prehriatiu
- Vyhovuje bezpečnostným štandardom: UL60950-1, TUV EN60950-1
- Z hľadiska EMC je v zhode s predpismi EN61000
- Mechanické rozmery: 62,5 x 51 x 28 mm



Obrázok 4.11: Blokový diagram primárneho zdroja. Zdroj: [79]



Obrázok 4.12: Vzhľad primárneho zdroja. Zdroj: [79]

4.2.8 Moduly napájacieho napätia 3,3 V DC a 5,0 V DC

Zariadenie ako celok je napájané jedným jednosmerným napätím 12 V, ktoré bolo zvolené aj z ohľadom na budúcu možnosť napájať zariadenie zo zálohovacieho akumulátora a fotovoltaiického panela. Jednotlivé moduly použité v zariadení ale potrebujú pre svoju činnosť aj iné napájacie napätie a to 5 V a 3,3 V. Z tohto dôvodu boli v zariadení realizované aj obvody, ktoré konvertujú základné napätie 12 V aj na tieto sekundárne napätia.

Boli použité dva hotové továrenské moduly. Ich technické údaje sú uvedené v nasledujúcom texte.

Moduly majú označenie VXO7803-1000 a VXO7805-1000 a vyrába ich firma CUI Inc. z USA.

Výrobca ich označuje ako neizolovaný DC spínaný regulátor [80].

Bloková schéma vnútorného zapojenia nie je k dispozícii.

Základné technické parametre rozdielne pre oba moduly sú v tabuľke 4.2

Parameter	VXO7803 -1000	VXO7805 -1000	Jednotka
Rozsah vstupného napätia	6 - 36	8 - 36	V
Výstupné napätie	3,3	5,0	V
Max. výstupný prúd	1000	1000	mA
Max. výstupný výkon	3.3	5.0	W
Účinnosť pri $V_{IN}=12V$, max. záťaž	90	90 (odhad)	%

Tabuľka 4.2: Rozdiel parametrov VXO7803 a VXO7805

Spoločné parametre:

- Odoberaný prúd bez výstupnej záťaže: typicky 0,1 mA, max. 1,0 mA
- Ochrana výstupu: proti skratu
- Presnosť výstupného napätia: $\pm 2\%$
- Spínacia frekvencia: 420 – 620 kHz
- Rozsah pracovných teplôt: od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Certifikované podľa bezpečnostných štandardov: UL60950-1 a EN62368
- EMI/EMC vyhovuje podľa: EN55032 a EN55024
- Mechanické rozmery: 11,5 x 17,5 x 7,5 mm



Obrázok 4.13: Vzhľad spínaného regulátora série VXO078xx-1000. Zdroj: [80]

Tieto moduly boli použité až v prototypovom zariadení.

■ 4.2.9 Senzory plynov

Určite najkomplikovanejší bol výber aký druh, typ a výrobca senzorov plynov sa použije v zariadení. Hlavne z tohto dôvodu sa rozhodlo, že bude postavené aj testovacie zariadenie, na ktorom sa vyskúša niekoľko typov senzorov od viacerých výrobcov. Samozrejme pri výbere sa prihliadalo aj k rôznym dostupným zverejneným údajom a štúdiám, kde sa popisujú skúsenosti s niektorými senzormi.



Obrázok 4.14: Senzor MQ-7. Zdroj: [83]

■ Elektrochemické senzory

Druhou veľkou skupinou senzorov, ktorá bola prakticky skúšaná, sú senzory pracujúce na elektrochemickom princípe. O základoch ich činnosti je bližšie písané v časti 3.2.2 tejto práce.

Z tejto skupiny boli zakúpené nasledovné senzory:

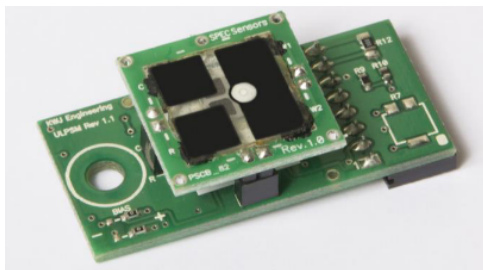
1. ZE03-CO od čínskej firmy Winsen [84] – je to trojelektrodový senzor so zabudovanou vyhodnocovacou elektronikou, ktorá zabezpečuje vyhodnotenie meranej koncentrácie vrátane korekcie vplyvov teploty prostredia. Poskytuje digitálny UART výstup, ale aj analógový výstup. Tento senzor bol testovaný samostatne v jednoduchom zapojení s digitálnym aj analógovým výstupom. V jednoduchom teste, kedy bol vložený do uzavretého priestoru v ktorom horiaca sviečka premenila prítomný O_2 na CO, detegoval zmenu koncentrácie CO (na rozdiel od MOS senzorov MQ-7 a MQ-9, ktoré nedetegovali žiadnu zmenu). O nepoužití tohto typu senzorov v prototypovom zariadení rozhodla aj skutočnosť, že v danej dobe neboli dostupné senzory pre všetky požadované plyny.



Obrázok 4.15: Senzor ZE03-CO. Zdroj: [84]

2. Sensory od firmy SPEC Sensors z USA – výrobca prezentuje senzory ako revolučné na poli elektrochemických senzorov pre nový spôsob ich výroby, ktorý umožňuje masovú produkciu. Senzor využíva technológiu tlačenej elektroniky a laminovania, ktorá umožňuje nízku spotrebu, nízku cenu výroby a veľmi tenké vyhotovenie [85].

Od tejto firmy bol kúpený jednak jeden modul s označením ULPSM-NO₂, čo znamená Ultra-Low Power Analog Sensor Module. Je to jednak samotný senzor (malá doštička navrchu) a tiež analógová vyhodnocovacia elektronika (spodné PCB). Tento modul bol použitý v testovacom zariadení.



Obrázok 4.16: Senzor UPLSM-NO₂ 968-047. Zdroj: [86]

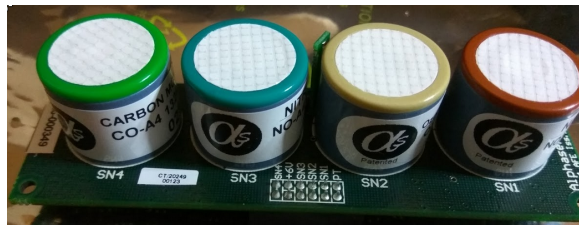
Tiež bola kúpená sada Digital SDK obsahujúca všetkých 8 poskytovaných senzorov a jeden modul s elektronikou, ktorý robí jednak spracovanie analógového signálu, ale aj prevod na digitálny signál a rozhranie UART ([87]). Sada obsahuje senzory 3SP_CO_1000 P na stanovenie CO, 3SP_O₃_20 P na stanovenie O₃, 3SP_NO₂_5F P na stanovenie NO₂, 3SP_Ethanol_1000 P na stanovenie Etanolu, 3SP_H₂S_50 P na stanovenie H₂S, 3SP_SO₂_20 P na stanovenie SO₂, RESP_IRR_20 P na stanovenie dráždivých látok, IAQ_100 P na monitorovanie kvality vnútorného ovzdušia na úniky plynov. Z tejto sady bol použitý v testovacom zariadení modul elektroniky najprv so senzorom CO a potom ten istý modul elektroniky so senzorom na NO₂.

Skúšobné zariadenie s týmito senzormi bolo v prevádzke vo vonkajšom prostredí viac ako dva mesiace. Namerané výsledky boli ale veľmi nekonzistentné. Skôr to vyzeralo, že údaje hodnôt koncentrácie plynov zodpovedajú zmenám vonkajšej teploty a vlhkosti a nie skutočným zmenám koncentrácie plynov. Zodpovedné vyhodnotenie merania veľmi komplikovala aj epidemiologická situácia, ktorá nedovoľovala zariadenie umiestniť v blízkosti nejakej meracej stanice s certifikovanými prístrojmi a tak porovnať hodnoty. Potvrdenie domnienky o nevyhovujúcej kvalite výstupných údajov potvrdila aj štúdia o použiteľnosti týchto senzorov, ktorá je dostupná na [88].

Na základe týchto údajov bolo teda rozhodnuté, že tieto senzory nebudú použité v prototypovom zariadení.

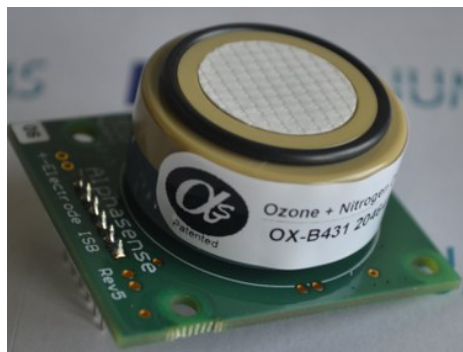
3. Sensory od firmy Alphasense z UK. Firma vznikla v roku 1996 a celých 25 rokov sa zaoberá vývojom, zdokonaľovaním a výrobou senzorov na detekciu plynov. Vo svojom sortimente má senzory pracujúce na niekoľkých princípoch. Sú to senzory katalytické, MOS, NDIR, ktorých princípy sa popisujú v časti 3.2.1 tejto práce. Veľkú skupinu ich produktov tvoria senzory elektrochemické. Práve tieto ich senzory používajú často rôzni výrobcovia zariadení na meranie kvality ovzdušia.

Pre potreby tejto práce boli zakúpené dve súbavy elektrochemických senzorov: Prvá súprava obsahovala senzory: 00CO-A4 na meranie CO, 0NO₂-A43F na meranie NO₂, 00NO-A4 na meranie NO, 0SO₂-A4 na meranie SO₂, 00OX-A431 na meranie O₃. Súčasťou tejto súpravy je aj doska vyhodnocovacej elektroniky na ktorú sa môžu pripojiť štyri senzory. Táto súprava bola použitá v testovacom zariadení so senzormi na meranie CO, NO₂, NO, O_x.



Obrázok 4.17: Súprava senzorov a vyhodnocovacej elektroniky. Zdroj: autor práce

Druhá súprava obsahovala senzory: 00CO-B4, 00OX-B431, 0NO₂-B43F + elektronika, 00NO-B4 + elektronika, 0SO₂-B4 + elektronika. Elektronika znamená, že daný senzor bol dodaný s individuálnou doskou vyhodnocovacej elektroniky (ISB) 4.18, výrobcom nastavenej pre daný konkrétny typ senzora a výrobca dodal aj kalibračné dáta pre konkrétny kus senzora. Z tejto súpravy boli v testovacom zariadení použité senzory s elektronikou na meranie NO₂, NO, SO₂.



Obrázok 4.18: Senzor OX-B431 aj s ISB. Zdroj: [89]

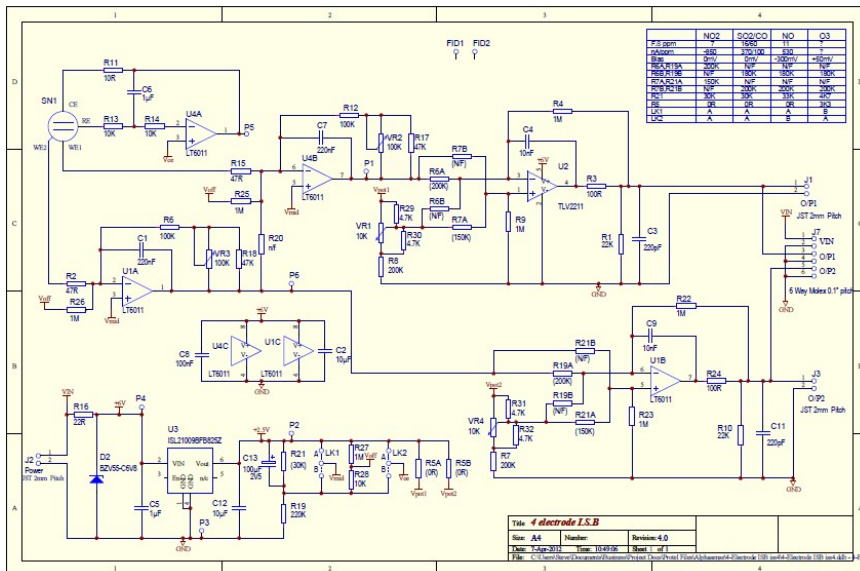
Po zvážení nazhromaždených údajov bolo rozhodnuté, že v prototypovom zariadení budú použité elektrochemické senzory od firmy Alphasense s individuálnou doskou elektroniky pre každý senzor.

neprenášal šum do výstupného signálu. Prúdový odber je menší ako 1,5 mA. Výstupné napätie sa pohybuje od 0 V do $(V_{IN} - 0,5)$ V. Vzhľad ISB je na obrázku 4.19 a schéma na obrázku 4.20

Figure 1 ISB



Obrázok 4.19: ISB zo strany súčiastok. Zdroj: [94]



Obrázok 4.20: Schéma ISB. Zdroj: Alphasense

Prototypové zariadenie je skonštruované tak, že dokáže merať koncentrácie štyroch plynov podľa toho, aké štvorelektrodové senzory z rodiny B4 zo sortimentu firmy Alphasense sa do neho vložia. V období konštruovania a skúšania zariadenia sa použili senzory na meranie koncentrácie nasledovných plynov: NO₂, NO, SO₂, O_x.

	LTE Cat 1 bis	LT-M LTE Cat M2	NB-IoT LTE Cat NB2	EC-GSM -IoT
3GPP Release	13 (2015)	14 (2017)	14 (2017)	13 (2015)
Downlink Peak Rate	10 Mbit/s	~4 Mbit/s	127 kbit/s	474 kbit/s (EDGE) 2 Mbit/s (EGPRS2B)
Uplink Peak Rate	5 Mbit/s	~7 Mbit/s	159 kbit/s	474 kbit/s (EDGE) 2 Mbit/s (EGPRS2B)
Number of Antennas	1	1	1	1 - 2
Duplex Mode		Full or Half Duplex	Half Duplex	Half Duplex
Device Receive Bandwidth		5 MHz	180 kHz	200 kHz
Receiver Chains		1 (SISO)*	1 (SISO)*	1 - 2
Device Transmit Power	23 dBm	20 / 23 dBm	14 / 20 23 dBm	23 / 33 dBm

* Single Input Single Output - jedna anténa na prijímacej a jedna na vysielacej strane

Tabuľka 4.4: Vybrané parametre niektorých 3GPP LPWAN štandardov. Zdroj: [97]

Tieto štandardy využívajú pri svojej technickej realizácii hlavne existujúcu infraštruktúru mobilných operátorov. Tak je zaručená dostupnosť a bezpečnosť týchto služieb v rámci pokrytia daného geografického územia bázovými stanicami konkrétneho mobilného operátora. Podľa údajov z roku 2019 [98] celosvetovo už 141 operátorov prevádzkovalo, alebo investovalo do infraštruktúry NB-IoT sietí. V tom istom roku 60 operátorov prevádzkovalo LTE-M siete.

Na Slovensku je dostupný NB-IoT od Slovak Telekom a tiež od Orange. Určitý čas bola pre účely tejto práce používaná SIM karta zo Slovak Telekom.

V Čechách je NB-IoT dostupný od T-Mobile CZ, Vodafone, O2. V definitívnej verzii je pre účely tejto práce používaná SIM karta z Vodafone s programom, ktorý umožňuje dĺžku správy 540 B a prenos 4 MB dát za mesiac.

Ak sa porovnávajú dva najrozšírenejšie s týchto štandardov (LT-M a NB-IoT), tak je možné konštatovať, že:

- NB-IoT bol optimalizovaný pre: pripojenia s nízkou dátovou rýchlosťou,

atď. Na Slovensku prevádzkuje túto sieť spoločnosť SimpleCell Networks ([102]). V Čechách je to spoločnosť Sigfox Česká republika ([103]). Prístup do siete je spoplatnený a výška poplatku pre konkrétneho užívateľa závisí od počtu pripojených zariadení. Viacej informácií o technických parametroch tejto siete je napríklad na stránke [104].

4.3.3 Komunikačný modul

Na základe odporúčania použitého mobilného operátora a tiež na základe porovnania technických parametrov, dostupnosti a cien bolo rozhodnuté pre konštruované zariadenie použiť hotovú prídavnú dosku NB-IoT s označením MIKROE-3072 LTE IoT click od Srbskej firmy MikroElektronika [105].

Hlavnú časť prídavnej dosky tvorí modul SARA-R410M-02B od švajčiarskej firmy u-Blox [106]. Je to konfigurovateľný viac módový LTE modul s globálnou podporou pre IoT a M2M³ aplikácie.

Na doske sú umiestnené konektory pre USB a UART interface. UART interface podporuje rýchlosti komunikácie 9600, 19200, 38400 a 57600 baudov a má k dispozícii jednak dátové piny RX a TX, ale aj signály na hardverové riadenie komunikácie CTS, RTS, RI (Clear to Send, Ready to Send, and Ring Indicator). Na prídavnej doske sa tiež z druhej strany nachádza držiak na Micro SIM kartu.



Obrázok 4.21: Komunikačná doska MIKROE-3072 LTE IoT. Zdroj: [105]

Na okraji dosky sa nachádza SMA konektor na pripojenie antény. To bol ďalší z dôvodov použitia hotovej prídavnej dosky, keďže takto je zabezpečené bezproblémové spojenie modulu s anténou. Pracovný rozsah RF prijímača a vysielača je od 700 MHz do 2100 MHz. Presné frekvencie jednotlivých kanálov sa riadia povolovacími podmienkami pre jednotlivých mobilných operátorov.

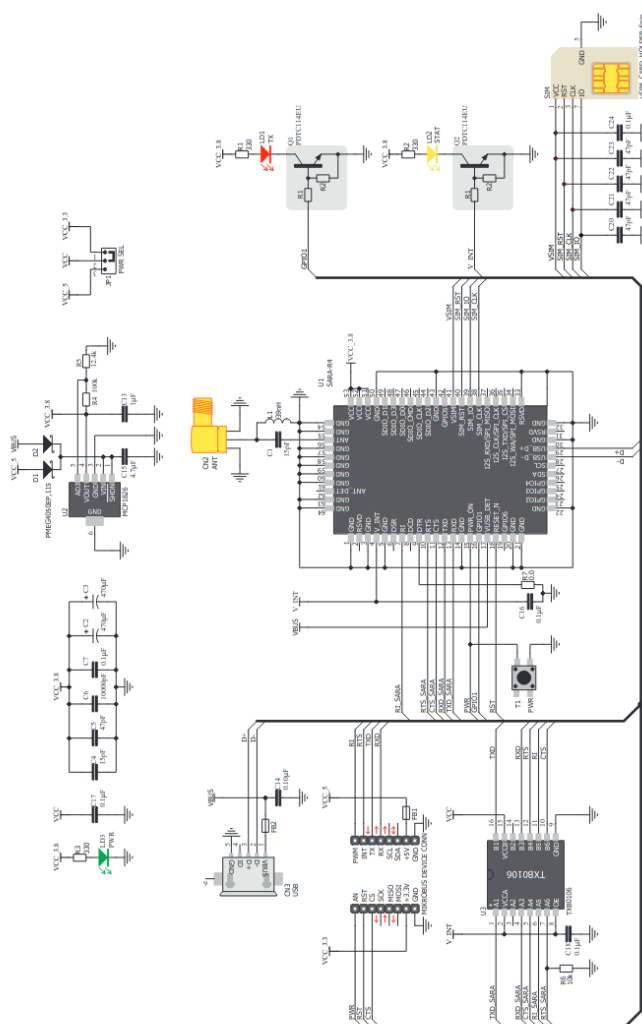
Keďže samotná doska MIKROE-3072 LTE IoT nemá udávané celkové hodnoty odoberaného prúdu, uvedú sa tu hodnoty z informácií o module SARA-R410M-02B v ktorom je prakticky celá elektronika, hlavne celulárny RX/TX a modem. Viď Obr.4.22.

³M2M (Machine to machine) je označenie pre priamu komunikáciu medzi zariadeniami využívajúca ľubovoľný komunikačný kanál vrátane drôtového alebo bezdrôtového spojenia. Komunikácia je stavaná tak, aby sa zaobišla bez priameho zásahu ľudského operátora. Jedná sa predovšetkým o prenos dát medzi jednotlivými hardverovými komponentami v zložitejších zariadeniach.

4. Komponenty a technológia

- Rozsah normálnych pracovných teplôt je od -20 do 65 °C
- Napätová úroveň komunikačných signálov sa dá voliť buď 3,3 V, alebo 5 V pomocou PWR SEL prepínača
- Samotná doska bez prečnievajúceho SMA konektora má rozmery 57,2 x 25,4 mm
- Prúdový odber v aktívnom móde a zariadenie je registrované v sieti je 9 mA
- Prúdový odber v LTE NB-IoT pripojenom móde je minimálne 60 mA, priemerná hodnota v tomto móde je 140 mA a maximálna špičková hodnota pri vysielaní je 500 mA. [107]

Táto doska bola použitá aj v testovacom zariadení aj v prototypu.



Obrázok 4.22: Schéma dosky MIKROE-3072 LTE IoT. Zdroj: [107]

Kapitola 5

Konštrukcia

V tejto kapitole sa popíšu elektrické schémy jednotlivých blokov a celková mechanická konštrukcia testovacieho, ale aj prototypového zariadenia vrátane návrhu plošných spojov.

5.1 Návrh elektrickej schémy

Základom pre tvorbu schémy ako celku je hlavne uvedenie si aké komponenty a bloky sa použijú a aké sú väzby a prepojenia medzi týmito časťami. Výborný prehľad o tom poskytuje blokové schéma celého zariadenia, ktoré je na obrázku 5.1.

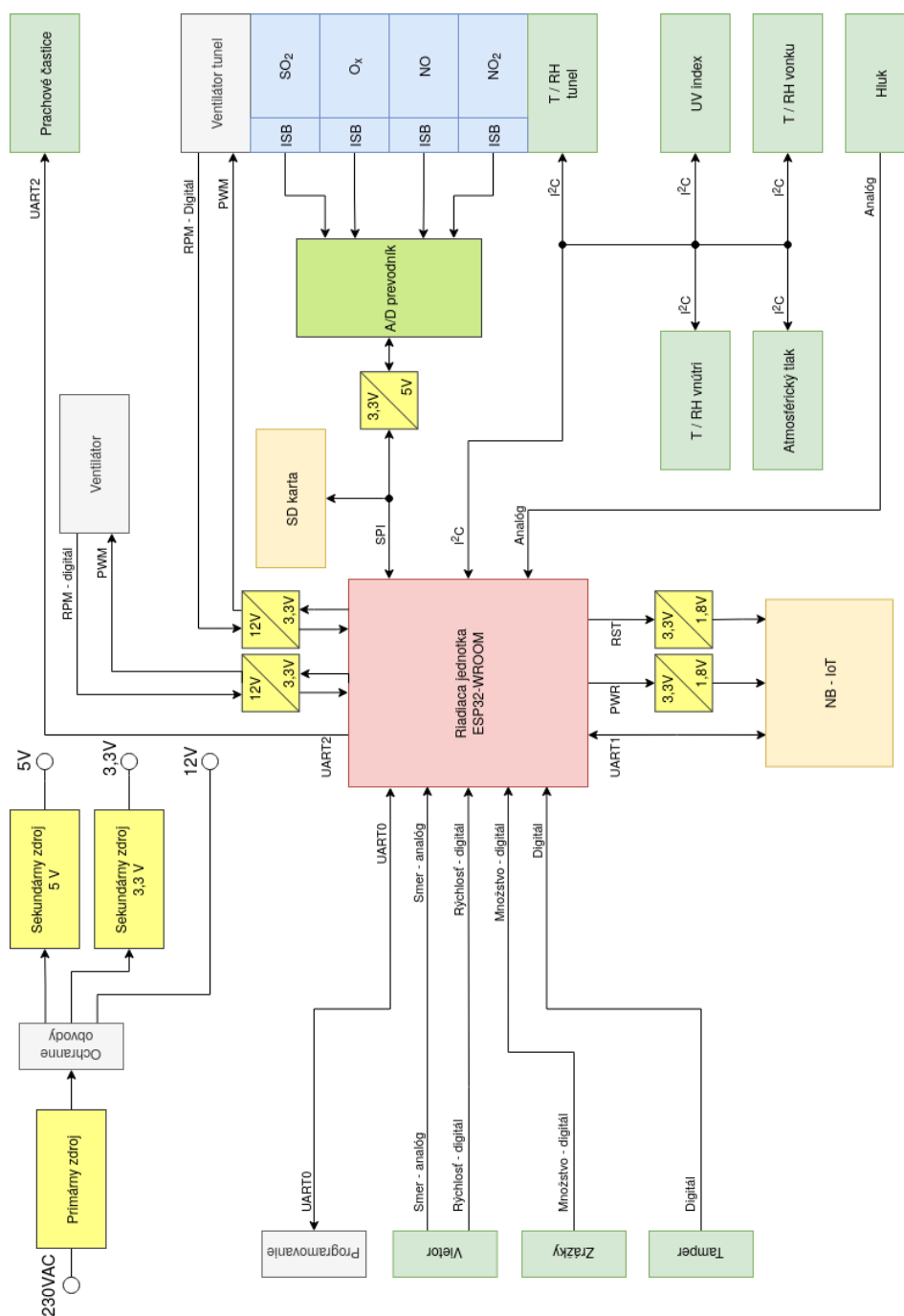
Na vytvorenie všetkých schém a návrh plošných spojov bol použitý program Altium Designer od spoločnosti Altium Ltd. z USA [108].

V nasledujúcej časti budú podrobnejšie popísané schémy jednotlivých logických častí prototypového zariadenia.

V ľavej (spodnej) časti blokovej schémy na obrázku 5.1 sa nachádzajú tri bloky označené Vietor, Zrážky, Tamper. Sú to iba konektory pripravené na možné pripojenie externých senzorov (vietor, zrážky). Konektor Tamper je plánovaný na pripojenie senzora otvorenia dvierok skrinky zariadenia, čo by mohlo signalizovať nepovolený zásah do zariadenia. Štvrtý konektor s označením Programovanie slúži na nahrávanie programu do riadiacej jednotky.

5.1.1 Napájacia časť

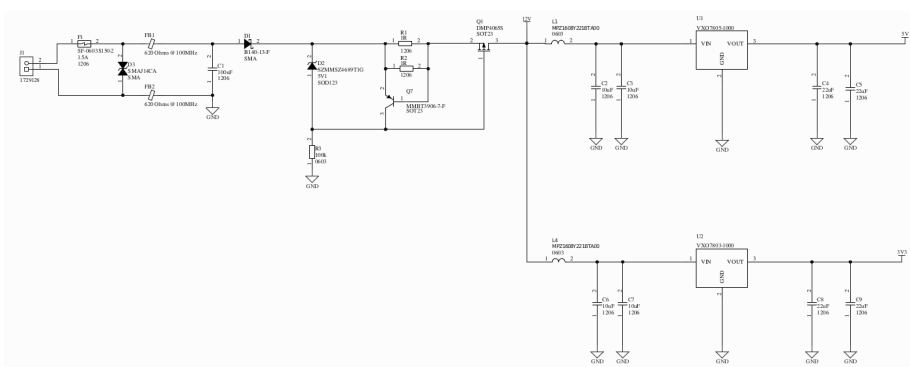
Ako už bolo spomenuté v časti 4.2.7 je napájanie realizované jedným primárnym továrenským zdrojom RS-15-12, ktorý dodáva základné napájacie napätie 12 V DC pre zariadenie. Naň potom nadväzuje zdrojová časť na hlavnej doske zariadenia a táto časť bude teraz popísaná podrobnejšie 5.2. Na vstupe sa nachádzajú ochranné obvody, ktoré poskytujú základné zabezpečenie celej elektroniky proti prepätiu na vstupe, nechcenému prepólovaniu zo strany hlavného napájania 12 V DC, ale majú aj zabrániť prúdovému preťaženiu vstupu hlavného napájania. Sú tu aj súčiastky obmedzujúce prenikanie elektromagnetického rušenia jednak smerom do elektroniky zariadenia, ale aj smerom von.



Obrazok 5.1: Bloková schéma prototypového zariadenia. Zdroj: autor práce

Za týmito ochrannými obvodmi sa odoberá napätie 12 V DC pre samotné zariadenie a tiež sa tu nachádzajú sekundárne zdroje, ktoré zabezpečujú vytvorenie potrebných napájacích napätí 5 V DC a 3,3 V DC.

Na vstupný konektor J1 sa privádza hlavné jednosmerné napájacie napätie 12 V. Ako prvá ochrana je potom použitá tavná poistka SF-0603S150-2. Je to poistka realizovaná ako miniatúrny tenkovrstvový čip určený na povrchovú



Obrázok 5.2: Schéma zapojenia napájacej časti. Zdroj: autor práce

montáž. Slúži ako nadprúdová ochrana a reaguje do 5 sekúnd pri 2,5 násobnom prekročení menovitého prúdu. Menovitý prúd tejto poistky je 1,5 A.

Za touto nadprúdovou ochranou nasleduje Bi-directional TVS ¹ dióda SMAJ14CA, ktorá je určená ako ochrana pred prepätím a prepäťovými špičkami vznikajúcimi napríklad pri bleskoch. Má veľmi krátky čas odpovede na prepätie a to menej ako 1 ps.

Ďalej sú v oboch prívodoch zaradené „Ferrite Bead“ v prevedení určenom na povrchovú montáž. Sú to prvky s indukčnosťou vyrobené vo forme SMD čipu. Slúžia v spolupráci s nasledujúcim kondenzátorom C1 s hodnotou 100 nF ako odrušovací člen proti EMI (ElektroMagnetická Interferencia).

Ochranu pred nechceným obrátením polaroty vstupného napätia predstavuje schottkyho dióda B140-13-F.

Obvod pozostávajúci s MOSFET tranzistora Q1, bipolárneho tranzistora Q7, odporov R1, R2, R3 a zenerovej diódy D2 slúži ako prúdové obmedzenie. Zamedzuje aby prúd odoberaný celým zariadením prekročil, napríklad v prípade poruchy alebo náhodného skratu, nastavenú hodnotu. Táto hodnota maximálneho priepustného prúdu sa nastavuje výslednou hodnotou paralelnej kombinácie odporov R1 a R2.

Až za týmto obvodom je k dispozícii jednosmerné napájacie napätie 12 V pre celé zariadenie. Z tohto bodu sa aj odoberá napätie pre sekundárne zdroje nižšieho napätia. Obe vetvy, jednak pre 5 V aj pre 3,3 V, sú čo do zapojenia rovnaké, len obsahujú iný blok samotného DC/DC prevodníka. Na vstupe každej vetvy je použitá odrušovacia indukčnosť „Ferrite Bead“ MPZ1608Y221BTA00, ktorá zabraňuje prenikaniu rušenia zo spínaného regulátora do ostatných vetiev napájania. Nasledujú dva filtračné keramické kondenzátory po 10 μF a samotný modul prevodníka, ktorý má na výstupe tiež dva keramické filtračné kondenzátory po 22 μF .

Ako prevodník z 12 V na 3,3 V sa používa modul s typovým označením VXO7803-1000.

Ako prevodník z 12 V na 5,0 V sa používa modul s typovým označením VXO7805-1000.

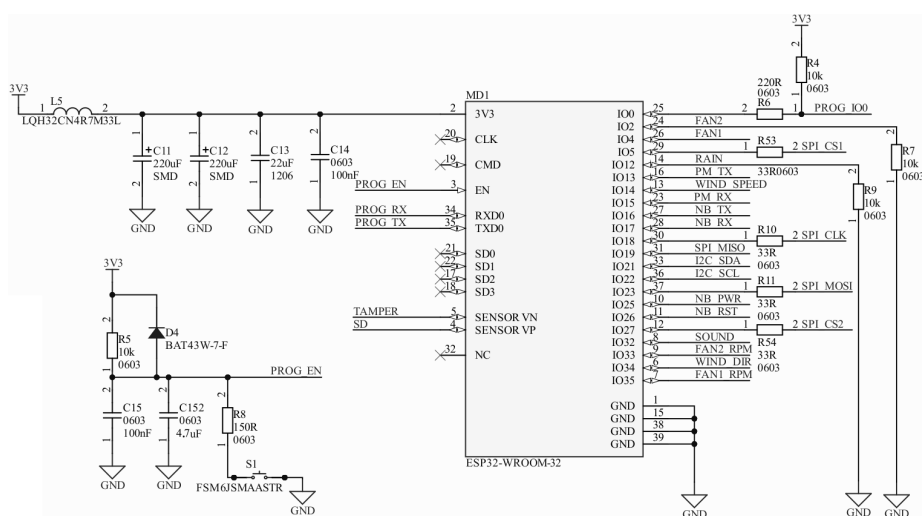
Oba moduly sú podrobnejšie popísané v časti 4.2.8.

¹Transient Voltage Suppression Diode

Všetky obvody popísané v tejto časti sú realizované na hlavnej PCB doske spolu s ďalšími časťami riadenia a komunikácie.

5.1.2 Riadiaca jednotka

Ako riadiaca jednotka bol použitý osvedčený modul ESP32-WROOM-32, ktorého vlastnosti boli podrobnejšie spomenuté v časti 4.2.3. Obvodové zapojenie sa riadi odporúčaním z datasheetu výrobcu a aj skúsenosťami z použitia tohto modulu v iných zariadeniach. Týka sa to jednak zapojenia jednotlivých pull-up a pull-down odporov a tiež pripojenia napájacieho napätia.



Obrázok 5.3: Schéma zapojenia modulu ESP32-WROOM-32. Zdroj: autor práce

Napájacie napätie 3,3 V je privádzané k modulu cez LC filter tvorený súčiastkami L5, C11, C12, C13, C14. Takéto zložitejšie zapojenie bolo zvolené hlavne na základe skúseností s použitím tohto modulu v zariadeniach, kde sa využívala WiFi komunikácia. Ukázalo sa totiž, že prúdové špičky, ktoré vznikajú pri inicializácii a prevádzke WiFi transceivera na SoC ESP32, dokážu spôsobiť kolísanie napájacieho napätia. Preto je aj tento filter umiestnený na PCB čo najbližšie k modulu. Na začiatku filtra je umiestnená miniatúrna cievka LQH32CN4R7M33L v prevedení pre povrchovú montáž. Jej indukčnosť je $4,7 \mu\text{H}$, odpor $0,15 \Omega$ a povolený prúd 650 mA. Za ňou nasleduje séria kondenzátorov, kde sú dva elektrolytické kondenzátory s hodnotou $220 \mu\text{F}$ každý na napätie 6,3 V. Sú ešte doplnené keramikým kondenzátorom C13 s kapacitou $22 \mu\text{F}$ a keramikým kondenzátorom C14 s hodnotou 100nF . Táto kombinácia postačuje na vyrovnávanie odberových špičiek modulu a tiež zabraňuje šíreniu rušivých impulzov do ostatných častí zariadenia. Napätie 3,3 V je privádzané aj na pin EN signálom označeným PROG_EN. Tento signál sa generuje s krátkym oneskorením po zapnutí napájacieho zdroja. Je to dôležité preto, aby modul začal pracovať až keď bude napájacie napätie ustálené. Oneskorenie určuje RC člen tvorený odporom R5 a kondenzátorom C152. Tlačidlo S1 zapojené v tomto obvode slúži ako manuálny RESET riadiacej jednotky.

Na obrázku 5.3 je možné vidieť aj použitie jednotlivých pinov modulu, ktoré slúžia na pripojenie ďalších častí zariadenia.

Mikrokontrolér ESP32 sa programuje cez jedno UART rozhranie, ktorého signály sú na obrázku označené ako PROG_RX a PROG_TX. Na prepnutie ESP32 do programovacieho módu je nutný ešte pin IO0 na ktorý je privedený signál PROG_IO0. Podľa logickej úrovne na tomto pine pri štarte sa mikrokontrolér prepne buď do programovacieho módu, alebo do módu štandardného behu programu.

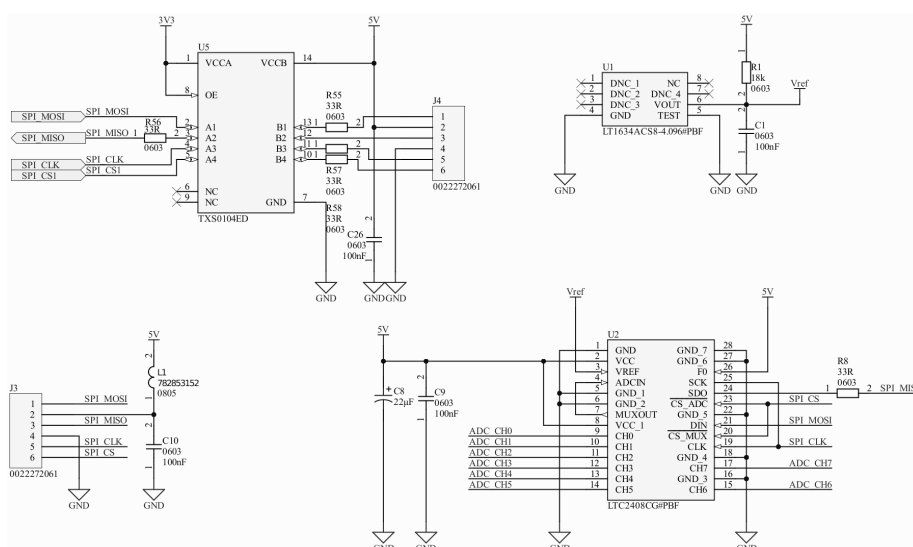
Na schéme sú vidieť ešte dve ďalšie UART rozhrania. Jedno so signálmi PM_TX a PM_RX slúži na komunikáciu so senzorom prachových častíc SP30. Druhé má označenie signálov NB_TX a NB_RX a je použité na komunikáciu s modulom NB-IoT MIKROE-3072.

Zbernicu SPI tvoria signály SPI_CLK, SPI_MISO, SPI_MOSI. K tomu ešte patria dva signály SPI_CS1 a SPI_CS2 pomocou ktorých sa aktivuje jedno zo zariadení pripojených na túto zbernicu. CS1 aktivuje komunikáciu s AD prevodníkom a CS2 aktivuje SD kartu.

Na komunikáciu so všetkými zariadeniami pripojenými na I2C zbernicu slúžia signály I2C_SDA a I2C_SCL.

5.1.3 AD prevodník pre senzory plynov

Použité moduly senzorov plynov majú analógový výstup. Každý modul so senzorom má na výstupe dve napätia. Jedno je úmerné signálu z pracovnej elektródy a druhé je úmerné signálu z pomocnej elektródy. Pretože prototypové zariadenie obsahuje štyri senzory plynov používa sa 8-kanálový AD prevodník LTC2408CG.



Obrázok 5.4: Schéma zapojenia AD prevodníka s príslušenstvom. Zdroj: autor práce

Jeho zapojenie zodpovedá odporúčanému zapojeniu z datasheetu. Napájacie napätie je použité 5 V, aby sa dal bezpečne spracovať celý rozsah výstupných

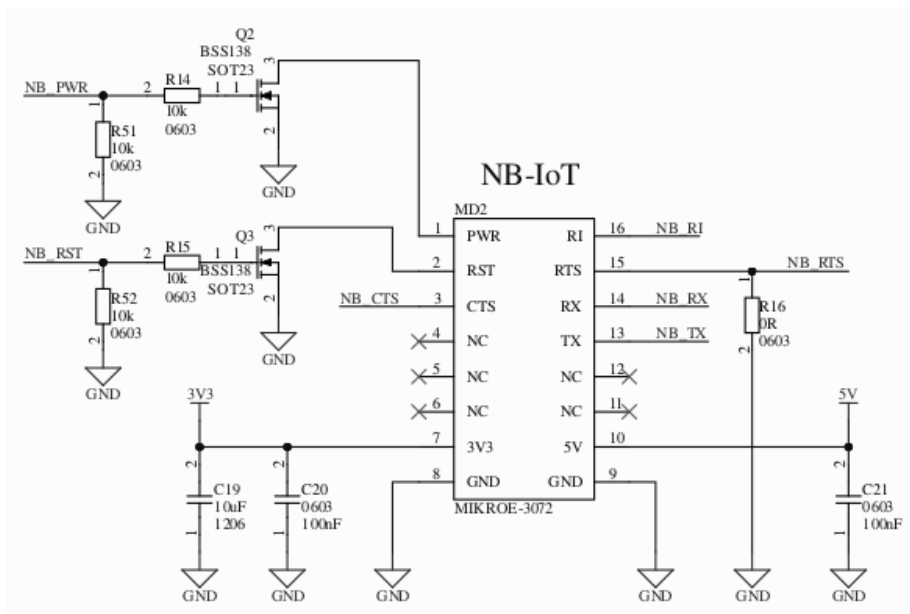
signálov z modulov senzorov plynov. Na generovanie presného a stabilného referenčného napätia pre prevodník je použitý obvod LT1634ACS8-4.096. Oba obvody majú na PCB v napájaní čo najbližšie k sebe zaradené klasické blokovacie keramické kondenzátory 100 nF a prevodník má ešte navyše v napájaní aj filtračný kondenzátor 22 μ F. Analógové signály z modulov senzorov sú pripojené na vstupy prevodníka označené na schéme ADC_CH0 až ADC_CH7. Riadiace a dátové signály SPI zbernice sú označené SPI_MOSI, SPI_MISO, SPI_CLK a SPI_CS a sú spolu s napájacím napätím a GND prívodom vyvedené na konektor J3. AD prevodník, zdroj referenčného napätia, konektor J3 a k nim príslušné súčiastky sú umiestnené na samostatnom PCB aby mohli byť čo najbližšie k modulom senzorov a aby tak boli prírody analógových signálov čo najkratšie a teda čo najmenej podliehali nežiadúcim vplyvom.

Logicky k týmto obvodom patrí ešte jeden integrovaný obvod, ktorý sa ale už nachádza na hlavnej doske elektroniky. Je to obvod TXS0104E, čo je 4-bitový obojsmerný prevodník napätovej úrovne signálov. Z jednej strany sú naň cez konektor J4 pripojené signály z dosky AD prevodníka, kde sa požíva 5 V napájanie a teda aj 5 V signály. Z druhej strany sú privedené signály z riadiacej jednotky, ktorá pracuje so signálmi s úrovňou 3,3 V.

5.1.4 Modul NB-IoT komunikácie

Tento modul zaisťuje jednosmernú komunikáciu z prototypového zariadenia prostredníctvom mobilného operátora na dátový a webový server. Vyžíva sa na to úzkopásmový prenos správ s technológiou označovanou ako NB-IoT.

Hotový továrenský modul je zväčša zapojený podľa odporúčania výrobcu (obrázok 5.5).



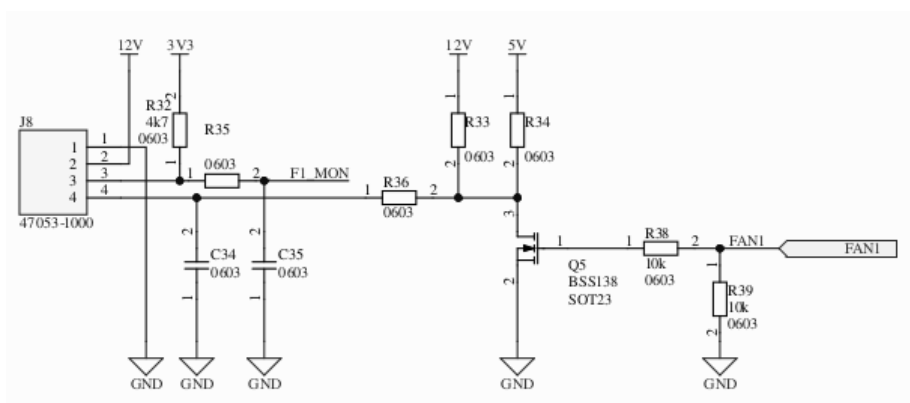
Obrázok 5.5: Schéma zapojenia modulu NB-IoT. Zdroj: autor práce

Modul na svoje napájanie využíva dve napätia. Jednak 5 V a tiež 3,3 V. Na obe napätia sú na PCB čo najbližšie k modulu pripojené blokovacie keramické kondenzátory 100 nF. Na napätie 3,3 V je ešte naviac pripojený aj filtračný keramický kondenzátor C19 s hodnotou 10 μ F.

Na komunikáciu s riadiacou jednotkou sa z rozhrania UART teraz využívajú iba signály NB_RX a NB_TX. Ďalšie signály tohto rozhrania CTS, RTS, RI (Clear to Send, Ready to Send, Ring Indicator) sú vyvedené na samostatný konektor na prípadné ďalšie použitie v budúcnosti. Riadiaca jednotka je spojená s týmto modulom ešte dvoma ďalšími signálmi. Jeden je NB_PWR, ktorým sa dá modul uviesť do zapnutého alebo vypnutého stavu. Druhým signálom je NB_RST, ktorým môže riadiaca jednotka resetnúť tento modul. Oba signály sú privedené k modulu cez prevodníky úrovne tvorený tranzistorom a dvoma odpormi.

5.1.5 Riadenie a snímanie otáčok ventilátorov

Prototypové zariadenie obsahuje dva samostatné ventilátory. Oba sú takého typu, že sa im dá elektronicky meniť počet otáčok za minútu a oba majú tiež výstup, na ktorom je signál na sledovanie skutočného počtu otáčok ventilátora. Oba majú rovnaké zapojenie jednoduchšej riadiacej elektroniky, preto je tu uvádzaná iba jedna schéma na obrázku 5.6.



Obrázok 5.6: Schéma riadenia ventilátorov. Zdroj: autor práce

Na konektor J8 sa pripája samotný ventilátor. Boli vybrané varianty na napájacie napätie 12 V DC. Riadenie počtu otáčok za minútu je robené PWM signálom z riadiacej jednotky, ktorý je privedený na bod FAN1. Tranzistor Q5 slúži ako prevodník napätovej úrovne PWM signálu medzi riadiacou jednotkou a samotným ventilátorom. Zapojením jedného z odporov R33 alebo R34 sa dá vybrať napätová úroveň pre ventilátor medzi 5 V alebo 12 V podľa požiadaviek konkrétneho použitého typu ventilátora. Podľa toho sa aj stanovujú hodnoty odporov R33 / R34, R36 a R35.

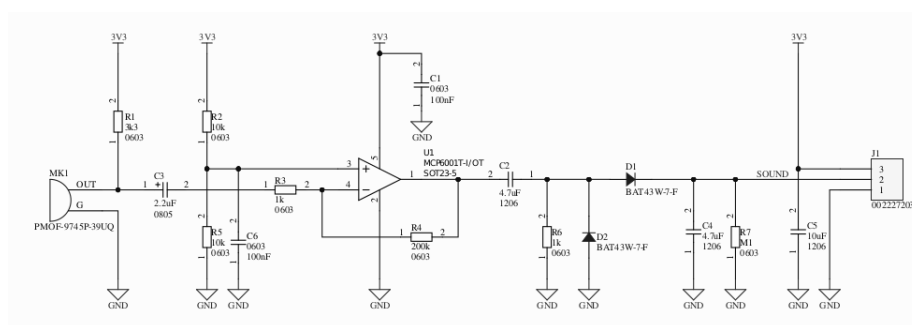
Signál F1_MON privádza do riadiacej jednotky impulzy z ventilátora, ktorých frekvencia zodpovedá skutočnému počtu otáčok. Tieto impulzy môže priebežne v reálnom čase vyhodnocovať riadiaca jednotka a použiť na kontrolu.

Momentálne riadiaca jednotka podľa snímanej teploty na niekoľkých miestach zariadenia a podľa naprogramovaného algoritmu upravuje vstupný PWM signál FAN1.

Tak je zabezpečené adekvátna cirkulácia vzduch v prototypovom zariadení a tiež úspora energie, keďže ventilátory nemusia stále bežať na plný výkon.

5.1.6 Meranie hluku

Na meranie hluku nebol použitý hotový továrenský modul. Obvod bol zostavený z diskretných súčiastok a schéma je na obrázku 5.7. Snímač je napájaný jedným napätím 3,3 V.



Obrázok 5.7: Schéma snímača hluku. Zdroj: autor práce

Samotný snímač zvuku je tvorený elektretovým mikrofónom PMOF-9745P-39UQ. Tento druh mikrofónu bol zvolený pre pomerne malé rozmery a kompaktnosť, široký frekvenčný rozsah (20 – 16000 Hz v tolerančnom pásme ± 3 dB), veľký rozsah pracovných teplôt (od -20 do $+70$ °C) a jednoduché použitie. Mikrofón v sebe obsahuje FET impedančný konvertor, preto musí byť pripojený na napájacie napätie v rozsahu 3 – 10 V. Odoberaný prúd zo zdroja je maximálne $500 \mu\text{A}$. Striedavá zložka napätia z mikrofónu postupuje cez oddelovací kondenzátor C3 na invertujúci vstup operačného zosilňovača U1. Je tu použitý typ MCP6001T, čo je CMOS operačný zosilňovač na všeobecné použitie. Je určený pre jedno nesymetrické napájacie napätie v rozsahu 1,8 – 6,0 V. Odpor R4 a R3 nastavujú zosilnenie na hodnotu 200. Odpor R2 a R5 nastavujú napätie neinvertujúceho vstupu na stred napájacieho napätia, čím zabezpečujú najširší rozsah pre zosilnenie striedavého signálu, lebo výstup sa môže pohybovať $\pm 1,6$ V okolo stredu. Kondenzátor C2 slúži na oddelenie zosilneného striedavého signálu. Tento signál postupuje na dvojcestný usmerňovač tvorený dvoma schottkyho diódami BAT43W. Na kondenzátore C4 potom vzniká jednosmerné napätie, ktorého veľkosť je úmerná intenzite akustického signálu na vstupe mikrofónu. Zostava C4 a R7 tvoria dolnopriepustný filter s časovou konštantou cca 0,47 s, čím vyhladzuje rýchle zmeny výstupného napätia.

Tento analógový signál je potom privedený na jeden z AD prevodníkov riadiacej jednotky. Je to signál SOUND. Tu je signál vzorkovaný, prevedený do digitálnej formy a ďalej spracovávaný programom.

Obvod snímača hluku je realizovaný na samostatnom PCB, ktorý je umiestnený do plastového krytu na to navrhnutého. Celá táto zostava je umiestnená zvonka na spodnej strane skrinky zariadenia, aby mohla nerušene prijímať zvuky z okolitého prostredia.

■ 5.1.7 Kompletná schéma zapojenia

Kompletná schéma zapojenia sa nachádza v prílohe B.

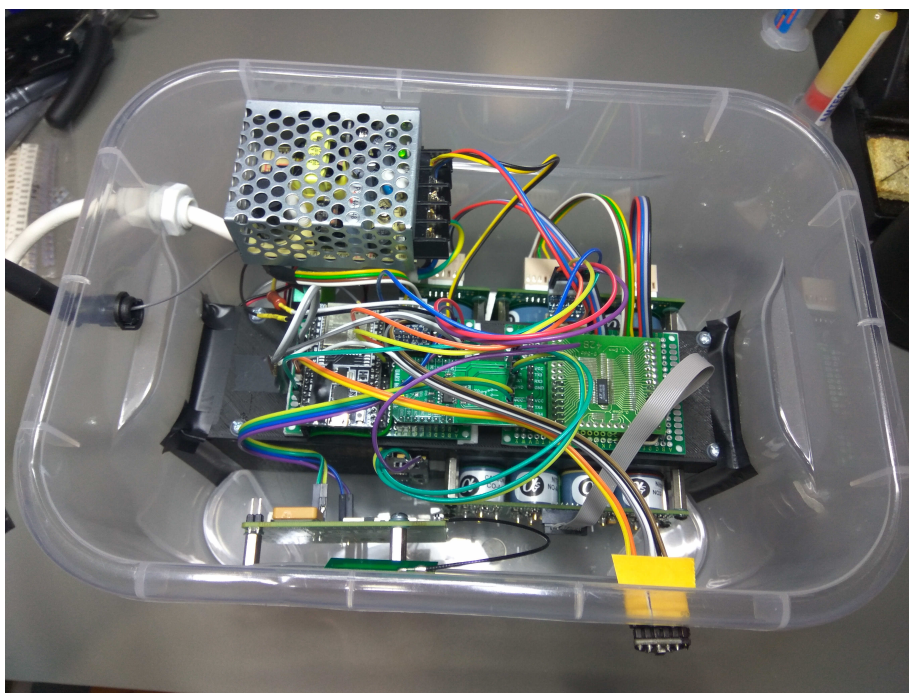
5.2 Mechanická konštrukcia

V nasledujúcej časti bude popísaná mechanická konštrukcia jednak testovacieho zariadenia a tiež výsledného prototypového zariadenia. Testovacie zariadenie bude popísané iba stručnejšie, na ilustráciu procesu tvorby definitívnej konštrukcie.

5.2.1 Testovacie zariadenie

K stavbe testovacieho zariadenia sa prišlo hlavne preto, aby sa overila realizovateľnosť niektorých nápadov a použiteľnosť vytypovaných technológií. Overovali sa tiež materiály, funkčnosť zostavených blokov a ich vzájomná komunikácia.

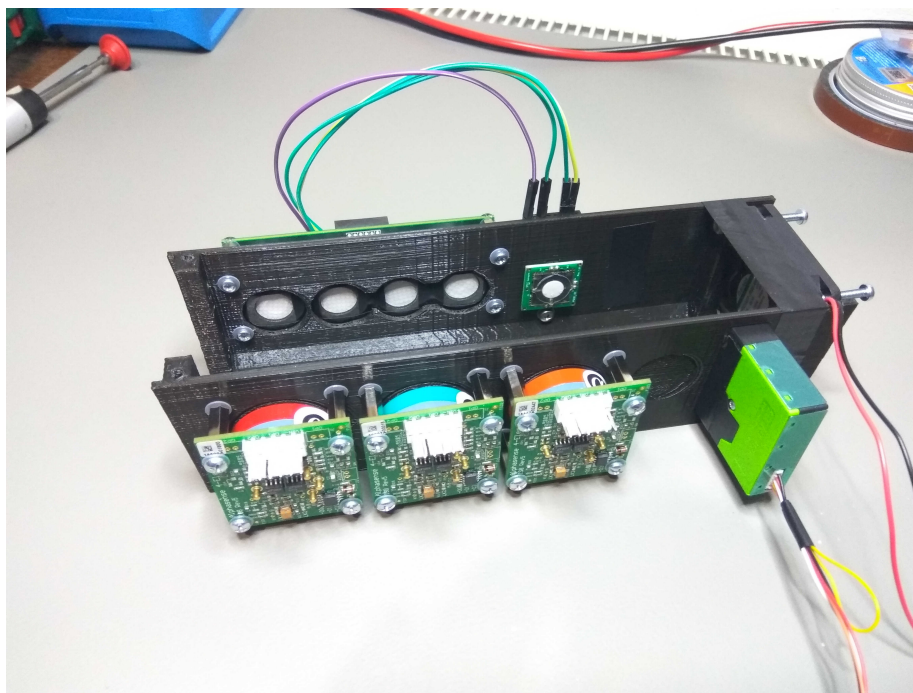
Pre jednoduchosť a rýchlu dostupnosť bola zvolená ako hlavný prvok mechanickej konštrukcie testovacieho zariadenia obyčajná plastová, priehľadná, uzatváratelná krabica na potraviny, dostupná v oddelení domácich potrieb, s rozmermi 23 x 16 x 13 cm. V jej vnútri bola uložená celá napájacia, meracia i riadiaca elektronika, čím boli chránené pred nepriaznivými vplyvmi počasia, hlavne pred dažďom, snehom a prachom. Toto zariadenie nebolo počas testovania umiestnené v úplne otvorenom vonkajšom priestranstve, lebo na to nebola plastová krabica dostatočne odolná a nepriepustná. Na testovanie bol využitý čiastočne chránený balkón.



Obrázok 5.8: Zostava testovacieho zariadenia bez krytu. Zdroj: autor práce

Bloky elektroniky, ktoré neboli nakúpené hotové, boli v tomto zariadení realizované na univerzálnych doskách plošných spojov. Sensory, ktoré mali mať

kontakt s vonkajším prostredím boli umiestnené v izolovanom tuneli. V ňom bola zabezpečená nútená cirkulácia vzduchu malým ventilátorom. Vzduch bol nasávaný otvormi v boku krabice, prechádzal tunelom a na opačnej strane vychádzal zasa otvormi v boku krabice. Samotný tunel bol ako neštandardný blok vytlačený v domácich podmienkach na 3D tlačiarňi ANET A8² z materiálu PLA³.



Obrázok 5.9: Tunel so senzormi plynov a prachu bez krytu. Zdroj: autor práce

Do vnútra tunela boli po oboch stranách namierené vstupné plochy testovaných senzorov plynov, vstupný otvor senzoru prachových častíc (jasno zelená krabička vpravo na obrázku 5.9) a senzor teploty a vlhkosti, ktorý prechádza dovnútra vrchným krytom tunela. Vrchný kryt tunela slúžil aj ako konštrukcia na pripevnenie ostatnej elektroniky ako to vidieť na obrázku 5.8.

Mimo túto konštrukciu bol uchytený iba napájací zdroj a modul NB-IoT. Von z krabice bol ešte vyvedený mikrofón snímača hluku.

Testovacie zariadenie bolo s krátkymi prestávkami v prevádzke skoro tri mesiace v čase od januára do marca 2021. Prestávky boli spôsobené buď úpravami a zlepšovaním elektroniky, alebo zmenami v programe v riadiacej jednotky.

²Jedná sa o 3D hobby tlačiareň od spoločnosti ANET s maximálnym objemom tlače 220 x 220 x 240 mm. Podporuje tlač materiálmi ABS, PLA, WOOD, PVA, PP s priemerom 1.75 mm. Rýchlosť tlače je 100 mm/s.

³PLA – polylactic acid (kyselina polymliečna) je biologicky plne odbúrateľný materiál z kukuričného alebo zemiakového škrobu alebo z cukrovej trstiny.

5.2.2 Prototypová stanica

Je to zariadenie, ktoré zodpovedá požiadavkám zadania tejto práce a je prezentované ako jej výstup. Na tomto zariadení sa robili aj merania a porovnávaná, ktoré sú ďalej predstavené.

Celá zostava prototypovej stanice bola najprv vymodelovaná 3D modelovacím programom Onshape. Je to produkt označovaný ako SaaS (Software-as-a-Service), ktorý kombinuje CAD a nástroj na spoluprácu v reálnom čase. Funguje vo webovom prehliadači a pre študentov je prístupný zdarma [109]. Toto poslúžilo na rozvrhnutie umiestnenia a získanie vhodných rozmerov všetkých mechanických dielov.

Mechanické diely, ktoré boli robené 3D tlačou, boli taktiež navrhované a vymodelované v tomto programe. Tento program vytvorí výstupný súbor popisujúci vytvorený 3D model, ktorý tvorí vstup pre program Ultimaker Cura, ktorý vytvorí priamo súbor s riadiacimi príkazmi pre konkrétnu 3D tlačiareň a konkrétny použitý materiál na tlač [110]. Jednotlivé diely boli vytlačené z materiálu PET-G⁴ na už spomínanej domácej 3D tlačiarňi ANET A8.

Skrinka a iné mechanické diely

Hlavným konštrukčným prvkom zariadenia je skrinka v ktorej a okolo ktorej je vlastne celé zariadenie postavené. Tvorí mechanickú oporu pre všetky moduly a bloky a zabezpečuje tiež základnú ochranu pred poveternostnými vplyvmi. Tomu musí zodpovedať jej robustnosť, materiál z ktorého je vyhotovená, ale aj konštrukčné detaily ako je tesnenie dvierok a uzatvárací mechanizmus.

Vonkajšia skrinka

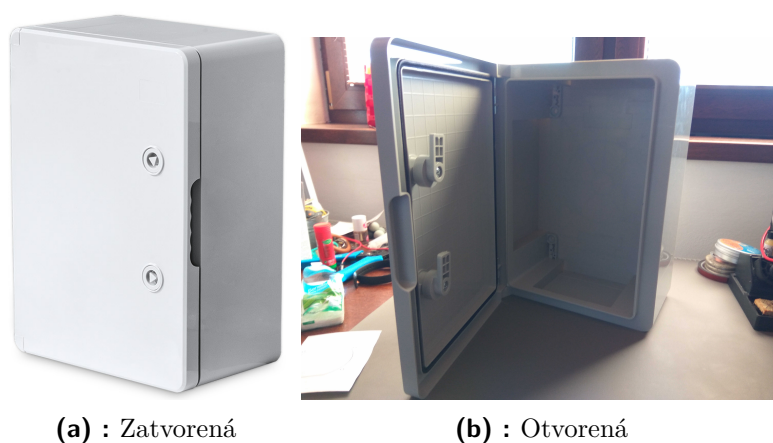
Na základe znalosti a odhadu veľkosti jednotlivých mechanických a elektrických blokov bola vybraná a zakúpená plastová rozvádzačová skriňa určená na povrchovú montáž s vonkajšími rozmermi 250 x 350 x 150 mm.

Skrinka je vyrobená z kvalitného bezhalogénového ABS⁵ plastu. Má elektrické krytie IP 65 a mechanickú odolnosť IK 08. Pozinkovaný plech, ktorý bol vo vnútri na zadnej stene a má slúžiť na uchytenie dielov montovaných dovnútra, bol nahradený pevnou plastovou doskou. Dôvodom je, že v skrinke budú umiestnené moduly na rádiovú komunikáciu jednak WiFi a tiež NB-IoT pre ktoré by pozinkovaný plech tvoril čiastočné tienenie.

Do bočných stien skrinky boli urobené otvory, ako vidieť na obrázku 5.11, do ktorých sa montovali ďalšie mechanické diely.

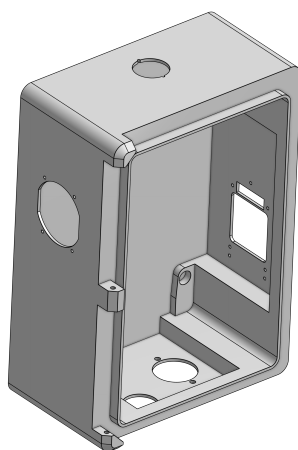
⁴PET-G je polyethyltereftalát (PET) modifikovaný glykolom. Jedná sa o pevný a húževnatý materiál s dobrou tepelnou stálosťou. Vďaka malému zmršťovaniu pri tlači, je vhodný na tvorbu veľkých objektov.

⁵ABS je skratka pre Akrylonitril Butadien Styren. Je to pevný termoplastický polymér s mimoriadne vysokou pevnosťou a húževnatosťou. Dobre odoláva nárazom a tlakovým rázom aj za nízkych teplôt. Veľmi dobre odoláva aj poveternostným vplyvom a UV žiareniu.



(a) : Zatvorená

(b) : Otvorená

Obrázok 5.10: Rozvádzačová skrinka. Zdroj: predajca [7] a autor práce**Obrázok 5.11:** 3D model skrinky s potrebnými otvormi. Zdroj: autor práce

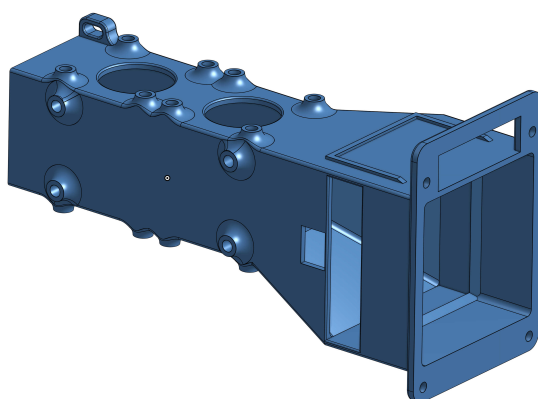
Vzduchový tunel

Dominantným mechanickým blokom vo vnútri skrinky (podobne ako pri testovacom zariadení) je plastový tunel, ktorý zabezpečuje prívod čerstvého vzduchu z vonkajšieho prostredia k senzorum plynov a slúži tiež k ich mechanickému uchyteniu, ako aj k uchyteniu malého ventilátora, ktorý zabezpečuje nasávanie vzduchu. Je na ňom uchytený aj PCB s elektronikou AD prevodníka a tiež samostatný PCB s jedným so senzorov teploty a vlhkosti.

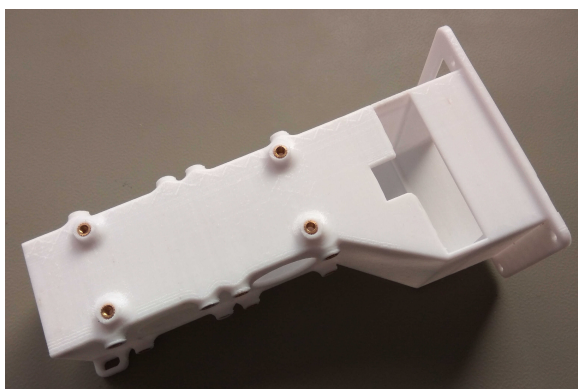
Ako vidieť z obrázku 5.13 je tvar tunela podstatne zložitejší, ako bol v testovacom zariadení. Rozšírená časť tunela sa priskrutkuje na otvor v pravej bočnej stene skrinky.

Do obdĺžnikového otvoru v rozšírenej vstupnej časti tunela sa zasúva plastový držiak vzduchového filtra v ktorom je vložený vymeniteľný filter triedy G3 ⁶.

⁶Filtračné triedy definujú veľkosť častíc, ktoré filter dokáže zachytiť. Skupina G sú základné filtre pre hrubý prach. G3 označuje základné prachové filtre. Až trieda G4 má stanovený rozmer častíc, ktoré musí zachytiť a to $> 10 \mu\text{m}$.



Obrázok 5.12: 3D model tunelu – podklad pre tlač. Zdroj: autor práce



Obrázok 5.13: Vytlačený vzduchový tunel. Zdroj: autor práce



Obrázok 5.14: Vytlačený držiak aj s osadeným vzduchovým filtrom. Zdroj: autor práce

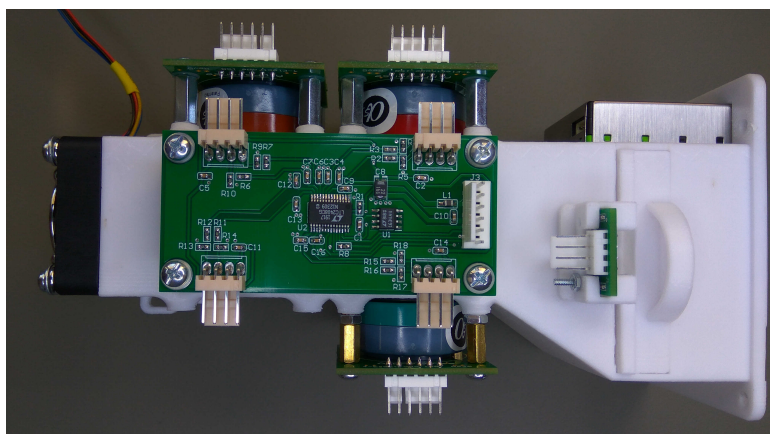
Držiak je riešený tak, aby bol ľahko prístupný a vyberateľný. Filter slúži na zachytávanie hrubšieho prachu aby sa nedostával do tunela a z neho do skrinky, čím sú chránené jednak senzory plynov a tiež elektronika vo vnútri skrinky.

Bezprostredne za filtrom je umiestnený, v samostatnom držiaku, PCB s jedným so senzorov merania teploty a vlhkosti.

Na vrchnej časti rozšíreného konca meracieho tunela je ešte vytvorené miesto na uloženie a prichytenie senzora prachových častíc. Vzduch pre tento senzor nejde cez prachový filter, aby nebolo ovplyvňované meranie množstva prachových častíc.

Na opačnom (úzkom) konci tunela je priskrutkovaný ventilátor, ktorý nasáva do tunela vonkajší vzduch.

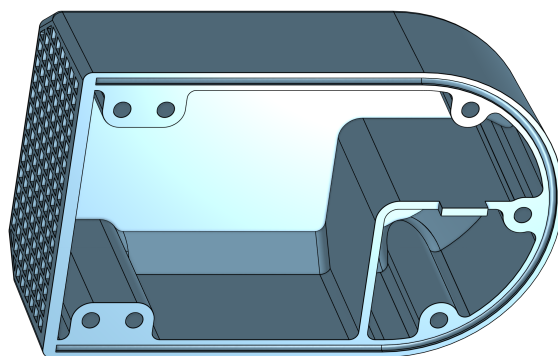
Na obrázku 5.15 je kompletne zostavený vzduchový tunel s dielmi, ktoré sú na ňom pripevnené.



Obrázok 5.15: Zostavený vzduchový tunel. Zdroj: autor práce

Kryt vstupného otvoru vzduchu

Na vzduchový tunel nadväzuje z vonkajšej strany skrinky plastová ochrana vstupného otvoru vytvorená 3D tlačou. Jej účelom je zabrániť vnikaniu dažďa, snehu, vetra a väčšieho hmyzu do vstupného otvoru tunela a do senzora prachových častíc.



Obrázok 5.16: Kryt vstupného otvoru vzduchu (3D model). Zdroj: autor práce

Na svojom spodnom okraji má vytvorenú mriežku otvorov s rozmermi 3 x 3 mm, ktoré tvoria prvotnú ochranu pred vniknutím nežiadúcich telies.

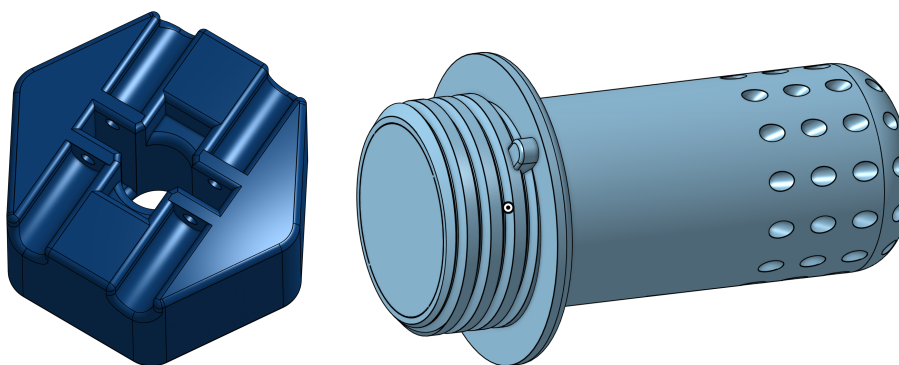
Vo vnútri je vytvorená priehradka, ktorá oddeľuje výstupný otvor senzora prachových častíc od vstupného priestoru. Z tohto malého priestoru postupuje potom vzduch tiež do tunela. Na okraji, ktorý prilieha ku skrinke je vytvorená drážka do ktorej je vložené gumové tesnenie, aby sa vytvoril zhora a z bokov vodotesný spoj.

Kryt výstupného otvoru vzduchu

Na opačnej strane skrinky ako vstupný otvor vzduchu je výstupný otvor vzduchu (vľavo na obrázku 5.11). Z vnútornej strany je k tomuto otvoru priskrutkovaný držiak s filtrom triedy G2 (základné filtre pre hrubý prach) a väčší ventilátor, ktorý zabezpečuje cirkuláciu vzduchu pre elektroniku a jeho vyfukovanie do vonkajšieho priestoru. Z vonkajšej strany skrinky je na tomto mieste podobný kryt ako na vstupnom otvore. Má takú istú mriežku a tesnenie na obvode, ale nemá žiadnu priehradku vo vnútri. Tiež bol vytvorený 3D tlačou.

Kryt mikrofónu

Ďalším vytlačeným plastovým dielom, ktorý sa nachádza na vonkajšej strane skrinky, je kryt na PCB s mikrofónom a elektronikou na meranie hluku.



(a) : Vnútorná matica

(b) : Vonkajší kryt

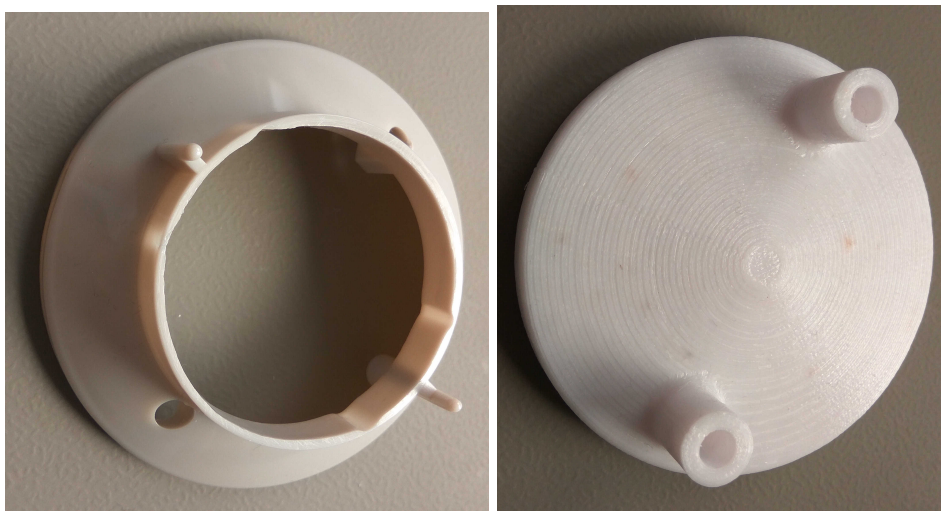
Obrázok 5.17: Kompletný kryt mikrofónu. Zdroj: autor práce

Tento diel pozostáva z dvoch častí. Z valcového vonkajšieho krytu so šikmými otvormi a závitom a z vnútornej matice, ktorou sa kryt pripevní ku skrinke. V priestore závitú je vidieť výstupok, ktorý zapadne do drážky v otvore na skrinke. Tým sa zabráni, aby sa dal kryt otáčať a tým odskrutkovať z vonkajšej strany.

Radiačný kryt

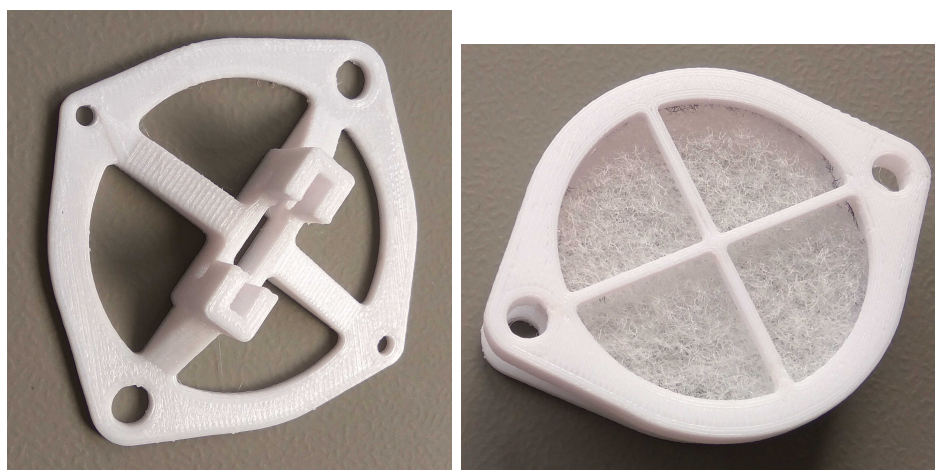
Ďalším konštrukčným prvkom, ktorý je zvonka na spodnej strane skrinky, je radiačný kryt. Toto umiestnenie bolo zvolené za účelom čiastočného skrytia radiačného krytu do tieňa samotnej skrinky. Je v ňom umiestnený senzor na meranie vonkajšej teploty a vlhkosti. Kryt pozostáva z viacerých častí. Najviditeľnejších je sedem jednotlivých segmentov miskovitého tvaru, ktoré umožňujú voľné prúdenie vzduchu, ale zabráňujú priamemu prístupu slnečných

lúčov k teplotnému senzoru a súčasne ho chránia pred dažďom a snehom. Tieto segmenty boli kúpené ako súčasť radiačného krytu, ktorý bol následne rozobraný. Spodný plný segment bol vytlačенý 3D tlačou, tak ako aj držiak PCB so senzorom teploty a vlhkosti. Ako aj vnútorný držiak prachového filtra triedy G3 umiestnený v skrinke. Mechanickú kostru radiačného krytu tvoria dve oceľové závitové tyče, ktoré držia spolu všetky segmenty a diely. Radiačný kryt je konštruovaný tak, že cezeň môže prúdiť vzduch až dovnútra skrinky. Týmto spôsobom sa zvyšuje objem vzduchu na chladenie vnútorného priestoru s elektronikou, ale aj samotného radiačného krytu v letnom období, kedy by mohlo dochádzať k jeho prehrievaniu. Toto prúdenie je vytvárané veľkým ventilátorom vo vnútri skrinky.



(a) : Stredný segment

(b) : Spodný segment

Obrázok 5.18: Segmenty radiačného krytu. Zdroj: autor práce

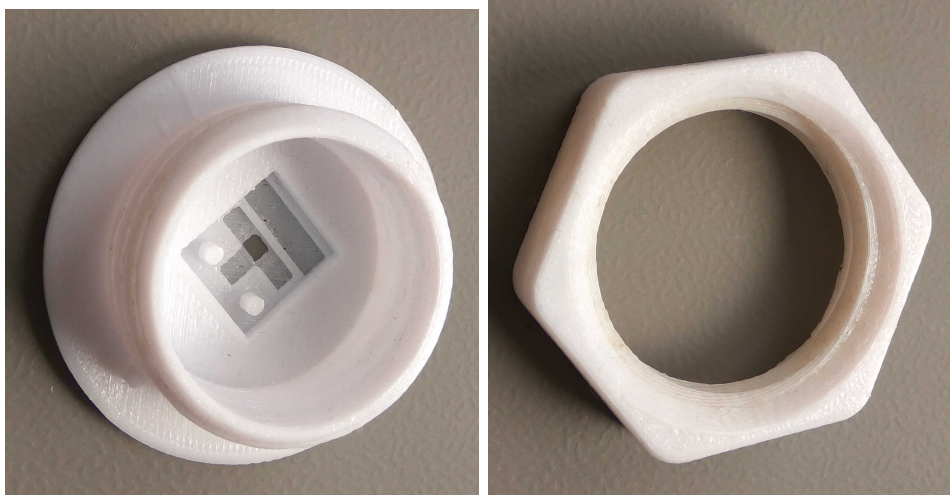
(a) : Držiak teplomeru

(b) : Držiak filtra

Obrázok 5.19: Diely radiačného filtra. Zdroj: autor práce

Držiak UV senzora

Na hornej strane skrinky sa nachádza držiak UV senzora. Pozostáva z dvoch plastových vytlačených dielov. Vonkajší diel s malým otvorom uprostred a krycím ochranným sklom, ktoré prepúšťa svetlo na senzor, ale zabraňuje vniknutiu vody a prachu. Vnútorný diel je príslušná matica, ktorou sa držiak pevne spojí so skrinkou.



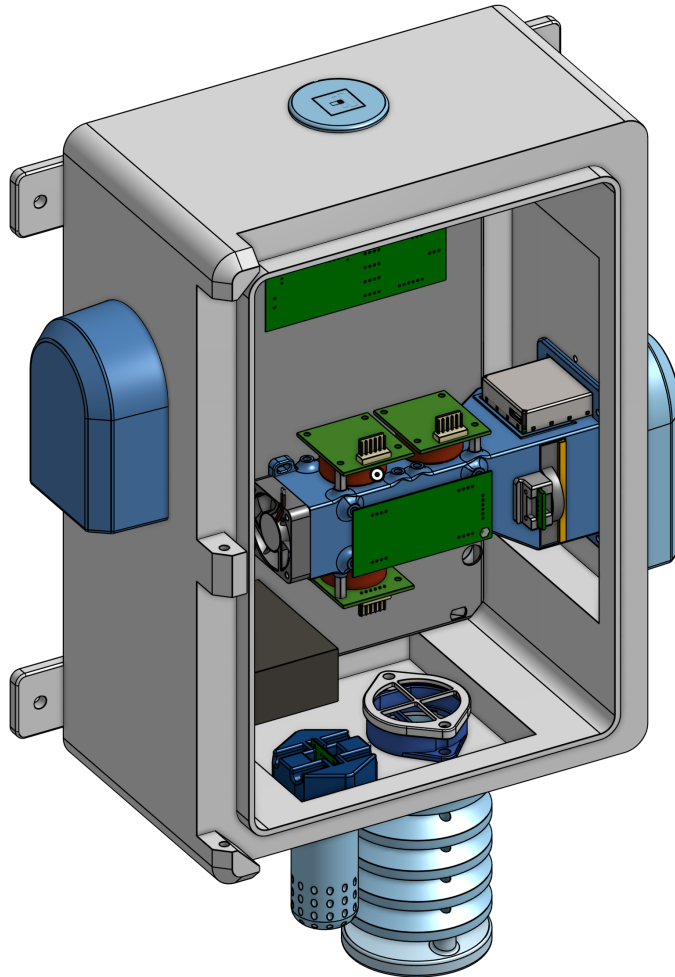
(a) : Vonkajší kryt

(b) : Vnútorná matica

Obrázok 5.20: Držiak UV senzora. Zdroj: autor práce

3D model zariadenia

Na záver časti o mechanickej konštrukcii skrinky a ďalších dielov je zobrazený 3D model celého zariadenia. Na tomto modeli je vidieť rozmiestnenie a proporcie jednotlivých dielov, ktoré boli popisované v tejto časti práce.



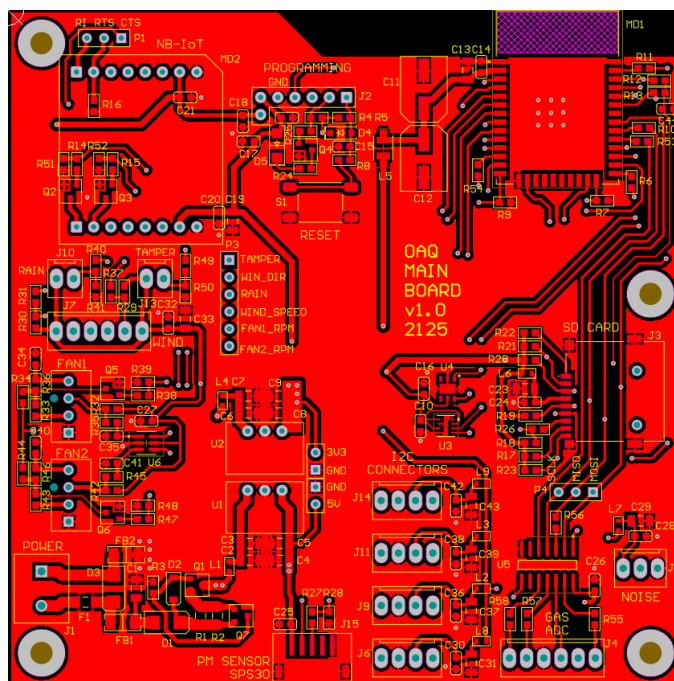
Obrázok 5.21: Celkový 3D model zariadenia. Zdroj: autor práce

5.2.3 Návrh plošných spojov

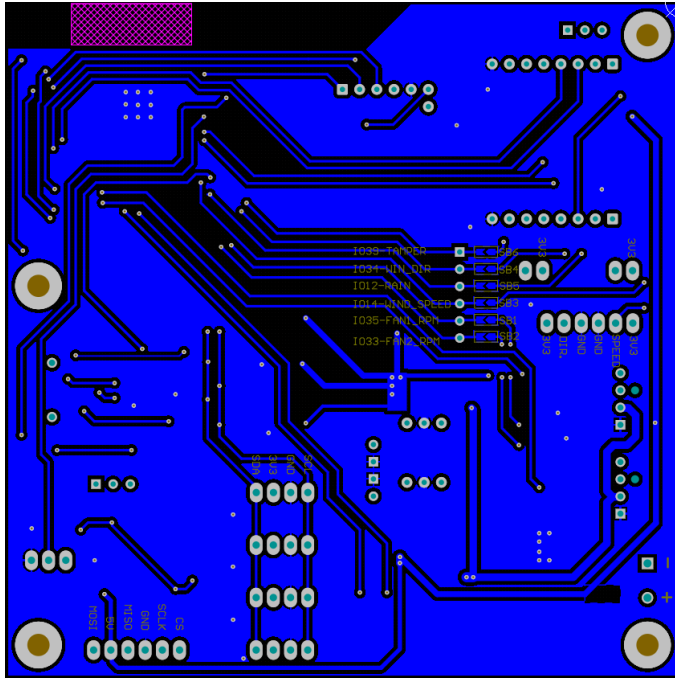
Hlavná doska elektroniky

Má rozmery 100 x 100 mm. Nachádzajú sa na nej ochranné obvody napájania, sekundárne zdroje 5 V a 3,3 V, riadiaca jednotka, prevodníky napätovej úrovne na riadenie ventilátorov, prevodníky napätovej úrovne komunikácie s blokom NB-IoT, obvody a držiak SD karty a všetky potrebné konektory na pripojenie obvodov mimo tejto dosky.

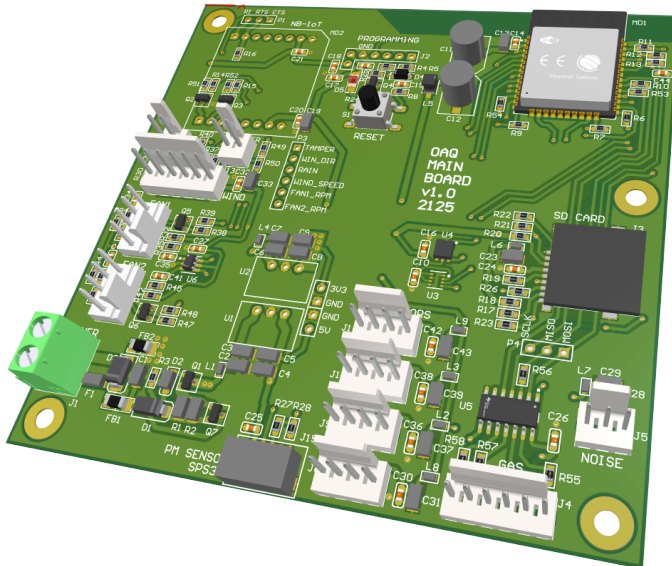
Blok riadiacej jednotky si preto, lebo je na ňom aj plošná anténa na WiFi komunikáciu, vyžaduje podľa doporučenia výrobcu určité umiestnenie, pokiaľ je montovaná na väčšiu dosku plošných spojov. Aby táto požiadavka bola splnená, je riadiaca jednotka umiestnená na pravom hornom okraji. Ostatné súčiastky a bloky boli pokiaľ možno rozmiestnené s ohľadom na minimálnu dĺžku signálových ciest, možnosti vytvoriť čo najlepšie tienenie „rozliatou zemou“ a tiež umiestnením blokovacích a filtračných kondenzátorov čo najbližšie k dôležitým súčiastkam a blokom.



Obrázok 5.22: Hlavná doska vrchná strana spojov (top vrstva). Zdroj: autor práce



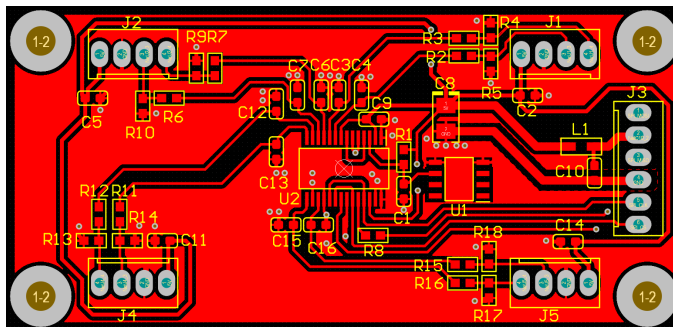
Obrázok 5.23: Hlavná doska spodná strana spojov (bottom vrstva). Zdroj: autor práce



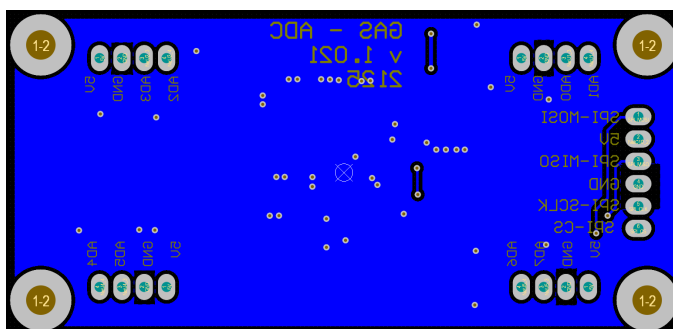
Obrázok 5.24: Vizualizácia hlavnej dosky. Zdroj: autor práce

Doska AD prevodníka

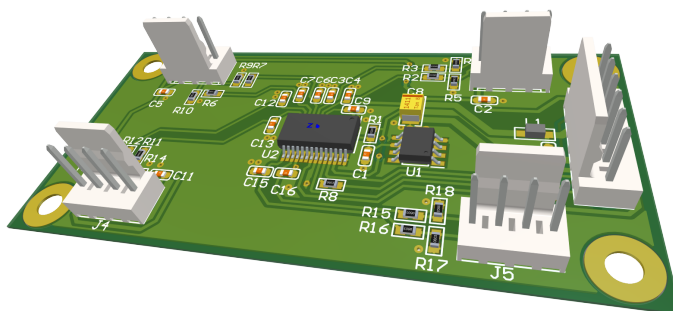
Má rozmery 77 x 35 mm. Táto samostatná doska vznikla hlavne preto, aby sa elektronika AD prevodníka mohla maximálne priblížiť ku senzorum plynov, ktorých signály spracováva, čím sa na minimum obmedzuje prípadné rušenie relatívne slabých analógových signálov od inej elektroniky.



Obrázok 5.25: Doska AD prevodníka, vrchná strana spojov (top vrstva). Zdroj: autor práce



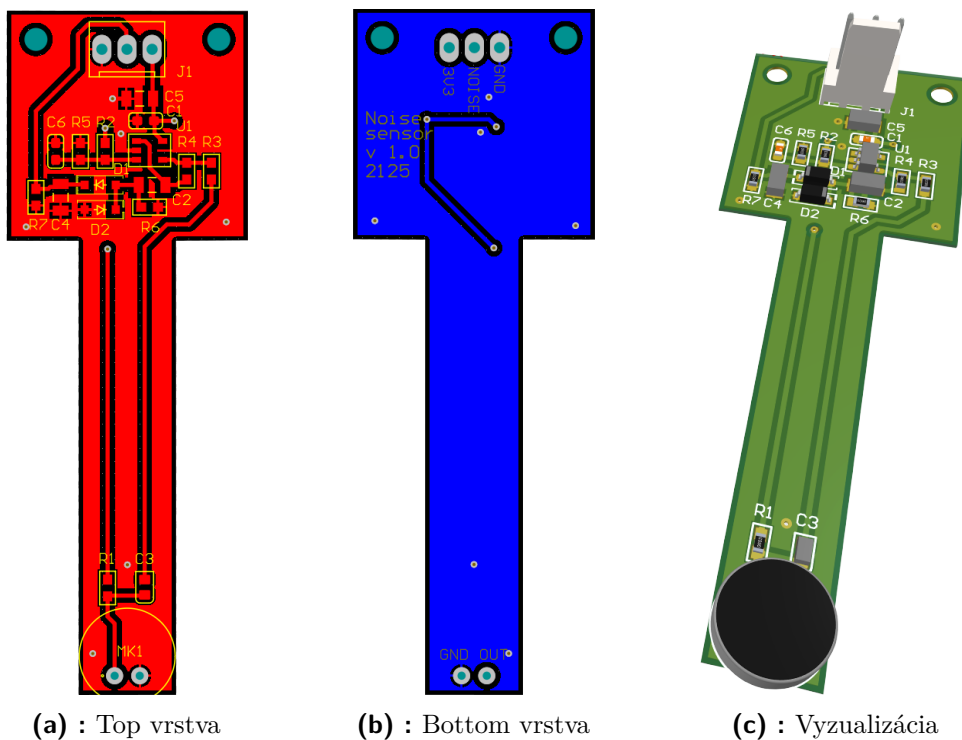
Obrázok 5.26: Doska AD prevodníka, spodná strana spojov (bottom vrstva). Zdroj: autor práce



Obrázok 5.27: Vizualizácia dosky AD prevodníka. Zdroj: autor práce

Doska snímača hluku

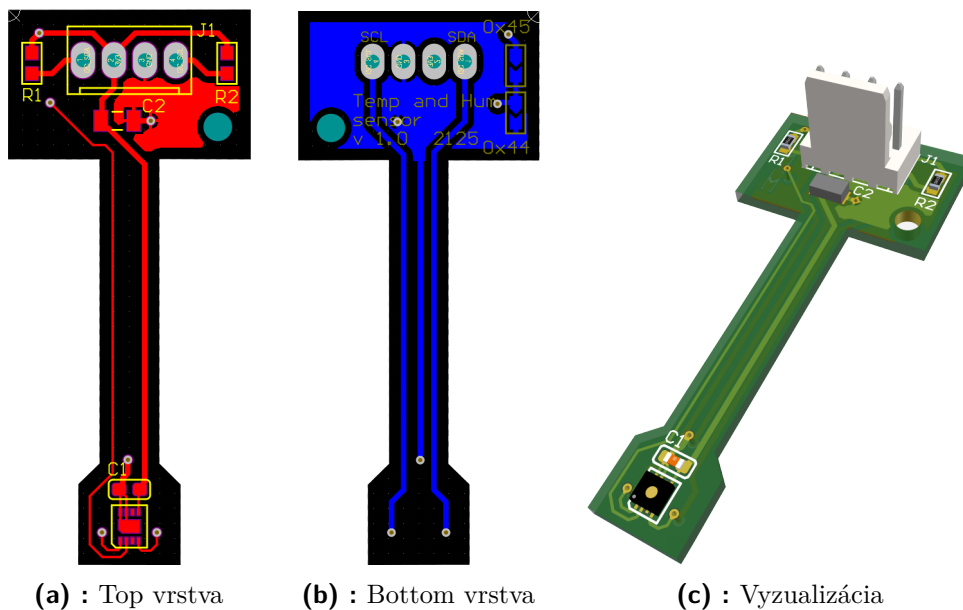
Má rozmery cca 70 x 25 mm. Na konci úzkej vysunutej časti PCB je umiestnený mikrofón, aby bol čo najďalej a čo najviac izolovaný od hluku vo vnútri skrinky. V hornej časti je zosilňovač a usmerňovač analógového hlukového signálu.



Obrázok 5.28: Doska snímača hluku. Zdroj: autor práce

Doska snímača teploty a vlhkosti (T/RH)

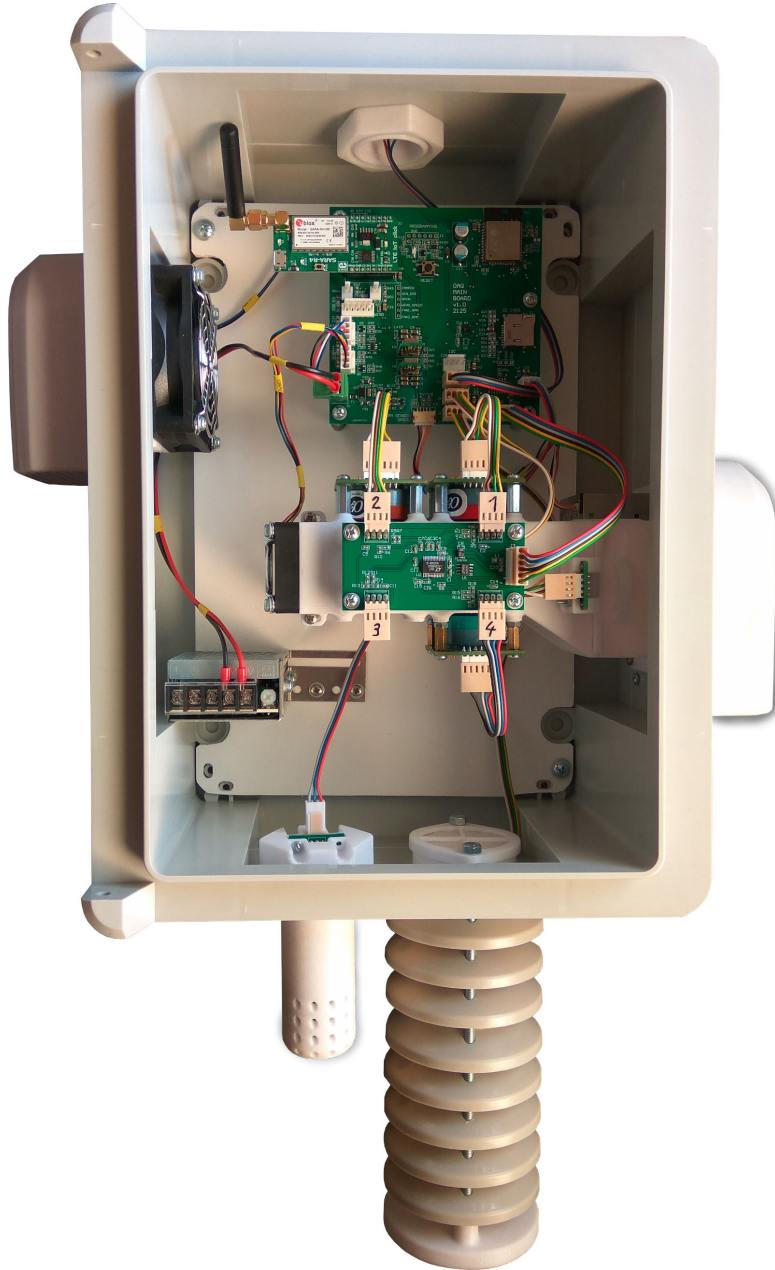
Má rozmery cca 46 x 20 mm. Tieto dosky sú v zariadení osadené dve a sú prakticky rovnaké, až na prepojenie určujúce adresu na I2C zbernici. Samotný snímač je umiestnený na spodnom tenkom konci. Takáto mechanická konštrukcia bola zvolená aby sa minimalizoval prenos tepla cez materiál PCB ku senzoru a teda aby čo najvernejšie snímal teplotu okolitého vzduchu. Jedna takáto doska je vo vzduchovom tuneli a druhá je v radiačnom kryte pod skrinkou.



Obrázok 5.29: Doska snímača T/RH. Zdroj: autor práce

5.2.4 Finálna podoba zostaveného zariadenia

Na nasledujúcich obrázkoch sa nachádza kompletne zostavené zariadenie prototypovej stanice.



Obrázok 5.30: Výsledná podoba zostaveného zariadenia zvnútra. Zdroj: autor práce



Obrázok 5.31: Výsledná podoba zostaveného zariadenia zvonka. Zdroj: autor práce

Kapitola 6

Program riadiacej jednotky a dátového servera

V prvej časti tejto kapitoly bude popísaný program, ktorý beží v riadiacej jednotke prototypového zariadenia. Má na starosti celú činnosť vrátane snímania signálov z jednotlivých vstupov, ich spracovanie, vyhodnocovanie, ukladanie a odosielanie, ale tiež riadenie ventilátorov.

V druhej časti tejto kapitoly bude stručne popísaný program, ktorý prijíma, spracováva, ukladá a na webe prezentuje údaje posielané z prototypovej stanice.

6.1 Program riadiacej jednotky prototypovej stanice

Ako programovací jazyk bola použitá kombinácia C / C++. Hlavným vývojovým nástrojom bolo Microsoft Visual Studio do ktorého bolo doinštalované cross-platform IDE PlatformIO a v rámci neho sa použil Arduino Framework.

Pre potreby prototypovej stanice obsahuje zdrojový kód programu približne 2800 riadkov kódu logicky rozdelených do 36 súborov. Po kompilácii a linkovaní s externými knižnicami vznikne výsledný súbor so spustiteľným kódom veľkosti 900 kB, ktorý sa nahrá do pamäti riadiacej jednotky.

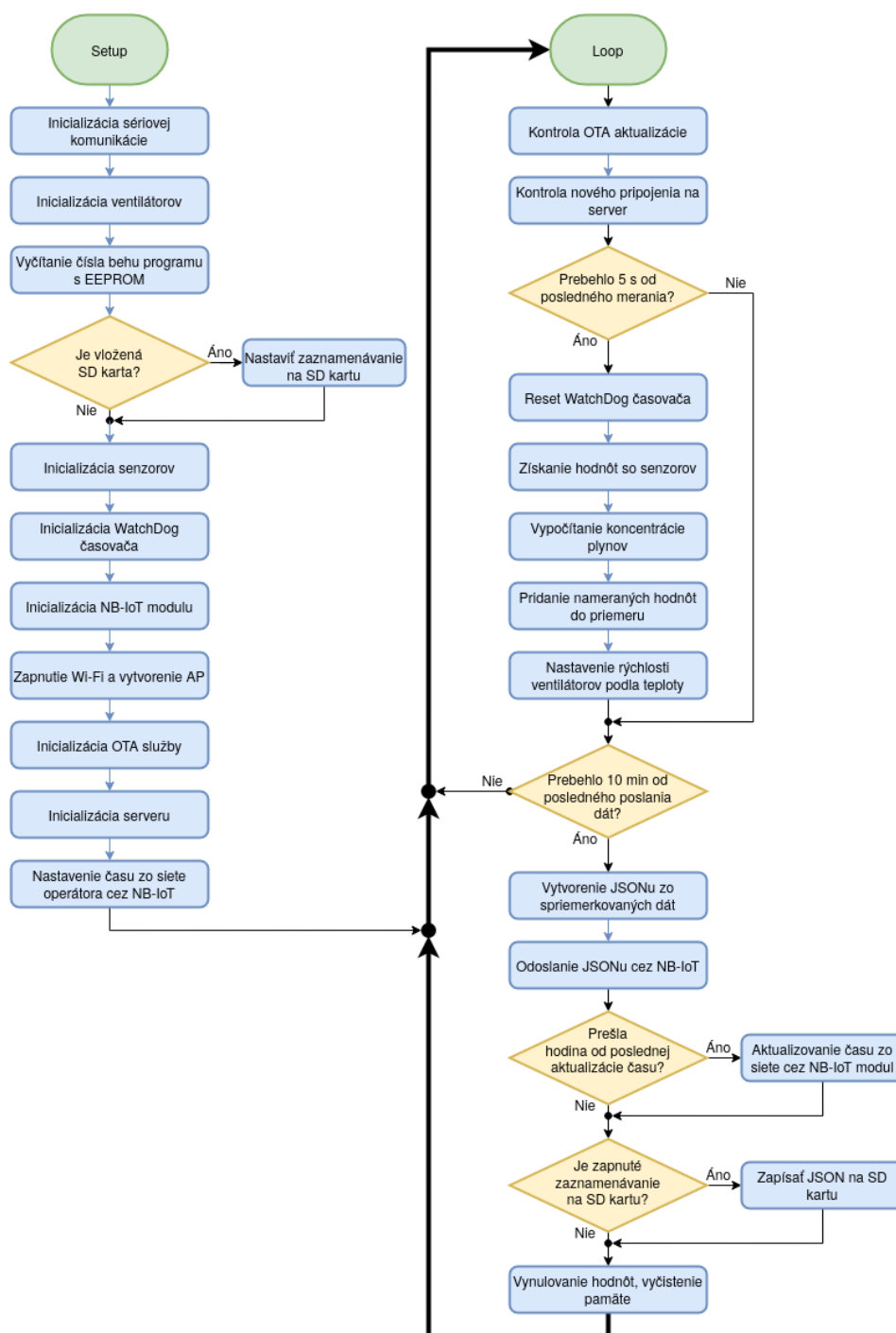
Vývojový diagram celého programu je na obrázku 6.1.

Program sa dá rozdeliť na dva, na seba nadväzujúce, logické celky. Prvým je blok SETUP, v ktorom po štarte prebehne jednorázová inicializácia a nastavenie základných parametrov. Druhý blok LOOP predstavuje nekonečná programová slučka v ktorej program obstaráva všetky základné funkcie.

6.1.1 SETUP

Ako prvé sa inicializuje sériová komunikácia cez UART rozhranie, aby prípadne mohla riadiaca jednotka posielať výpisy po kábli na konzolu, pokiaľ je pripojená.

Vzhľadom na to, že po zapnutí sa oba ventilátory roztočia na maximálne otáčky, nasleduje inicializácia riadenia ventilátorov a zníženie ich otáčok.



Obrázok 6.1: Vývojový diagram programu riadiacej jednotky. Zdroj: autor práce

Následne sa vyčíta číslo behu programu z EEPROM, inkrementuje sa a nové sa uloží späť. Toto číslo sa používa ako jeden z údajov na vytvorenie mena súboru, do ktorého sa ukladajú dáta na SD kartu. Je tak možná jednoznačná identifikácia dát aj v prípade, že sa nepodarí získať časovú značku z NB-IoT

komunikácie.

V ďalšom kroku sa zisťuje prítomnosť SD karty v držiaku a nastaví sa príznak zaznamenávania dát na kartu.

Nasleduje postupná inicializácia komunikácie a testovanie pripravenosti jednotlivých zariadení pripojených na riadiacu jednotku. Sem patrí komunikácia s AD prevodníkom, detektorom prachových častíc, tromi zariadeniami na meranie teploty a vlhkosti, snímačom atmosférického tlaku a snímačom UV žiarenia.

Ďalším dôležitým krokom pre ošetrovanie prípadných problémov počas behu programu je inicializácia WatchDog časovača. Je to od procesora nezávislý časovač, ktorý je nastavený na určitý čas (konkrétne v tomto prípade 5 minút). Ak v nastavenom čase nedôjde k jeho resetu signálom z bežiaceho programu, časovač spôsobí reštart procesora.

Ďalej nasleduje inicializácia bloku NB-IoT, ktorá okrem iného obsahuje nastavenie používaného operátora a prihlásenie do jeho siete.

Riadiaca jednotka zapne svoj WiFi komunikačný modul a vytvorí skrytý prístupový bod (AP) WiFi siete podľa nastavených parametrov.

Nasleduje inicializácia OTA (Over The Air) služby. Je to označenie pre metódu distribúcie nového programu a konfigurácie pre bezdrôtové zariadenia. V tomto prípade umožňuje aktualizáciu programu riadiacej jednotky cez WiFi AP.

V ďalšom kroku sa urobí inicializácia konzolového WiFi servera, ktorý dovoľuje pripojenie na konzolové rozhranie riadiacej jednotky cez WiFi rozhranie. Nie je teda nutné pripojiť sa na riadiacu jednotku káblom.

Posledný krok z tohto bloku je nastavenie systémového času a dátumu zo siete operátora cez NB-IoT rozhranie.

6.1.2 LOOP

Ako prvé sa kontroluje, či nie je požiadavka na nahranie nového programu cez službu OTA.

Ďalej sa kontroluje či neprišla požiadavka na pripojenie na konzolový WiFi server, alebo či z tohoto pripojenia neprišiel nejaký príkaz.

Testuje sa, či od posledného merania hodnôt senzorov neuplynul nastavený časový interval. Teraz je nastavené, že sa každých 5 sekúnd odčítavajú hodnoty zo všetkých meracích senzorov. Tieto hodnoty sa pre každý parameter akumulujú a po uplynutí intervalu v ktorom sa dáta odosielaajú (teraz nastavené na 10 minút), sa vypočíta ich priemer. Týmto priemerovaním sa zabezpečuje aby náhodné fluktuácie meraných hodnôt čo najmenej ovplyvňovali výslednú hodnotu.

Ak ešte neuplynul ani interval 5 sekúnd, ani interval 10 minút, tak sa program vracia na začiatok slučky LOOP.

Ak už uplynul interval vyčítavania meraných hodnôt zo senzorov potom:

- Nasleduje reset WatchDog časovača.
 - Vyčítajú sa nové hodnoty z meracích senzorov.
 - Z vyčítaných hodnôt senzorov plynov sa vypočíta okamžitá koncentrácia

meraných plynov. Podrobnejšie informácie o týchto výpočtoch sú uvedené v samostatnej časti na strane 82.

Namerané a vypočítané hodnoty senzorov sa pripočítajú k akumulovaným hodnotám a u každého nameraného alebo vypočítaného údajaja sa zväčší počítadlo počtu meraní.

Vykoná sa nové nastavenie rýchlosti ventilátorov podľa hodnoty teplôt. Testuje sa, či uplynul nastavený čas na posielanie nameraných dát (teraz nastavené na 10 minút).

Ak ešte neuplynul tento čas, tak sa program vracia na začiatok slučky LOOP.

Ak už uplynul tento čas, potom:

- Vypočítajú sa priemery.

Vytvorí sa JSON ¹ správa. Štruktúra správy je v prílohe C

Správa sa odošle cez modul NB-IoT prostredníctvom mobilného operátora na nastavený dátový server.

Otestuje sa, či uplynula hodina od poslednej aktualizácie systémového času, ak áno, tak sa tento čas aktualizuje podľa informácii od mobilného operátora.

Ak je zapnuté zaznamenávanie dát na SD kartu, tak sa JSON správa zapíše na SD kartu.

Vynulujú sa premenné akumulovaných hodnôt meraní a počítadiel počtu meraní.

Návrat na začiatok slučky LOOP.

■ Výpočet koncentrácie plynov z nameraných údajov

Senzory plynov použité na stavbu prototypového zariadenia sú z rodiny B4 od firmy Alphasense. Každý senzor má teda 4 elektródy, ktoré sú označené ako WE – Working Electrode (pracovná elektróda), AE – Auxiliary Electrode (pomocná elektróda), RE – Reference Electrode (referenčná elektróda), CE – Counter Electrode (protielektróda). Výrobcom dodaná vyhodnocovacia elektronika s označením ISB (podrobnejšie na strane 46) má dva výstupné signály označené WE a AE. Obe hodnoty sa udávajú v mV. Oba tieto signály vstupujú do výpočtu výslednej koncentrácie plynu.

Výrobca vo svojej dokumentácii [111] odporúča pre každý druh senzoru použitie určitých vzorcov pre výpočet konečnej hodnoty, ktoré zohľadňujú aj korekciu na teplotu. Korekcia na vplyv teploty je dôležitá hlavne pri meraní nízkych koncentrácií plynov. Pri týchto meraniach sa prejavuje vplyv tzv. prúdu nulového pozadia (zero background current), ktorý prechádza medzi elektródami (WE – CE a AE – CE) a je hodne závislý od teploty.

Pre senzory NO2-B43F a OX-B431 je použitý nasledujúci vzorec, ktorý výrobca označuje ako algoritmus 1:

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T \cdot (AE_u - AE_e)$$

¹JavaScript Object Notation, je to dátový formát nezávislý na počítačovej platforme a je určený na prenos dát.

Pre senzor NO-B4 je použitý nasledovný vzorec, ktorý výrobca označuje ako algoritmus 2:

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - k_T \cdot \left(\frac{WE_0}{AE_0} \right) \cdot (AE_u - AE_e)$$

Pre senzor SO2-B4 je použitý nasledovný vzorec, ktorý výrobca označuje ako algoritmus 4:

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - WE_0 - k_T''$$

Kde jednotlivé symboly znamenajú:

WE_c = korigovaný WE výstup – výsledná hodnota [mV]

WE_u = nekorigovaný WE výstup z ISB dosky [mV]

AE_u = nekorigovaný AE výstup z ISB dosky [mV]

WE_e = WE elektronický offset na ISB doske [mV]

AE_e = AE elektronický offset na ISB doske [mV]

WE_0 = WE senzor nula, t.j. WE výstup senzoru, ak je koncentrácia daného plynu nulová [mV]

AE_0 = AE senzor nula, t.j. AE výstup senzoru, ak je koncentrácia daného plynu nulová [mV]

n_T, k_T, k_T'' = teplotne závislé korekčné faktory, ktoré výrobca udáva vo svojom dokumente [111] vo forme tabuliek.

Hodnoty WE_e, AE_e, WE_0, AE_0 dodáva výrobca, ak sú zakúpené senzory spolu s príslušnou ISB doskou, pre každý konkrétny kus samostatne.

Výsledná korigovaná hodnota koncentrácie plynu sa potom dostane vydelením hodnoty WE_c hodnotou citlivosti konkrétneho senzora udávanou v mV/ppb . Hodnotu citlivosti každého kusu senzora dodá výrobca pri zakúpení.

6.2 Program dátového servera

Ako súčasť vývoja, konštrukcie a skúšania prototypového zariadenia bolo vytvorené a tiež počas písania tejto práce sa požívalo ako domáci dátový server zariadenie, ktorého základ tvorí jednodoskový počítač Raspberry Pi s nasledujúcimi parametrami:

Model	Raspberry Pi 3 Model B+
Procesor	Quad Core 1.2 GHz Broadcom BCM2837 64 bit
RAM	1 GB
Micro SD	16 GB
LAN	100 Base Ethernet, Wireless
USB	4 porty USB2
Diaplay	HDMI
OS	Raspbian 9.13
Databáza	SQLite v3.16.2

SQLite je v C jazyku napísaná knižnica, ktorá implementuje plnohodnotný SQL databázový systém. Je open-source, multiplatformná, jedna z najpoužívanejších na svete.

Na zjednodušenie vytvorenia programu na príjem nameraných dát, ktoré posiela mobilný operátor cez internet, ako aj ich ukladania do databázy a tiež prezentáciu spracovaných dát na webe bol použitý programovací nástroj Node-RED v1.2.9.

Umožňuje cez webové rozhranie vytvárať udalosťami riadené aplikácie. Je to vhodný automatizačný nástroj na spracovanie a zobrazenie rôznych veličín a stavov. Pomocou grafického rozhrania sa dá ľahko nadefinovať celá automatizácia napríklad od prijatia správy alebo paketu cez ich spracovanie, uloženie do databázy a prezentáciu. Pre činnosti, ktoré sa nedajú urobiť pomocou grafického programovania sa dajú vytvoriť bloky, ktoré obsahujú časti programového kódu napísaného v jazyku JavaScript.

Vývojový diagram programu slúžiaceho na spracovanie, ukladanie a prezentáciu nameraných dát z prototypovej stanice je na obrázku 6.2. Je ho možné rozdeliť na dve vetvy:

Modrú, ktorá popisuje procesy, ktoré sa vykonávajú po prijatí nových dát od mobilného operátora a zelenú, ktorá slúži na grafické zobrazenie dát užívateľovi cez webové rozhranie.

Modrá vetva:

Prvý blok je vlastne jednoduchý UDP server, ktorý čaká na definovanom porte na správu od mobilného operátora. Táto udalosť spustí ďalšie spracovanie.

V nasledujúcom kroku sa prevedie textový reťazec vo formáte JSON na JavaScriptový objekt, ktorý umožňuje ďalšie spracovanie.

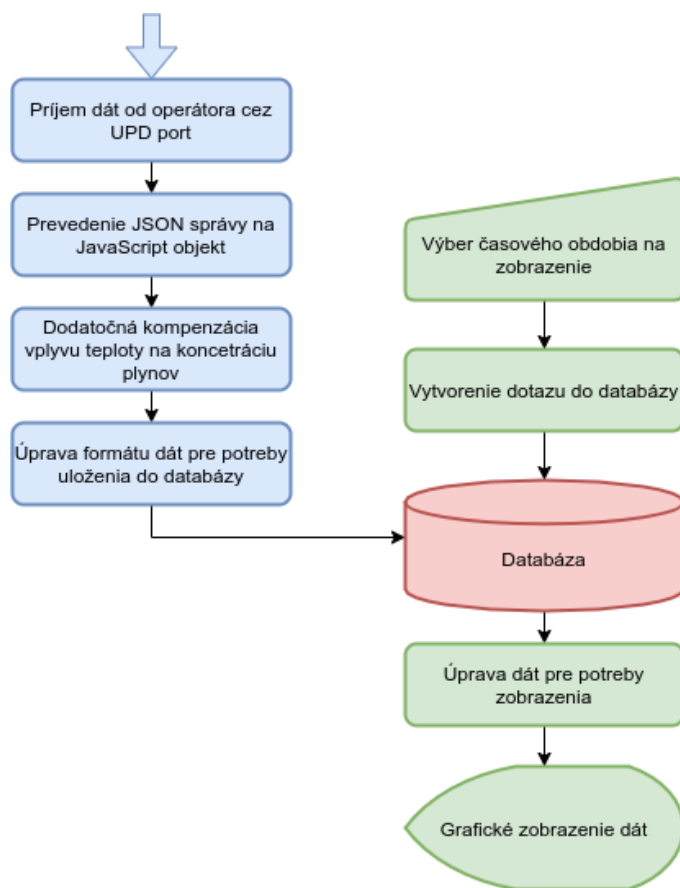
Na základe literatúry odporúčenej výrobcom senzorov plynov, ako aj literatúry, ktorá sa zaoberá touto oblasťou a je dostupná na internete, sa vykonáva dodatočná kompenzácia vplyvu teploty na namerané dáta koncentrácie plynov. Podrobnejšie bude popísaná v časti 6.2.1.

Zostaví sa reťazec SQL príkazu na uloženie dát do databázy.

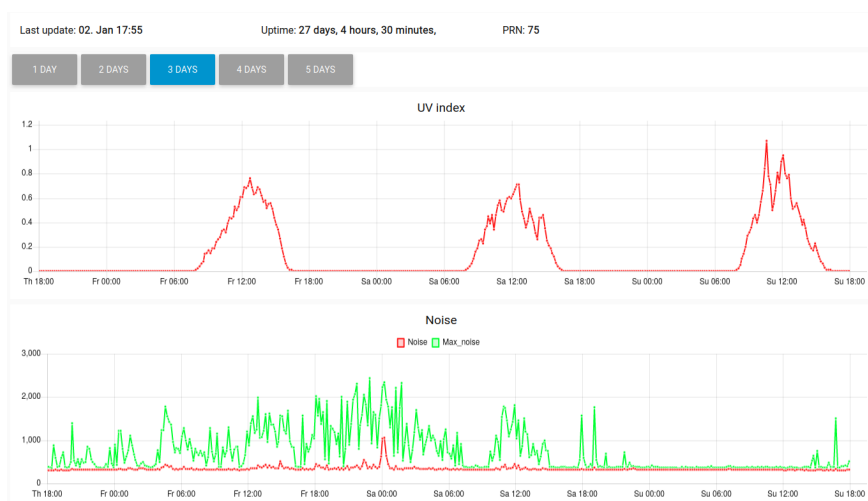
Zelená vetva:

Po výbere časového obdobia užívateľom sa zostaví dotaz do databázy prostredníctvom ktorého sa načítajú požadované dáta. Tieto sa následne spracujú a zobrazia v podobe grafov vo webovom rozhraní.

Príklad zobrazenia je na obrázku 6.3



Obrázok 6.2: Vývojový diagram programu dátového a webového servera. Zdroj: autor práce



Obrázok 6.3: Ukážka zobrazenia nameraných dát. Zdroj: autor práce

6.2.1 Algoritmus dodatočnej kompenzácie vplyvu teploty na meranie plynov

Tak ako je popísané v časti 6.1.2 pri meraní nízkych koncentrácií plynov sa prejavuje ovplyvňovanie výsledku zmenou teploty meraného plynu, teda teplotou vonkajšieho prostredia. Aby sa tento vplyv dal čo najlepšie odstrániť, odporúča výrobca senzorov vo svojom dokumente [111] ešte okrem základnej kompenzácie použitím vzorcov uvedených v časti 6.1.2, použiť aj dodatočnú kompenzáciu. Ako dobrý príklad dodatočného kompenzovania výsledkov uvádza odkazy na práce uverejnené v časopise *Atmospheric Environment* [112], [113]. Pre účely tejto práce bol skúšobne použitý algoritmus podrobne popísaný v práci [113].

Jeho základ spočíva v tom, že sa zo získaných dát koncentrácií plynu späťne určí tzv. extrahovaná základná línia (extracted baseline). Túto líniu tvoria minimá koncentrácie z hodnôt nameraných za určitý časový interval. V našom prípade sa meranie robí každých 5 sekúnd a dĺžka intervalu výberu minima je momentálne nastavená na 10 minút, teda zo 120 hodnôt. Takto sa vytvorí základná línia minimálne pre časový úsek 24 hodín. Za ten istý časový úsek musia byť k dispozícii aj hodnoty teplôt meraného plynu približne v tých istých časových intervaloch. Z týchto dvoch súborov hodnôt (teploty, minimá koncentrácie) sa vypočíta korelačná krivka (môže byť lineárna, exponenciálna, ...), ktorá vyjadruje funkčnú závislosť minimá koncentrácie od teploty. Táto funkčná závislosť sa použije na vytvorenie tzv. prispôbenej základnej línie (fitted baseline) pre daný časový úsek. Pre každý interval výberu (10 minút) sa vezme nameraná hodnota teploty a k nej sa z funkčnej závislosti korelačnej krivky určí hodnota pozadia. Ako posledný krok sa táto hodnota pozadia odčíta od nekorigovaných dát koncentrácie plynu a tým sa vytvorí hodnota koncentrácie plynu po dodatočnej korekcii.

S týmto algoritmom sa dá ešte rôzne experimentovať. Dá sa napríklad meniť interval výberu minima (teraz 10 minút), dá sa prípadne na takto získané minimá uplatniť kľzavý priemer s rôznou veľkosťou intervalu. Dá sa skúšať meniť dĺžka časového úseku (teraz 24 hodín), prípadne používať získanú funkčnú závislosť (korelačnú krivku) na dáta z iného časového úseku.

Kapitola 7

Výsledky skúšania a merania

Prvé skúšania funkčnosti zostavenej prototypovej stanice prebehli v domácich podmienkach, najprv v interiéri a potom aj v exteriéri, kde bola ponechaná cca 2 týždne v chode. Tu dokázala aj odolnosť voči poveternostným vplyvom. Preukázala sa plná funkčnosť jednotlivých modulov, a tiež aj stanice ako celku. Všetky senzory boli funkčné a dodávali údaje. Na meranie koncentrácie plynov sa vtedy použili tri senzory, ktoré boli dodané aj s ISB, konkrétne to boli NO, NO₂, SO₂. Fungovalo aj posielanie údajov cez rozhranie NB-IoT mobilného operátora Slovak Telekom, aj keď sa vyskytovali občasné krátkodobé výpadky služby. Čiastočne sa ich podarilo eliminovať zmenou nastavenia parametrov pri inicializácii rozhrania. Zvyšné jednotlivé výpadky boli s veľkou pravdepodobnosťou spôsobené na strane mobilného operátora, ale nepredstavovali problém, keďže merania sa uskutočňujú často a výpadok jednej dátovej správy nijako neovplyvní prezentáciu dát.

Potom bola prototypová stanica prevezená na ďalšie testovanie do Univerzitného centra energeticky efektívnych budov (UCEEB), kde sa ešte doladzovali niektoré drobné nedostatky hlavne na programe riadiacej jednotky. Došlo aj ku zmene mobilného operátora na Vodafone a to výmenou SIM karty v module NB-IoT a tiež parametrov v programe. Preverila sa znova funkčnosť všetkých blokov a stanice ako celku a nechala sa bežať v interiéri cca 1 týždeň a tiež v exteriéri cca 1 týždeň. V tom čase zrazu prestal senzor na meranie plynu NO₂ dávať reálne dáta. Bližším skúmaním a meraním sa zistilo, že vinou nekvalitného vyhotovenia jedného spoja na doske ISB u výrobcu tohto senzora, došlo k poruche. Bol teda objednaný nový senzor NO₂ aj s ISB a taktiež senzor na meranie O₃ aj s ISB. Po dodaní štvrtého senzora (meranie ozónu) a nového senzora na meranie NO₂ z UK sa vykonala ich montáž a zapojenie do prototypovej stanice. Nastavili sa parametre programu aby mohli dva nové senzory fungovať správne.

Po pár dňoch skúšobnej prevádzky v interiéri došlo náhle k prerušeniu posielania dát cez rozhranie NB-IoT. Po premeraní a otestovaní samotnej prototypovej stanice a následnej konzultácii s mobilným operátorom sa ukázalo, že použitá SIM karta mala u mobilného operátora nastavené, pre potreby stanice, nedostatočné parametre na počet správ a objem prenesených dát za mesiac. Po výmene SIM karty za inú s väčším počtom správ a objemom dát už všetko fungovalo správne. Tým sú splnené konštrukčné požiadavky.

7.1 Testovacia prevádzka pri stanici ČHMÚ

Na to aby sa dalo overiť, že použité senzory nielen produkujú nejaké dáta, ale aj to, nakoľko sa tieto dáta približujú dátam z certifikovaných zariadení bolo treba (nad rámec zadania) zabezpečiť prevádzku prototypovej stanice v bezprostrednej blízkosti nejakej meracej stanice s takýmito prístrojmi.

Obrátil som sa s prosbou o spoluprácu na ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav), kde som sa stretol s veľkou ochotou a ústretovosťou. Po dohode umožnili na nejaký čas (približne mesiac) umiestniť prototypovú stanicu v bezprostrednej blízkosti ich meracej stanice. Takže od 6.12.2021 je prototypová stanica umiestnená v areáli Observatoře Praha - Libuš ČHMÚ, kde sa nachádza najkomplexnejšia stanica na meranie koncentrácie znečisťujúcich plynov v Českej republike. Prisľúbili, že poskytnú dáta z ich meracích prístrojov za toto obdobie, aby sa dalo urobiť porovnanie a prípadne nastavenie parametrov prototypovej stanice tak, aby sa dosiahlo čo najlepšej zhody nameraných výsledkov.



(a) : Prototypová stanica

(b) : Pohľad zdola

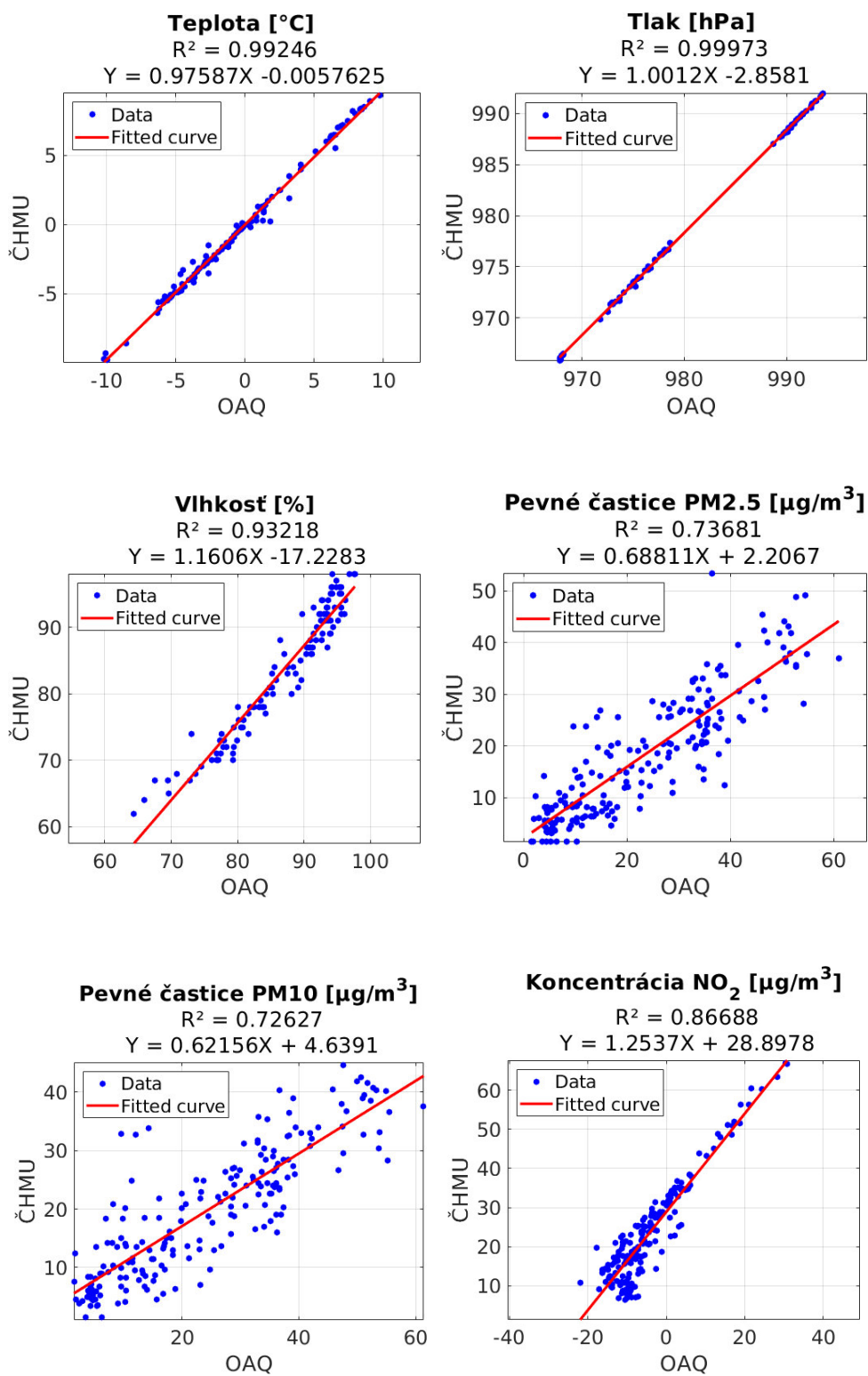
Obrázok 7.1: Umiestnenie v ČHMÚ Praha - Libuš. Zdroj: autor práce

7.2 Porovnanie nameraných údajov

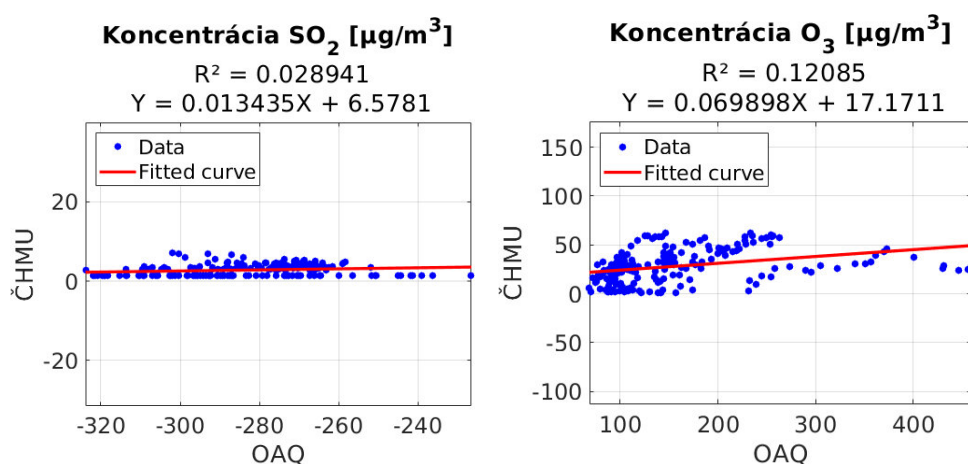
Až tesne pred koncom roka sa dalo urobiť prvé rýchle porovnanie referenčných dát zo stanice ČHMÚ s dátami z prototypovej stanice. Prisľúbené údaje priamo z meracích prístrojov ČHMÚ ešte neboli k dispozícii. Referenčné dáta boli teda zatiaľ prevzaté iba z údajov na ich internetových stránkach [114] a [115].

Podarilo sa zozbierať na porovnanie údaje za obdobie od 16. 12. 2021 do 27. 12. 2021. Boli spracované nasledovné parametre: teplota, tlak, vlhkosť, koncentrácia pevných častíc $PM_{2,5}$ a PM_{10} , koncentrácia NO_2 , koncentrácia SO_2 , a koncentrácia O_3 .

Výsledky porovnania sú uvedené na nasledujúcich stranách.



Obrázok 7.2: Porovnanie meraní. Zdroj: autor práce



Obrázok 7.3: Porovnania meraní. Zdroj: autor práce

Porovnávanie bolo robené pomocou programu Matlab od firmy MathWorks z USA. Ako vstup boli použité údaje z ČHMÚ Praha - Libuš a z merania prototypovej stanice (OAQ) umiestnenej v tej istej lokalite. Boli vytvorené súbory zodpovedajúcich dvojíc údajov z príslušného času a tie boli porovnané lineárnou regresiou. Výsledkom sú grafy, rovnice regresných priamok a korelačných koeficientov ¹ uvedené na predchádzajúcich stranách.

Porovnanie merania teploty:

V sledovanom období sa teplota podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávaní pohybovala od -9,8 °C do +9,3 °C. V tomto rozsahu bola zistená veľmi dobrá zhoda:

Korelačná priamka $y = 0,97587 \cdot x - 0,0057625$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,99246$.

Porovnanie merania atmosférického tlaku:

V sledovanom období sa tlak podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávaní pohyboval od 966 hPa do 992 hPa, i keď získané údaje z ČHMÚ nepokryli celý rozsah rovnomerne. V tomto rozsahu bola zistená výborná zhoda:

Korelačná priamka $y = 1,0012 \cdot x - 2,8581$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,99973$.

Porovnanie merania relatívnej vlhkosti:

V sledovanom období sa relatívna vlhkosť podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávaní pohybovala od 62 % do 98 %. V tomto rozsahu bola zistená veľmi dobrá zhoda:

Korelačná priamka $y = 1,1606 \cdot x - 17,2283$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,93218$.

Porovnanie merania koncentrácie pevných častíc PM_{2,5}:

V sledovanom období sa koncentrácia PM_{2,5} podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávaní pohybovala od 1,5 µg/m³ do 53 µg/m³. V tomto rozsahu bola zistená pomerne dobrá zhoda:

Korelačná priamka $y = 0,68811 \cdot x + 2,2067$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,73681$.

¹Bol použitý Pearsonov korelačný koeficient.

Porovnanie merania koncentrácie pevných častíc PM₁₀:

V sledovanom období sa koncentrácia PM₁₀ podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávania pohybovala od 1,5 µg/m³ do 44 µg/m³. V tomto rozsahu bola zistená pomerne dobrá zhoda:

Korelačná priamka $y = 0,62156 \cdot x + 4,6391$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,72627$.

Ako výstup pre koncentrácie plynov z prototypovej stanice boli použité dáta po prvotnej korekcii na teplotu prostredia, podľa vzorcov, ako ich odporúča výrobca senzorov 6.1.2. Tieto údaje neprešli ešte žiadnym kalibračným prepočtom, preto číselne nezodpovedajú údajom z referenčných prístrojov. Aj k tomu môže poslúžiť toto porovnanie. ČHMÚ uvádza koncentrácie plynov v jednotkách µg/m³, preto boli údaje z prototypovej stanice prepočítané z jednotiek ppb tiež na tieto jednotky pomocou vzorca zo stránky [115].

Porovnanie merania koncentrácie NO₂:

V sledovanom období sa koncentrácia NO₂ podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávania pohybovala od 6,5 µg/m³ do 66,8 µg/m³. V tomto rozsahu bola zistená dobrá zhoda:

Korelačná priamka $y = 1,2537 \cdot x + 28,8978$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,86688$.

Pre tento senzor uvádza výrobca "vlastný šum" na úrovni cca 30 µg/m³, takže asi polovica meraných údajov sa nachádzala pod touto hranicou. Preto je aj úroveň korelácie nižšia. Na grafe pekne vidieť, že nízke hodnoty sú viacej rozptýlené ale pre vyššie hodnoty je korelácia veľmi dobrá. Prípustná hranica pre tento plyn je podľa tabuľky 4.3 40 µg/m³, čo je už bezpečne detegovateľné.

Porovnanie merania koncentrácie SO₂:

V sledovanom období sa koncentrácia SO₂ podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávania pohybovala od 1,3 µg/m³ do 7,2 µg/m³. V tomto rozsahu bola zistená veľmi zlá zhoda:

Korelačná priamka $y = 0,013435 \cdot x + 6,5781$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,028941$.

Pre tento senzor uvádza výrobca "vlastný šum" na úrovni cca 14 µg/m³, takže všetky merané údaje sa nachádzala hlboko pod touto hranicou. Preto je aj úroveň korelácie veľmi nízka. Prípustná hranica pre tento plyn je podľa tabuľky 4.3 125 µg/m³, čo je už bezpečne detegovateľné. Zatiaľ však takéto hodnoty neboli namerané.

Porovnanie merania koncentrácie O₃:

V sledovanom období sa koncentrácia O₃ podľa údajov ČHMÚ v lokalite porovnávania pohybovala od 1,0 µg/m³ do 62,2 µg/m³. V tomto rozsahu bola zistená zlá zhoda:

Korelačná priamka $y = 0,069898 \cdot x + 17,1711$

Korelačný koeficient $R^2 = 0,12085$.

Pre tento senzor uvádza výrobca "vlastný šum" na úrovni cca 31 µg/m³, takže veľká časť nameraných údajov sa nachádzala hlboko pod touto hranicou. Preto je aj úroveň korelácie veľmi nízka. Prípustná hranica pre tento plyn je podľa tabuľky 4.3 120 µg/m³, čo je už bezpečne detegovateľné. Zatiaľ však takéto hodnoty neboli namerané.

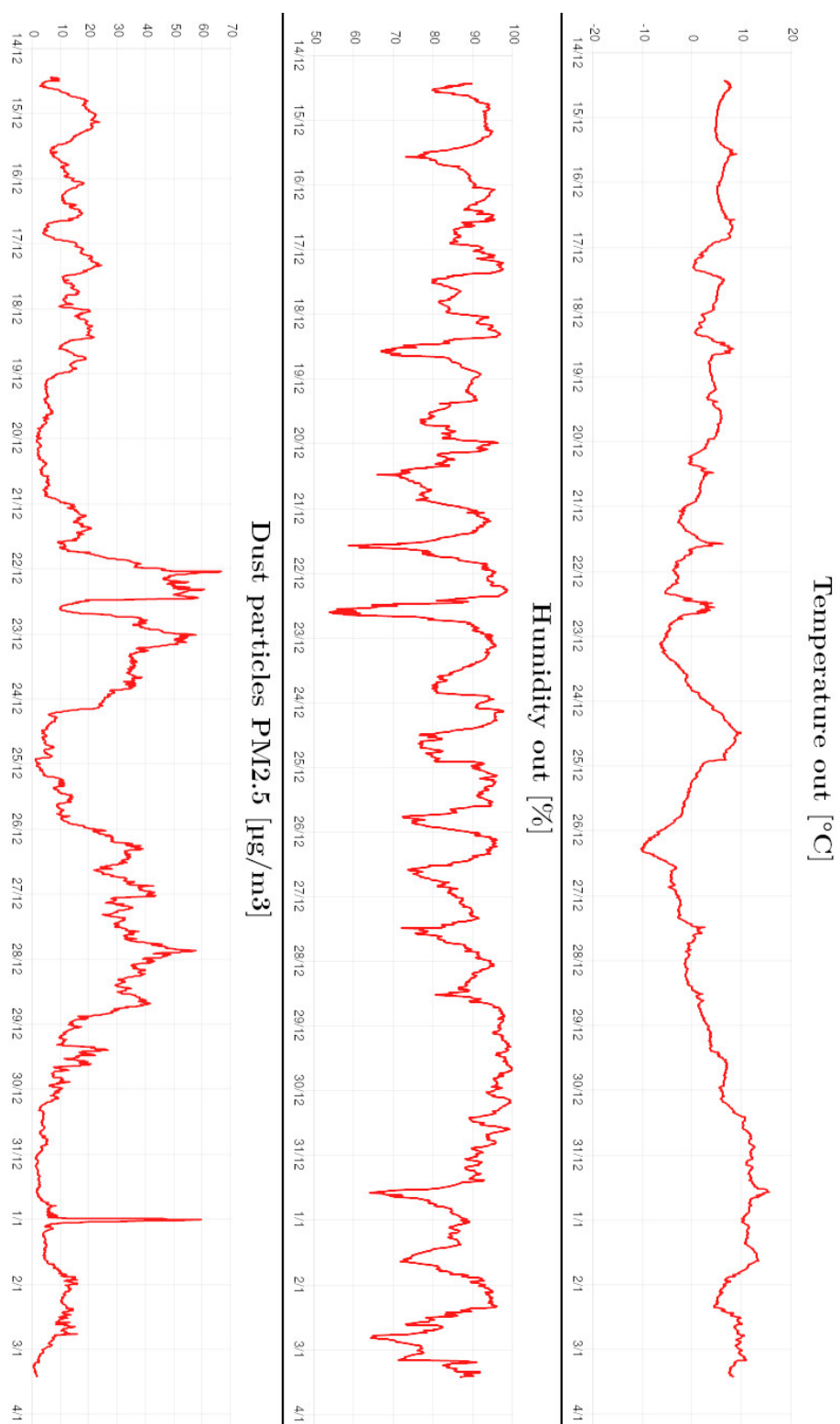
Prototypová stanica ešte meria aj koncentráciu plynu NO, UV index a hladinu hluku, ale porovnávací stanica ČHMÚ nemeria tieto hodnoty, takže zatiaľ ich nebolo možné porovnať. Napriek tomu sa podľa nameraných údajov zdá, že hodnota UV indexu sa pohybuje v rozumných medziach vzhľadom na ročné obdobie. Aj snímanie hluku funguje pri vyšších intenzitách s dlhším trvaním. Toto je možné vidieť na obrázku 6.3 nameraných dát za obdobie 31. 12. 2021 až 2. 1. 2022.

Podľa tohoto krátko predbežného porovnania je možné povedať, že v parametroch teplota, atmosférický tlak a relatívna vlhkosť sa dosahuje veľmi dobrá zhoda. Meranie koncentrácie NO₂ je pre hodnoty nad hranicou šumu senzora tiež vo veľmi dobrej zhode. Meranie koncentrácie pevných častíc (prachu) je podľa očakávania v horšej zhode. Ale na upozornenie, že sa ich koncentrácia pohybuje v blízkosti povolených hodnôt (2.1), je to postačujúce. Pre koncentrácie SO₂, O₃ vychádza zlá zhoda, ale merané hodnoty boli pod hranicou šumu použitých sensorov. Tu by bolo potrebné porovnanie v prostredí s koncentraciami v blízkosti povolených bezpečných hraníc, ktoré sú vyššie a tu by senzory mali dávať dobré výsledky merania.

Počas zberného obdobia porovnávacích dát tj. od 16. 12. 2021 do 27. 12. 2021 bolo prijatých cez rozhranie NB-IoT 1623 správ z prototypovej stanice s nameranými údajmi. Celkovo za toto obdobie malo byť teoreticky prijatých 1632 správ. Z toho vyplýva, že došlo ku strate 9 správ, čo predstavuje približne 0,5 %.

Ukážku niektorých nameraných dát za dlhšie časové obdobie je možné vidieť na obrázku 7.4.

Na základe porovnávacích meraní voči údajom zo stanice ČHMÚ je možné skonštatovať, že prototypová stanica by mala byť schopná slúžiť na upozornenie, že sa koncentrácia škodlivých plynov nachádza v blízkosti hranice povolených hodnôt uvedených v tabuľke 4.3.



Obrázok 7.4: Príklad nameraných dát za obdobie 20 dní. Zdroj: autor práce

Kapitola 8

Možnosti ďalšieho rozvoja prototypovej stanice

V tejto časti je popísaná analýza možného pripojenia prototypovej stanice k napájaniu z batérie a fotovoltaického panelu. V druhej časti tejto kapitoly sú načrtnuté oblasti ktorým by bolo vhodné venovať sa ešte podrobnejšie, ale doteraz na to neboli možnosti či už časové, alebo finančné, prípadne organizačné.

8.1 Analýza a výpočet komponentov napájania z batérie a FV panelu

Už pri návrhu konštrukcie prototypovej stanice sa pri výbere jednotlivých blokov a komponentov bral ohľad aj na ich spotrebu elektrickej energie. Bola snaha vybrať pokiaľ možno úsporné komponenty, aby sa uľahčil návrh napájania celej stanice z batérie a fotovoltaického (FV) panelu.

Súčasťou skúšania a testovania hotovej prototypovej stanice bolo aj meranie spotreby elektrickej energie. Namerané hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 8.1.

Režim práce	Maximálny odber [mA]	Minimálny odber [mA]	Priemerný odber [mA]	Priemerná spotreba [W]
Zimný	174	81,8	97,4	1,18
Letný	497	449,5	461	5,58

Tabuľka 8.1: Spotreba elektrickej energie prototypovej stanice

Údaje uvedené v tabuľke 8.1 boli merané na výstupe primárneho napájacieho zdroja kde bolo napätie 12,1 V.

Zimný režim práce znamená, že veľký ventilátor v prototypovej stanici je vypnutý a malý ventilátor v tuneli so senzormi plynov beží na 30 % maximálnych otáčok, aby bol zabezpečený prísun čerstvého vzduchu k senzoru.

Letný režim práce znamená, že oba ventilátory bežia na maximálne otáčky.

Tieto dva režimy sú extrémne prípady a medzi nimi existuje prakticky plynulý prechod reguláciou otáčok každého ventilátora.

Údaje priemerný odber a priemerná spotreba zohľadňujú zmeny odberu a čas trvania konkrétneho odberu počas celého meracieho cyklu stanice (teraz je to 10 minút). Odber je iný, keď sa iba čaká na uplynutie času pred ďalším odčítaním hodnôt a iný počas výpočtu a posielania nameraných hodnôt cez NB-IoT. Je vidieť, že hlavnou zložkou spotreby energie sú bežiace ventilátory, hlavne ten väčší, ktorý zabezpečuje vetranie skrinky aby sa neprehrievala.

Pri výbere dvoch hlavných komponentov, batérie a fotovoltaického panelu, je treba zvažovať veľké množstvo parametrov. Medzi dôležité parametre je treba zaradiť:

- inštalovaný špičkový výkon fotovoltaického panelu vo wattoch (označovaný Wp)
- kapacita batérie vo watt-hodinách (Wh)
- hranica zostávajúcej kapacity po ktorú sa môže daný typ batérie bezpečne vybiť, aby sa nepoškodila (udávaná v %)
- spotreba energie pripojeného zariadenia za 24 hodín (udávaná vo Wh)
- sklon fotovoltaického panelu k vodorovnej rovine a nasmerovanie panelu (azimut)
- množstvo a intenzita slnečného žiarenia na danom mieste v priebehu roka

Zosúladienie všetkých týchto parametrov je veľmi náročné. Existujú našťastie internetové stránky, ktoré ponúkajú špecializované „kalkulačky“, ktoré tieto výpočty uľahčujú. Jednou z nich je [116], ktorá bola požitá pre výpočty v tejto práci. Obsahuje aj databázu priemernej intenzity slnečného žiarenia pre konkrétne vybrané miesto, jednotlivé mesiace v roku a jednotlivé hodiny dňa odvodenú zo satelitných pozorovaní.

Parametrom, ktorý vypovedá o vhodnosti kombinácie batéria + panel, je pravdepodobný počet dní v roku, kedy nebude zariadenie, napájané z danej kombinácie, funkčné.

Pri teoretickom experimentovaní s nastavovaním parametrov boli použité dva typy batérii a v rámci každého typu dve kapacity a tiež dva rôzne fotovoltaické panely. Kapacity batérii boli volené tak, aby pre oba typy mali približne rovnakú využiteľnú kapacitu.

Batérie s napätím 12 V:

Označenie:	B1a	B1b	B2a	B2b
Kapacita* [Ah]	12	20	7	12
Kapacita* [Wh]	144	240	84	144
Kap.Vy.** [Wh]	72	120	67	115
Váha [kg]	4	6	0,8	1,4
Rozmer [cm]	15 x 9 x 10	18 x 8 x 17	15 x 7 x 10	15 x 10 x 10
Cena [€]	35	55	75	130

* Nominálna kapacita. ** Využitelná kapacita.

Tabuľka 8.2: Batérie použité pre výpočet

Batérie s označením B1a a B1b sú klasické olovené bezúdržbové, aké sa používajú napríklad v zálohovacích zdrojoch (UPS). Pre tento typ batérie je odporúčaná hranica využiteľnej kapacity iba 50 % z nominálnej kapacity. Orientačné hodnoty rozmerov a ceny sú zo stránky: [117].

Batérie s označením B2a a B2b sú moderné LiFePO₄. Pre tento typ batérie je odporúčaná hranica využiteľnej kapacity až 80 % z nominálnej kapacity. Orientačné hodnoty rozmerov a ceny sú zo stránky: [118].

Fotovoltaický (FV) panel pre systémy s napätím 12 V:

Označenie	Výkon [Wp]	Váha [kg]	Rozmer [cm]	Cena [€]
P60	60	4	55 x 67 x 3	65
P90	90	6	78 x 67 x 3	97

Tabuľka 8.3: FV panely použité pre výpočet

Oba fotovoltaické panely (P1, P2) sú polykryštalické s hliníkovým rámom, pre menšie FV systémy. Orientačné hodnoty rozmerov a ceny sú zo stránky: [119].

Natočenie panelu bolo priamo na juh. Sklon panelu od vodorovnej roviny 40 °, pre geografické umiestnenie panelu bola zvolená Praha.

V tabuľke 8.4 sú uvedené kombinácie FV panel + Batéria a k tomu príslušný pravdepodobný počet dní v roku, kedy bude zariadenie nefunkčné. Ako sa dá očakávať, problém s nefunkčnosťou sa týka hlavne zimných mesiacov november, december a január. V týchto mesiacoch nebude problém s chladením a teda pre výpočet bol použitý zimný režim práce z tabuľky 8.1. V letných mesiacoch, kedy bude potrebný vysoký výkon ventilátorov, je aj dostatok slnečného žiarenia po dostatočne dlhú dobu, a preto vtedy nebude problém s dobýjaním batérie.

Kombinácia	Nefunkčné dni [% z roku]	Nefunkčné dni [počet dní z roku]
P60 + B2a	3,83	14
P60 + B1a	3,22	11,8
P60 + B2b	1,44	5,3
P60 + B1b	1,28	4,7
P90 + B2a	0,94	3,4
P90 + B1a	0,80	2,9
P90 + B2b	0,07	0,26
P90 + B1b	0,05	0,18

Tabuľka 8.4: Nefunkčné dni podľa kombinácie FV panelu a batérie

Tabuľka 8.4 poskytuje orientačné porovnanie, aký vplyv majú na počet nefunkčných dní kombinácie výkonu FV panelu a kapacity batérie. Pre batérie B2x teda LiFePO₄ treba ešte poznamenať, že sa neodporúča ich nabíjanie pri teplotách pod bodom mrazu. Bolo by teda dobré používať ich v prípade, že budú uložené v nejakom chránenom priestore.

Pre prototypovú stanicu napájanú kombináciou FV panel a batéria je treba brať do úvahy, že výpadok napájania (nefunkčné dni) spôsobí, že senzory plynov sa budú po nabehnutí napájania minimálne niekoľko hodín stabilizovať. Tomu by sa dalo predísť vložением bloku zálohy napájania pre obvody senzorov. Jednalo by sa o malú batériu s napätím v rozmedzí 3,5 – 6,5 V a elektronický prepínač, ktorý by v prípade výpadku riadneho napájania prepol na záložnú batériu. Odber elektroniky jedného senzora plynov je podľa výrobcu menší ako 1,5 mA. Teda malá nabíjacia batéria s využiteľnou kapacitou 1000 mAh by vydržala napájať štyri senzory bez prerušenia týždň.

8.2 Ďalšie možnosti rozvoja prototypovej stanice

Bolo by vhodné zabezpečiť kalibráciu merania znečisťujúcich plynov v širšom rozsahu. Možné porovnanie s referenčnými prístrojmi v ČHMÚ totiž poskytne pravdepodobne porovnanie iba pre veľmi nízke koncentrácie týchto plynov, ktoré sa vyskytujú vo voľnom prostredí, kde sa meracie stanovište nachádza. Takéto nízke koncentrácie sa nachádzajú na hranici detegovateľnosti elektrochemických senzorov a sú väčšinou prekryté náhodným šumom pozadia samotných senzorov a ich elektroniky. Bolo by dobré minimálne preveriť a prekalibrovať tieto senzory pri koncentráciách podľa tabuľky 4.3, ktorá obsahuje hraničné hodnoty niektorých znečisťujúcich látok prípustné v životnom prostredí. Tieto hodnoty by mali byť dostatočne spoľahlivo elektrochemickými senzormi detegovateľné.

Tak, ako bolo popísané v časti 6.2.1, je možné ešte ďalej skúšať rôzne varianty a parametre vyhodnocovacích algoritmov na kompenzáciu vplyvu teploty na meranie nízke koncentrácií znečisťujúcich plynov. K tomu sú potrebné jednak dlhšie časové rady meraní za rôznych klimatických podmienok a tiež dostupnosť porovnávacích údajov z certifikovaných prístrojov z toho istého obdobia.

Bolo by zaujímavé vyskúšať aplikovať, na dlhšiu časovú radu certifikovaných údajov a prvotných nekorigovaných údajov zo senzorov plynu, postup použitý v práci [120]. V tejto práci autori použili metódu HDMR (high-dimensional model representation) na to aby získali z prvotných nekorigovaných údajov z elektrochemických senzorov plynu od firmy Alphasense priamo koncentráciu v jednotkách ppb.

Z hardvérových úprav by bolo asi vhodné ešte dorobiť zálohovanie napájania elektrochemických senzorov plynov. Táto úprava by pomohla udržať stabilitu nameraných údajov pri výpadku hlavného napájania.

Časť prototypovej stanice, ktorá je zodpovedná za meranie hluku, by bolo treba porovnať s meraním nejakého hlukomera. Zatiaľ sa iba pozorovaním javí, že výsledky meraní 10-minútových priemerov sú nižšie, ako by sa dalo očakávať. Je možné, že by bolo treba zmeniť algoritmus výpočtu výsledných hodnôt, alebo bude možno treba zmeniť schému zapojenia príslušnej elektroniky. Možno je problém iba v konštrukčnom riešení krytu mikrofónu, kde by mohlo dochádzať k útlmu meraného hluku, alebo je smerová charakteristika mikrofónu a jeho krytu nevhodne otočená.

Kapitola 9

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť a realizovať prototyp stanice na meranie vybraných parametrov vonkajšieho prostredia využívajúcej komunikačné rozhranie NB-IoT. Ako parametre na monitorovanie boli určené teplota, vlhkosť, intenzita UV žiarenia, hluk, množstvo prachových častíc a koncentrácie niektorých zo znečisťujúcich plynov ako sú CO, Ozón, NO, NO₂ a SO₂.

V teoretickej časti práce sa hovorí o vplyve znečisťujúcich látok na životné prostredie a predovšetkým na človeka. Identifikujú sa hlavné znečisťovatele prostredia, najmä ovzdušia a ich vplyv na zdravie obyvateľov. Sumarizujú sa hraničné odporúčané hodnoty hlavných znečisťujúcich látok. V ďalšej časti sa uvádza prehľad spôsobov merania týchto znečisťovateľov. Jednak sa hovorí o predpísaných referenčných postupoch merania a tiež o možnostiach jednoduchších a lacnejších metód, ktoré by mohli dopĺňať sieť certifikovaných meracích staníc a strážiť hlavne odporúčané maximálne povolené hodnoty.

V konštrukčnej časti práce sú vytypované vhodné súčiastky a diely z ktorých by sa dala meracia stanica skonštruovať. Vhodnosť niektorých zapojení a komponentov bola overená pri stavbe skúšobného zariadenia. Z vybraných konštrukčných dielov, elektronických súčiastok a modulov bol navrhnutý a skonštruovaný prototyp meracej stanice. Pre toto zariadenie bol navrhnutý, napísaný a odladený softvér na riadenie stanice a komunikáciu cez rozhranie NB-IoT. Nad rámec zadania bol vytvorený aj softvér na zbieranie, úpravu a ukladanie nameraných dát na externom serveri. Súčasťou tohto programu je aj prezentačná časť, ktorá umožňuje prístup k nameraným dátam a prezeranie cez webové rozhranie.

Skonštruované zariadenie bolo kompletne oživené a bola odskúšaná jeho činnosť. Nad rámec zadania bolo vďaka ochote a ústretovosti pracovníkov ČHMU dohodnuté aj umiestnenie zariadenia na ich meraciu stanicu v Prahe – Libuň. Tým vznikla možnosť vytvoriť porovnávaciu časovú radu meraných dát z certifikovaných prístrojov pre niektoré merané parametre.

Na základe týchto porovnávacích meraní je možné povedať, že v parametroch teplota, atmosférický tlak a relatívna vlhkosť sa dosahuje veľmi dobrá zhoda. Meranie koncentrácie NO₂ je pre hodnoty nad hranicou šumu senzora tiež vo veľmi dobrej zhode. Meranie koncentrácie pevných častíc (prachu) je podľa očakávania v horšej zhode. Ale na upozornenie, že sa ich

koncentrácia pohybuje v blízkosti povolených hodnôt, je to postačujúce. Je teda možné skonštatovať, že prototypová stanica by mala byť schopná slúžiť na upozornenie, že sa koncentrácia škodlivých plynov nachádza v blízkosti hranice povolených hodnôt.

Podľa zadania bola urobená aj analýza a výpočet parametrov komponentov pre variantu napájania prototypovej meracej stanice z batérie a fotovoltaického panelu.

V záverečnej časti práce sa ešte uvádzajú námety na ďalšie možnosti rozvoja zariadenia.

Všetky časti zadania diplomovej práce boli v plnom rozsahu splnené. Skonštruovaná prototypová stanica je v niekoľkotýždňovej skúšobnej a testovacej prevádzke v reálnych podmienkach. Prevádzka prebieha bez problémov a stanica posiela všetky merané údaje pravidelne na dátový server. Výsledky testovania môžu poslúžiť pre jej prípadné úpravy a zlepšovanie.

Dodatok A

Literatúra

- [1] Slovenská terminologická databáza: Životné prostredie. https://terminologickyportal.sk/wiki/Term%C3%ADn:%C5%BEivotn%C3%A9_prostredie, 2016, získané: 10. 1. 2021.
- [2] World Health Organization: Air pollution. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2, získané: 10. 1. 2021.
- [3] Wikipedia: Podnebie (klíma). [https://sk.wikipedia.org/wiki/Podnebie_\(kl%C3%ADma\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Podnebie_(kl%C3%ADma)), 2020, získané: 20. 12. 2021.
- [4] Wikipedia: Klimatické zmeny. https://sk.wikipedia.org/wiki/Klimatick%C3%A9_zmeny, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [5] parliament, E.; council: DIRECTIVE 98/69/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:EN:PDF>, 1998, získané: 30. 1. 2021.
- [6] parliament, E.; council: DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/ EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=celex:32009L0028>, 2009, získané: 30. 1. 2021.
- [7] aqicn: World Air Quality Index project. <https://aqicn.org/contact/>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [8] Európsky dvor audítorov: Znečisťovanie ovzdušia: naše zdravie stále nemá dostatočnú ochranu. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_23/SR_AIR_QUALITY_SK.pdf, 2009, získané: 30. 1. 2021.
- [9] European Environment Agency: Air quality in Europe – 2020 report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>, 2020, získané: 30. 1. 2021.

- [10] World Health Organization: Air Quality Guidelines for Europe. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf, 2020, získané: 30. 1. 2021.
- [11] World Health Organization: Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. In: Global Update 2005. Summary of Risk Assessment. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2005, získané: 20. 1. 2021.
- [12] McConnell R. a kol.: Childhood incident asthma and traffic-related air pollution at home and school. *Environmental Health Perspectives*, ročník 118, č. 7, Červenec 2021: s. 1021–1026.
- [13] Health Effects Institute: Traffic-related Air Pollution: a Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects, Special Report 17. <https://www.healtheffects.org/system/files/SR17TrafficReview.pdf>, 2010, získané: 1. 2. 2021.
- [14] Lehr E. L.: Carbon monoxide poisoning: a preventable environmental hazard. *American Journal of Public Health*, ročník 60, č. 2, 1970.
- [15] Abelsohn A., Sanborn M.D., Jessiman B.J., Weir E.: Identifying and managing adverse environmental health effects: 6. Carbon monoxide poisoning. *Canadian Medical Association Journal*, ročník 166, č. 13, Červen 2002: s. 1685–1690.
- [16] Wikipedie: Oxid siřičitý. https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD, 2021, získané: 3. 4. 2021.
- [17] SHMÚ: Znečisťujúce látky a ovzdušie. https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=oko_info_nu, získané: 4. 4. 2021.
- [18] Wikipedie: Ozón. <https://sk.wikipedia.org/wiki/Oz%C3%B3n>, 2021, získané: 4. 10. 2021.
- [19] Populair: Možné účinky na zdravie. <https://dnesdycham.populair.sk/mozne-ucinky-na-zdravie>, 2020, získané: 1. 4. 2021.
- [20] Wikipedie: Pevné častice. https://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice, 2021, získané: 1. 10. 2021.
- [21] Populair: Zdroje znečisťovania ovzdušia. <https://dnesdycham.populair.sk/zdroje-znecestovania-ovzdušia>, 2020, získané: 3. 1. 2021.
- [22] Európsky parlament: Smernica o kvalite okolitého ovzdušia a čistejšom ovzduší v Európe, 008/50/ES. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=EN>, 2008, získané: 24. 4. 2021.

- [23] Európsky dvor audítorov: Osobitná správa č. 23/2018: Znečistenie ovzdušia: naše zdravie stále nemá dostatočnú ochranu. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_23/SR_AIR_QUALITY_SK.pdf, 2018, získané: 20. 8. 2021.
- [24] Vishay Semiconductors: Designing the VEML6070 UV Light Sensor Into Application. <https://www.vishay.com/docs/84310/designingveml6070.pdf>, 2019, získané: 30. 1. 2021.
- [25] The Ozone Depletion Theory of Global Warming: The Bottom Line. <https://ozonedepletiontheory.info/bottom-line/>, 2021, získané: 10. 9. 2021.
- [26] Encyclopaedia Beliana: Dobsonova jednotka. <https://beliana.sav.sk/heslo/dobsonova-jednotka>, 2021, získané: 25. 11. 2021.
- [27] Sme: Erytém, Dermatitis solaris. <https://primar.sme.sk/c/4117156/erytem-dermatitis-solaris.html>, 2004, získané: 25. 11. 2021.
- [28] SHMÚ: Vysvetlenie javov a pojmov o UV žiarení a atmosférickom ozóne. <https://www.shmu.sk/sk/?page=2458#q17>, 2021, získané: 9. 4. 2021.
- [29] McKinlay, A.F. and Diffey, B.L. : A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Induced Erythema in Human Skin. *CIE Journal*, 1987: s. 17–22.
- [30] CIE: Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, Květen 2019.
- [31] Wikipedia: Vegetatívny nervový systém. https://sk.wikipedia.org/wiki/Vegetat%C3%ADvny_nervov%C3%BD_syst%C3%A9m, 2017, získané: 20. 12. 2021.
- [32] Wikipedia: Retikulární formace. https://cs.wikipedia.org/wiki/Retikul%C3%A1rn%C3%AD_formace, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [33] JURKOVIČOVÁ, J., ÁGHOVÁ, L.: Reakcie detí v inkubátoroch na hlukovú záťaž. *Bratisl. Lek. Listy*, ročník 91, č. 2, 1990: s. 157–158.
- [34] Babisch, W.: The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise and Health*, ročník 4, č. 16, 2002: s. 1–11. Dostupné z: <https://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2002;volume=4;issue=16;spage=1;epage=11;aulast=Babisch;t=6>
- [35] Babisch, W.: Transportation noise and cardiovascular risk. Review and synthesis of epidemiological studies. Dose-effect curve and risk estimation. *WaBoLu-Hefte*, ročník 6, č. 1, 2006: str. 113. Dostupné z: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2997.pdf>

- [36] NIEMANN, H., MASCHKE, CH.: WHO Lares Final report: Noise effects and morbidity. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0015/105144/WHO_Lares.pdf, 2004, získané: 25. 5. 2021.
- [37] JARUP, L., DUDLEY, M.L., BABISCH, W. a kol.: Hypertension and Exposure to Noise Near Airports: the HYENA Study. *Environmental Health Perspectives*, ročník 116, č. 3, 2005: s. 1473–1478. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320623268_Hypertension_and_Exposure_to_Noise_Near_Airports_the_HYENA_Study
- [38] WHO Euproe: Night Noise Guidelines for Europe. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf, 2009, získané: 20. 5. 2021.
- [39] WHO Euproe: Methodological guidance for estimating the burden of disease from environmental noise. 2012, získané: 20. 5. 2021. Dostupné z: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/177816/Methodological-guidance-for-estimating-the-burden-of-disease-from-environmental-noise.pdf
- [40] European Environment Agency: Good practice guide on noise exposure and potential health effects. <https://www.bruitparif.fr/elements%20communs/2010-10-01%20-%20Good%20practice%20guide%20on%20noise%20exposure%20and%20potential%20health%20effects%20-%20EEA.pdf>, 2010, získané: 28. 5. 2021.
- [41] Národní referenční laboratoř pro komunální hluk: ODBORNÉ DOPORUČENÍ pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. <http://hluk.nrl.cz/Content/files/Metodicke-navody/odkom-nrl2018-v1-0.pdf>, 2018, získané: 14. 5. 2021.
- [42] RÚVZ: Zoznam slovenských technických noriem v oblasti hluku. https://www.ruvzpp.sk/upload/files/STN%20hluk%202020_06.pdf, 2020, získané: 14. 5. 2021.
- [43] Ministerstvo zdravotníctva Slovenskej republiky: Vyhláška č. 549/2007 Z. z. https://www.slov-lex.sk/static/pdf/2007/549/ZZ_2007_549_20090701.pdf, 2007, získané: 24. 5. 2021.
- [44] IEC: Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications. Standard, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, Září 2013.
- [45] Wikipedia: A-weighting. <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting#C>, 2021, získané: 22. 12. 2021.
- [46] Parlament České republiky: Zákon o ochraně ovzduší, č. 201/2012 Sb. <https://www.epi.sk/zzcr/2012-201>, 2012, získané: 24. 6. 2021.

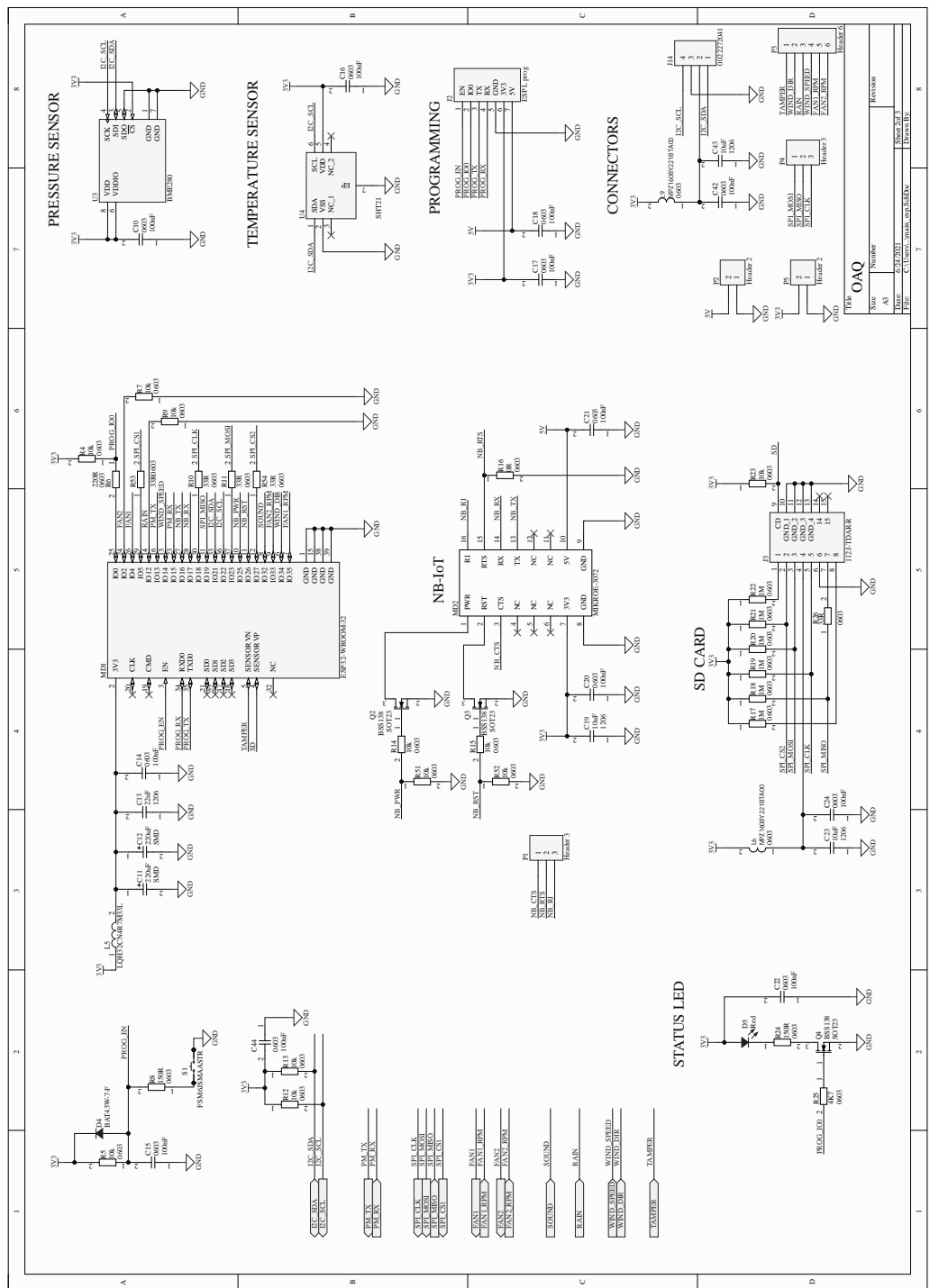
- [47] SHMU: Merané veličiny a metódy monitorovania. https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=oko_info_mv, 2021, získané: 15. 11. 2021.
- [48] SHMU: Znečisťujúce látky a ovzdušie. https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=oko_info_nu, 2021, získané: 15. 11. 2021.
- [49] Ličbinský R., Huzlík J., Hegrová J.: Monitorování kvality ovzduší v místech s vysokou dopravní zátěží. <https://www.shopcdv.cz/cs/monitorovani-kvality-ovzdusi-v-mistech-s-vysokou-dopravni-zatezi>, 2021, získané: 10. 1. 2021.
- [50] ÚNMZ: Kvalita ovzduší - Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM10 a PM2,5 . Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Září 2014.
- [51] ÚNMZ: Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení oxidu siřičitého ultrafialovou fluorescencí. Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Srpen 2013.
- [52] ÚNMZ: Venkovní ovzduší - Normovaná metoda stanovení koncentrace oxidu dusičitého a oxidu dusnatého na principu ultrafialové chemiluminiscence. Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Duben 2013.
- [53] ÚNMZ: Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení ozonu ultrafialovou spektrometrií. Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Březen 2013.
- [54] ÚNMZ: Kvalita ovzduší - Normovaná metoda stanovení oxidu uhelnatého nedisperzní infračervenou spektrometrií. Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Březen 2013.
- [55] Karel Štulík, František Opekar, a kol.: *SENZORY. VŠCHT*, 2007, ISBN 978-80-86238-20-3, 190–206 s. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/paci/PAC/prezentace/senzory.pdf>
- [56] Guz, Lukasz: Technical aspects of SAW gas sensors application in environmental measurements. *MATEC Web Conf.*, ročník 252, 2019: s. 190–206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925206007>
- [57] Richard Pogge: Lecture 29: The Earth's Atmosphere. <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit5/atmos.html>, 2008, získané: 27. 12. 2021.
- [58] Wikipedia: Lambertov-Beerov zákon. https://sk.wikipedia.org/wiki/Lambertov-Beerov_z%C3%A1kon, 2020, získané: 27. 12. 2021.

- [72] Sensirion: SP30 Datasheet. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6_Particulate_Matter/Datasheets/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf, 2020, získané: 23. 1. 2020.
- [73] Espressif Systems: ESP32-WROOM-32 Datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf, 2021, získané: 30. 11. 2021.
- [74] Bosch: BMP280 Digital Pressure Sensor Datasheet. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp280-ds001.pdf>, 2021, získané: 30. 11. 2021.
- [75] Vishay Semiconductors: VEML6070 Datasheet. <https://www.vishay.com/docs/84310/designingveml6070.pdf>, 2019, získané: 30. 11. 2020.
- [76] aliexpress: GY-VEML6070. <https://www.aliexpress.com/i/328344448418.html>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [77] Linear Technology: LT1634 Datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/24048fa.pdf>, získané: 30. 11. 2020.
- [78] Linear Technology: LTC2404/LTC2408 Datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1634ff.pdf>, získané: 30. 11. 2020.
- [79] Mean Well: 15W Single Output Switching Power Supply. <http://www.meanwell.co/assets/data/RS-15-spec.pdf>, 2007, získané: 30. 11. 2021.
- [80] CUI: VXO78-1000 series Datasheet. <https://www.cui.com/product/resource/vxo78-1000.pdf>, 2021, získané: 30. 11. 2021.
- [81] hanwei: Hanwei Electronics Group Corporation. <https://www.hwsensor.com/>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [82] MySensors: Datasheets. https://www.mysensors.org/build/gas#google_vignette, získané: 10. 3. 2021.
- [83] sparkfun: Carbon Monoxide Sensor - MQ-7. <https://www.sparkfun.com/products/9403>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [84] Winsen: Electrochemical CO Module ZE03-CO. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Gas%20Sensor%20Module/CO%20Detection%20Module/ZE03%20Electrochemical%20Module%20V2.4.pdf>, 2016, získané: 10. 3. 2021.
- [85] SPEC Sensor: SPEC Sensor Operation Overview. <http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/05/SPEC-Sensor-Operation-Overview.pdf>, 2016, získané: 7. 2. 2021.

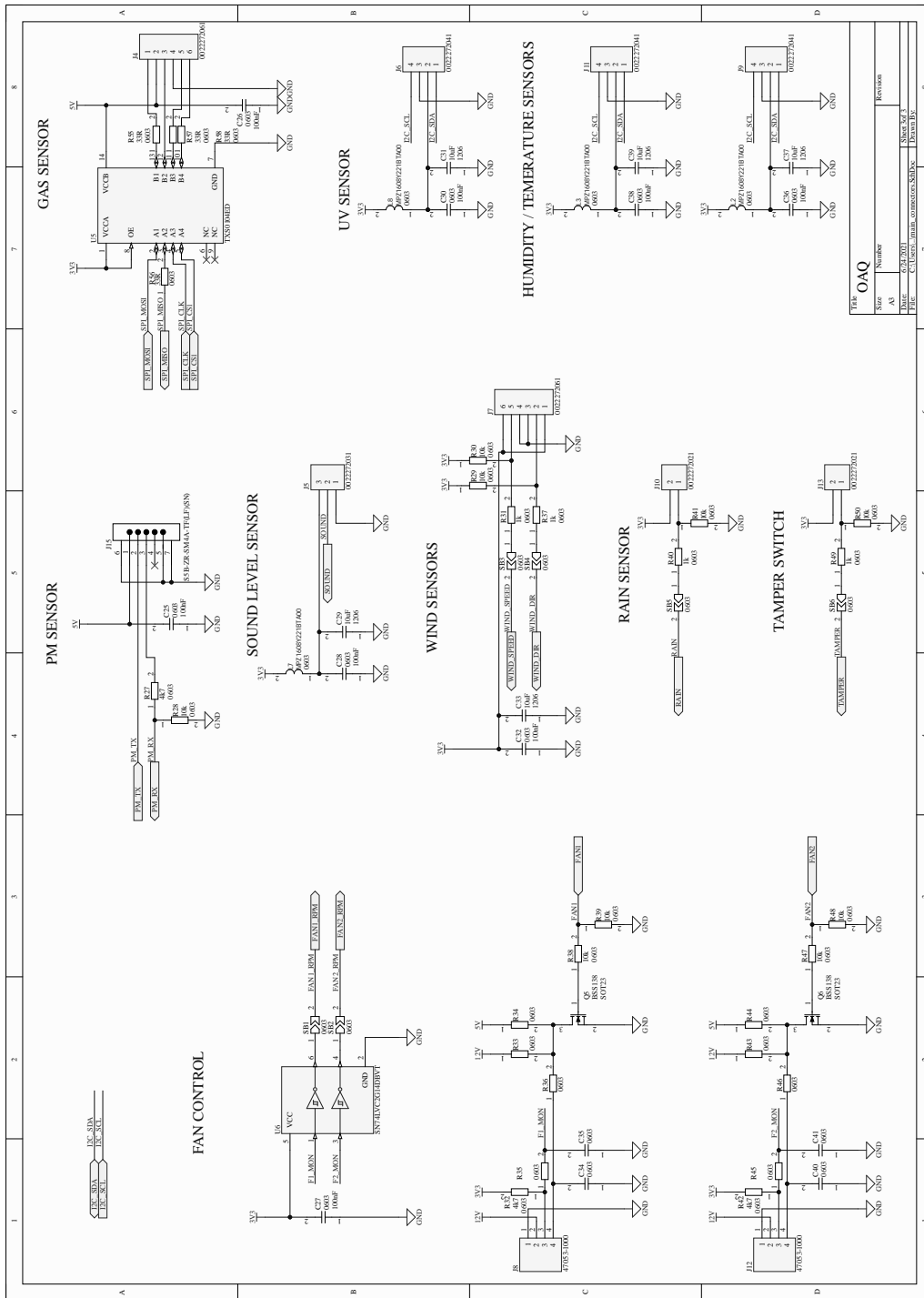
- [86] SPEC Sensor: Ultra-Low Power Analog Sensor Module for Nitrogen Dioxide. https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/10/ULPSM-N02-968-047_8-25-17.pdf, 2017, získané: 8. 2. 2021.
- [87] SPEC Sensor: Digital Gas Sensor Developer Kit 968-045. https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DG-SDK-968-045_9-6-17.pdf, 2017, získané: 8. 2. 2021.
- [88] Air Quality Sensor Performance Evaluation Center: Field Evaluation Spec Gaseous Sensors. <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/spec-sensors---field-evaluation249fa8efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=2>, 2016, získané: 2. 4. 2021.
- [89] vaquums: Alphasense O3-B431. <https://vaquums.eu/sensor-db/sensors/alphasense-o3-b431>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [90] Alphasense: NO2-A43F Nitrogen Dioxide Sensor, Technical Specification. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-A43F.pdf>, 2019, získané: 10. 1. 2021.
- [91] Alphasense: NO-B4 Nitric Oxide Sensor, Technical Specification. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO-B4.pdf>, 2019, získané: 10. 1. 2021.
- [92] Alphasense: SO2-B4 Sulfur Dioxide Sensor, Technical Specification. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/SO2-B4.pdf>, 2017, získané: 10. 1. 2021.
- [93] Alphasense: OX-B431 Oxidising Gas Sensor Ozone + Nitrogen Dioxide, Technical Specification. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-B431.pdf>, 2019, získané: 10. 1. 2021.
- [94] Alphasense: Individual Sensor Board (ISB) Alphasense B4 4-Electrode Gas sensors, Technical Specification. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/10/ISB.pdf>, 2019, získané: 10. 1. 2021.
- [95] 3GPP: About 3GPP. <https://www.3gpp.org/about-3gpp>, získané: 10. 9. 2021.
- [96] Wikipedia: GSM. <https://cs.wikipedia.org/wiki/GSM>, získané: 10. 9. 2021.
- [97] Wikipedia: Narrowband IoT. https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [98] ubidots: NB-IoT vs LTE-M: Here's What The Cellular IoT Buzz Is. <https://ubidots.com/blog/nb-iot-vs-lte-m/>, získané: 25. 11. 2020.

- [99] Haltian: NB1 vs. NB2 complete comparision table and overview. <https://haltian.com/resource/nb1-vs-nb2-complete-comparison-table-and-overview/>, získané: 25. 11. 2020.
- [100] ShareTechnode: LTE Quick Reference, NB-IoT. http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_NB_LTE.html, získané: 25. 11. 2020.
- [101] LoRa Aliance: LoRa Aliance. <https://loro-alliance.org/>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [102] sigfox slovakia: sigfox slovakia. <https://sigfoxslovakia.com/>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [103] sigfox: sigfox Česká republika. <https://sigfox.cz/cs>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [104] sigfox: SIGFOX. <https://www.sigfox.com/en>, 2021, získané: 20. 12. 2021.
- [105] ublox: SARA-R4 series, Multi-band LTE-M / NB-IoT / EGPRS modules. https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R4_DataSheet_UBX-16024152.pdf, 2021, získané: 27. 11. 2021.
- [106] MikroElektronika: LTE IoT click, Product info. <https://www.mikroe.com/lte-iot-click>, získané: 28. 2. 2021.
- [107] MikroElektronika: LTE IoT click schematic v 103. <https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/lte-iot/lte-iot-click-schematic-v103.pdf>, 2018, získané: 1. 12. 2020.
- [108] Altium: Altium designer. <https://www.altium.com/altium-designer/>, získané: 10. 8. 2021.
- [109] Onshape: Onshape software web site. <https://www.onshape.com/en/>, 2021, získané: 10. 12. 2021.
- [110] Ultimaker: Ultimaker Cura software. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>, 2021, získané: 10. 12. 2021.
- [111] Alphasense: Alphasense Application Note AAN 803-05. Correcting for background currents in four electrode toxic gas sensors. 2019, získané: 10. 1. 2021.
- [112] Mead, M.; Popoola, O.; Stewart, G.; aj.: The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, ročník 70, 2013: s. 186–203, ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012011284>

- [113] Popoola, O. A.; Stewart, G. B.; Mead, M. I.; aj.: Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability. *Atmospheric Environment*, ročník 147, 2016: s. 330–343, ISSN 1352-2310, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016308317>
- [114] ČHMÚ: Průběh některých meteorologických veličin za posledních 96 hodin. <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/praha-libus>, 2021, získané: 29. 12. 2021.
- [115] ČHMÚ: Aktuální naměřené koncentrace znečišťujících látek. https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/aqindex_slide1/mp_ALIBA_CZ.html, 2021, získané: 29. 12. 2021.
- [116] European Commission, EU Science Hub: PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, 2019, získané: 27. 11. 2021.
- [117] battery direct: 12V Sealed lead-acid batteries (AGM), maintenance-free, leak proof. <https://www.battery-direct.com/SLA-Battery/Battery-12V.html>, 2021, získané: 27. 11. 2021.
- [118] Jaycar Electronics: Li-Ion + LiPO Rechargeable Batteries. <https://www.jaycar.com.au/power-batteries/rechargeable-batteries/li-ion-li-po/c/OAB?sort=popularity-desc&q>, 2021, získané: 27. 11. 2021.
- [119] SVP Solar: Polykrystalické fotovoltaické panely. <https://www.solar-eshop.sk/c/fotovoltaika-1/fotovoltaicke-moduly/polykrystalicke/>, 2021, získané: 27. 11. 2021.
- [120] Cross, E. S.; Williams, L. R.; Lewis, D. K.; aj.: Use of electrochemical sensors for measurement of air pollution: correcting interference response and validating measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, ročník 10, č. 9, 2017: s. 3575–3588, doi:10.5194/amt-10-3575-2017. Dostupné z: <https://amt.copernicus.org/articles/10/3575/2017/>

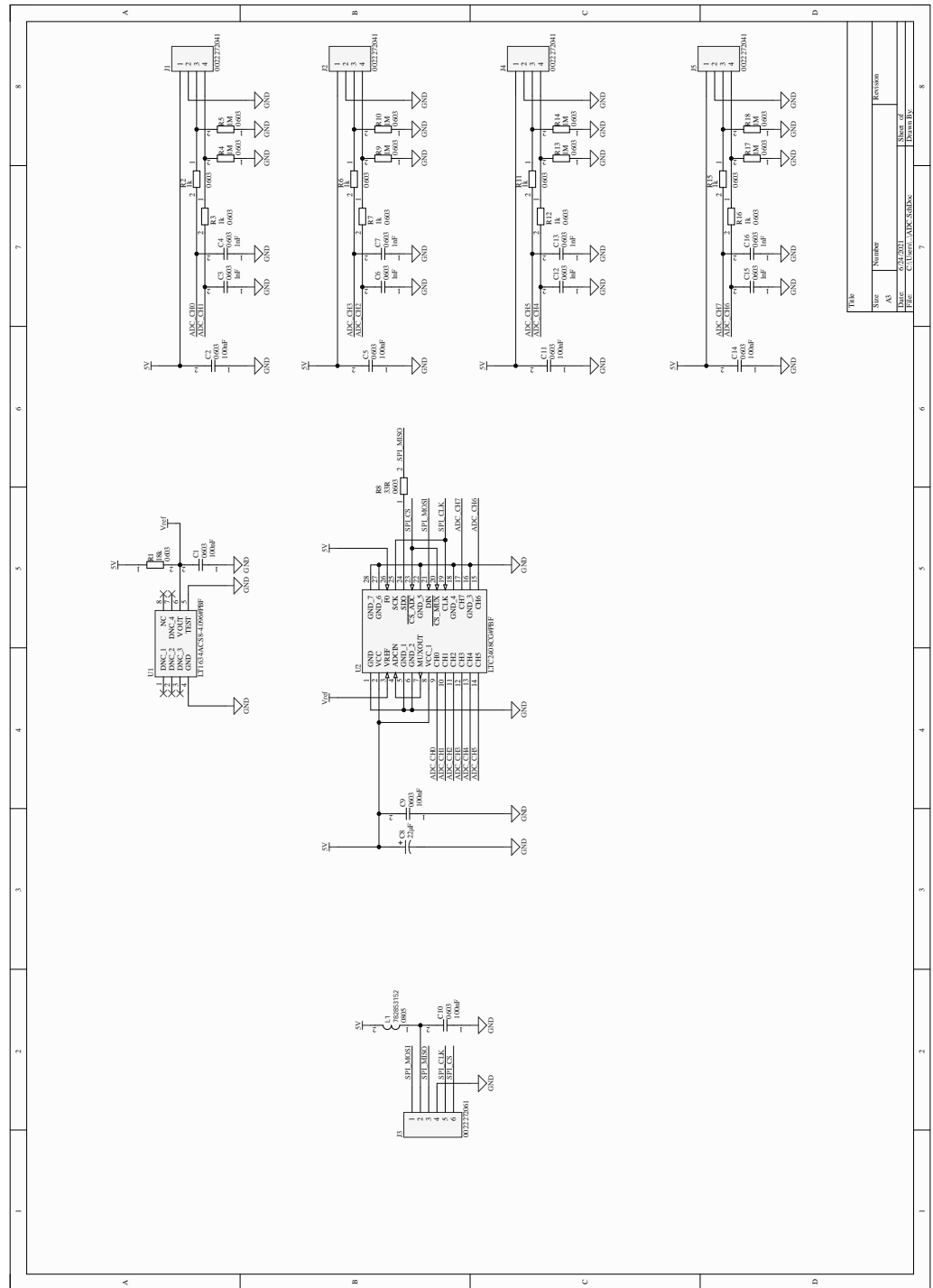


Obrázok B.2: Hlavná doska elektronickej 2. časť.



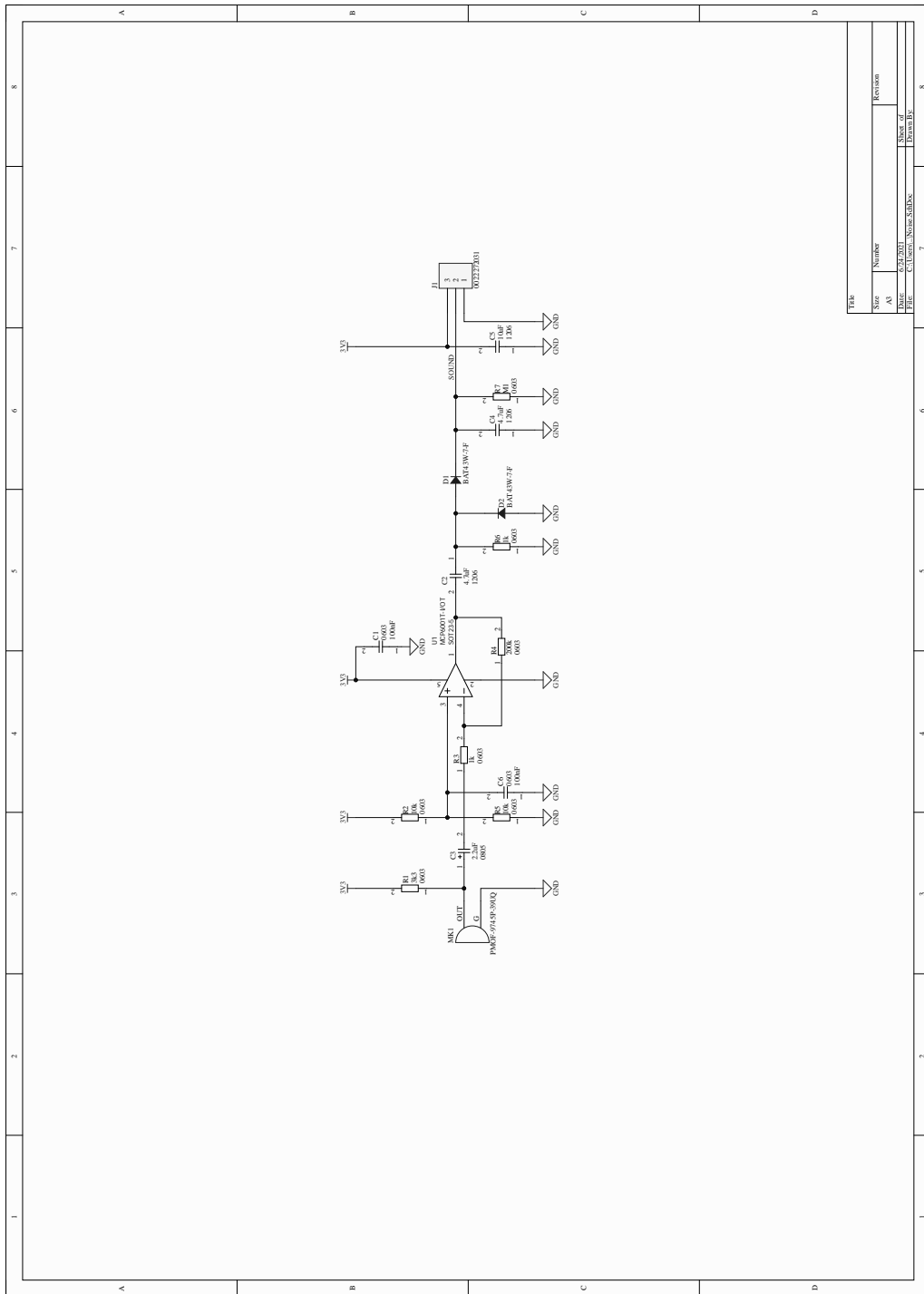
Obrázok B.3: Hlavná doska elektroniky 3. časť.

B. Kompletná schéma prototypu stanice



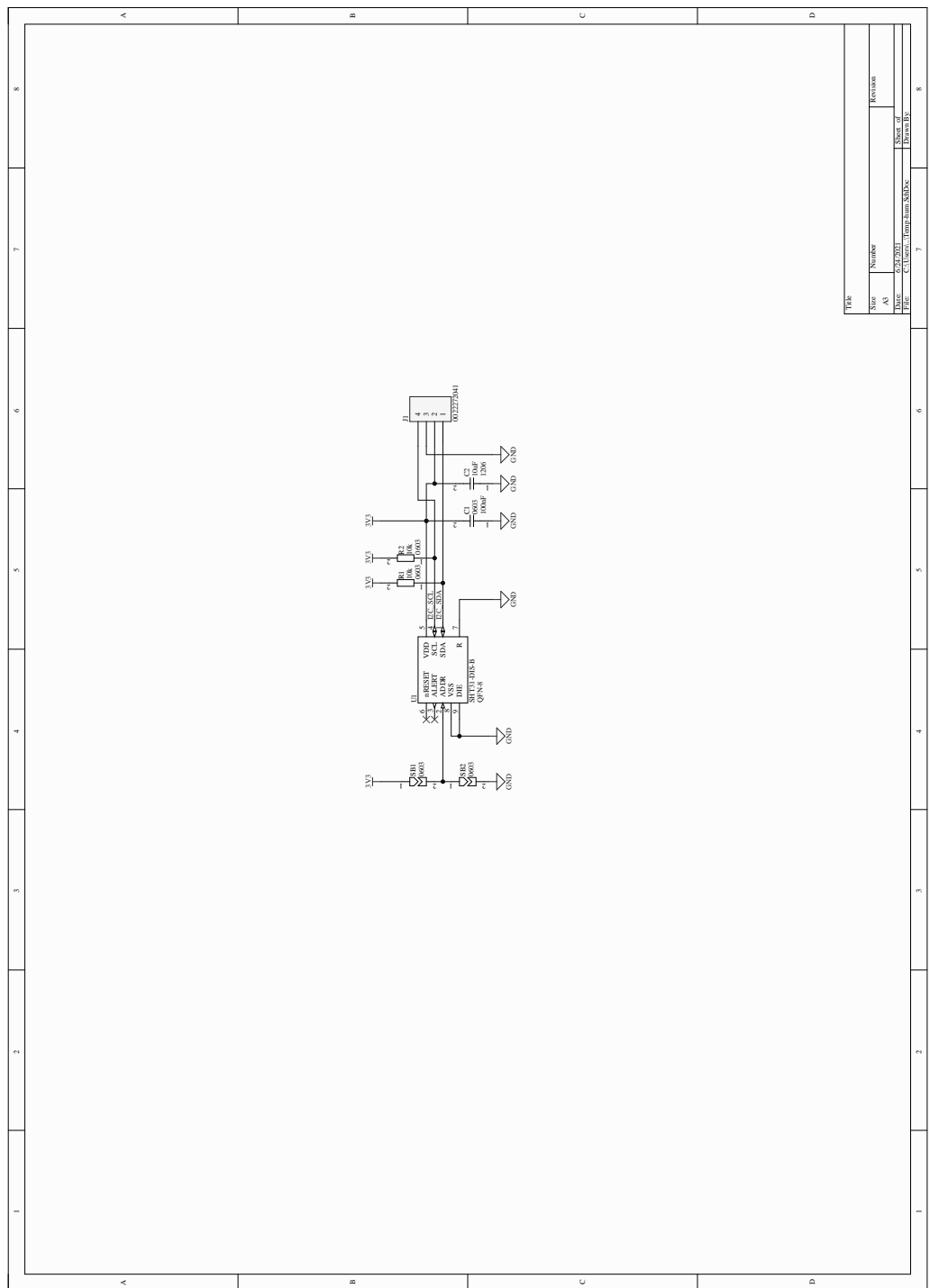
Obrázok B.4: AD prevodník.

B. Kompletná schéma prototypu stanice



Obrázok B.5: Snímač hluku.

B. Kompletná schéma prototypu stanice



Obrázok B.6: Snímač teploty a vlhkosti.

Dodatok C

Štruktúra dátovej správy JSON

"d": "OAQ",	Názov zariadenia
"i": "0001",	ID zariadenia
"f": "1.0",	Verzia firmware
"u": 1049400,	Uptime zariadenia
"r": 75,	Číslo behu programu
"m": 219,	Minimálna veľkosť haldy (heap) počas behu programu
"data": {	Senzorové dáta
"t": {	Dáta o teplote
"o": 3.88,	Priemerná teplota v radiačnom štíte
"t": 3.91,	Priemerná teplota v meracom tunely
"b": 6.75	Priemerná teplota na hlavnej riadiacej doske
},	
"h": {	Dáta o vlhkosti
"o": 84.23,	Priemerná vlhkosť v radiačnom štíte
"t": 84.08,	Priemerná vlhkosť v meracom tunely
"b": 68.83	Priemerná vlhkosť na hlavnej riadiacej doske
},	
"p": {	Dáta o atmosférickom tlaku
"p": 998.3	Priemerný atmosférický tlak
},	
"d": {	Dáta o koncentrácií prachových častíc
"p25": 14.72,	Priemerná koncentrácia prachových častíc PM2,5
"p10": 14.88	Priemerná koncentrácia prachových častíc PM10
},	
"f": {	Nastavenia ventilátorov
"s": 154,	Nastavená rýchlosť malého ventilátora (0-255)
"b": 18	Nastavená rýchlosť veľkého ventilátora (0-255)
},	

Obrázok C.1: Štruktúra dátovej správy JSON posielanej cez NB-IoT (1. časť).

"gas":{	Dáta z plynových senzorov
"s1":{	Dáta o senzore plynov na prvej pozícií
"n":"SO2",	Názov senzora na prvej pozícií
"c":-99.44,	Vypočítavá priemerná koncentrácia plynu
"m":-109.35,	Minimálna koncentrácia plynu
"we":331.69,	Nespracované priemerné napätie na WE elektróde
"ae":343.9	Nespracované priemerné napätie na AE elektróde
},	
"s2":{	Dáta o senzore plynov na druhej pozícií
"n":"NO2",	Názov senzora na druhej pozícií
"c":-3.8,	Vypočítavá priemerná koncentrácia plynu
"m":-179.9,	Minimálna koncentrácia plynu
"we":232.67,	Nespracované priemerné napätie na WE elektróde
"ae":239.92	Nespracované priemerné napätie na AE elektróde
},	
"s3":{	Dáta o senzore plynov na tretej pozícií
"n":"OX",	Názov senzora na tretej pozícií
"c":133.53,	Vypočítavá priemerná koncentrácia plynu
"m":125.6,	Minimálna koncentrácia plynu
"we":316.9,	Nespracované priemerné napätie na WE elektróde
"ae":294.26	Nespracované priemerné napätie na AE elektróde
},	
"s4":{	Dáta o senzore plynov na štvrtej pozícií
"n":"NO",	Názov senzora na štvrtej pozícií
"c":-15.92,	Vypočítavá priemerná koncentrácia plynu
"m":-22.9,	Minimálna koncentrácia plynu
"we":299.86,	Nespracované priemerné napätie na WE elektróde
"ae":294.26	Nespracované priemerné napätie na AE elektróde
}	
},	
"uvi":0,	Priemerný UV index
"n":318,	Priemerná hodnota hluku
"mn":373	Maximálna hodnota hluku
}	

Obrázok C.2: Štruktúra dátovej správy JSON posielanej cez NB-IoT (2. časť).



Dodatok D

Zoznam externých príloh

3D_modely/.....	3D modely tlačných dielov
Program_servera/.....	program servera v prostredí Node-RED
Program_stanice/.....	program riadiacej jednotky OAQ stanice
Schemy_a_plosne_spoje/..	kompletné schémy a plošné spoje z Altia