

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mrňa** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **393172**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Radiová a optická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátová platforma pro monitoring kvality vnitřního vzduchu

Název diplomové práce anglicky:

Wireless Indoor Air Quality Sensor Platform

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte sensor pro měření kvality vnitřního vzduchu umožňující komplexní měření parametrů zahrnující T, RH, VOC, CO₂, BAR, PM_{2.5}, PM₁₀. Sensor navrhněte s využitím platformy ESP32 s integrovaným rozhraním WiFi. Návrh HW proveďte tak, aby bylo možné využít i bezdrátová rozhraní LoRaWAN a IQRF pomocí pájitelných modulů. Ověřte funkčnost zařízení v interiéru budov s použitím WiFi a LoRaWAN. Pro komunikaci pomocí LoRaWAN využijte síť TheThingsNetwork. Pro sensor navrhněte firmware umožňující out-of-the-box instalaci uživatelem (režim AP a Station), obsahující webserver zobrazující aktuální měřené veličiny a umožňující nastavení základních parametrů pomocí administrátorského rozhraní.

Seznam doporučené literatury:

1. Zmrhal V, Metodický pokyn pro návrh větrání škol, MŽP, SFŽP, 2015
2. N. Sornin, LoRaWAN specification_1R0, 2016

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:

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D., katedra měření FEL

Datum zadání diplomové práce: **01.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Včelák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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.

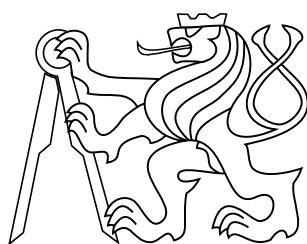
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

diplomová práce

Bezdrátová platforma pro monitoring kvality vnitřního vzduchu

Bc. Jan Mrňa



2018

Ing. Jan Včelák, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole

Poděkování

Chtěl bych zde poděkovat mnoha lidem, kteří svým úsilím a trpělivostí přispěli ke vzniku diplomové práce, a to jak dobrou radou, korekcí a opravou, tak duchovní či materiální podporou. Mezi ně v první řadě patří vedoucí práce, Ing. Jan Včelák, PhD., a Mgr. Ing. Alice Olbrichová, jež provedla korekci několika kapitol a strávila tím nejednu hodinu.

Dále bych rád poděkoval svým kolegům, kteří přispěli k rozvoji výsledného zařízení. Jsou to Ing. Aleš Vodička, Ing. Marek Maška a Rudolf Gavlas. Dobrou radou také pomohli další kolegové z laboratoře Monitoringu a řízení inteligentních budov Univerzitního centra energeticky efektivních budov.

Nakonec bych rád poděkoval také svým přátelům a rodině, kteří mne vždy podporovali.

Prohlášení

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem embedded platformy pro měření kvality vnitřního ovzduší (teplota, tlak, relativní vlhkost, koncentrace oxidu uhličitého, koncentrace těkavých organických látek). Součástí je jak hardwarový návrh, tak i návrh software s funkcionalitou na měření, zasílání dat na vzdálený server (WiFi/Internet a LoRa) a webové rozhraní pro výpis hodnot a základní nastavení. V rámci této práce byla provedena série měření proti kalibrovanému laboratornímu čidlu a první reálné nasazení senzorů v praxi.

Klíčová slova

kvalita vnitřního ovzduší; měření; VOC; CO₂; MaR; HVAC

Abstrakt

This paper deals with design of embedded platform for measuring indoor air quality (temperature, pressure, relative humidity, carbon dioxide concentration, volatile organic compounds concentration). Both hardware and software design is presented. Device is capable of measurement, data transmission to remote server (WiFi/Internet and LoRa network) and has web interface for visualizing results and basic configuration. Sensoric platform is compared with calibrated lab sensor and first real-world deployment is realized.

Keywords

Indoor air quality; measurement; VOC; CO₂; HVAC

Obsah

1	Problematika monitoringu vnitřního prostředí	1
1.1	Úvod	1
1.2	Měřené veličiny	1
1.2.1	Optimální hodnoty parametrů vnitřního vzduchu	2
	Teplota a relativní vlhkost	2
	Koncentrace oxidu uhličitého	2
	Koncentrace VOC	2
	Koncentrace polévatvého prachu (particulate matter)	3
	Tlak vzduchu	3
1.2.2	Regulace parametrů vnitřního ovzduší	3
1.3	Původní verze senzoru	4
2	Podobné senzory dostupné na trhu	9
2.1	Elgato Eve Room	9
2.2	AXIS360-C02 LORA SENSOR	9
2.3	Protronix NEW LINE II	10
3	Výběr komponent	11
3.1	Senzory	11
3.1.1	Teplota a relativní vlhkost	11
	Výběr senzoru	11
	Požadavky a omezení	11
	Konstrukce PCB	13
3.1.2	Metody měření koncentrace plynu	14
	Senzory Metal-Oxide Semiconductor	14
	Non-Dispersive Infrared senzory (NDIR)	16
	Elektrochemické senzory	16
	Pelistory	18
	Fotoionizační detektory	18
	Shrnutí	18
3.1.3	Oxid uhličitý	18
	Výběr senzoru	20
	Požadavky a omezení	20
3.1.4	Těkavé organické látky	20
	Základní parametry senzoru Sensirion SGP30 [23]	20
	Základní parametry senzoru Bosch Sensortec BME680 [24]	21
	Výběr senzoru	21
	Požadavky a omezení	22
3.1.5	Tlak	22
3.1.6	Senzor prachových částic	22
	Výběr senzoru	22
	Požadavky a omezení	24
3.2	Mikrokontrolér (MCU)	24
	Výběr modulu	24
	Požadavky a omezení	24

3.3	RF moduly	25
3.3.1	LoRa modul	25
	Fyzická vrstva LoRa protokolu	25
	LoRaWAN	27
	Infrastruktura LoRaWAN a přenos dat	27
	Legislativa a podmínky provozu na volném pásmu	29
	Výběr modulu	30
	Základní parametry LoRa modulu Microchip RN2483 [44]	31
	Požadavky a omezení	31
3.3.2	IQRF modul	31
	Fyzická vrstva IQRF protokolu	31
	Vyšší vrstvy IQRF protokolu	31
	Výběr modulu	32
	Základní parametry modulu IQRF Tech TR-76D [47]	32
	Požadavky a omezení	32
3.4	Další komponenty	33
3.4.1	Analogový výstup	33
3.4.2	Komunikační rozhraní ModBus / RS-485	33
3.4.3	Komunikační rozhraní CIB	33
3.4.4	Polovodičové relé (SSR - Solid State Relay)	34
3.4.5	LED výstup pro indikaci stavu ovzduší i diagnostiku zařízení	34
3.4.6	Příprava na připojení rezistivního dotykového displeje	34
3.5	Požadavky komponent	35
3.5.1	Komunikace s MCU	35
3.5.2	Napájení	35
3.5.3	Mechanické omezení	35
4	Návrh schéma	36
4.1	Blokové schéma	36
4.2	Napájení	36
4.2.1	Definice problému	36
4.2.2	Typy step-down regulátorů	37
	Lineární regulátor	37
	Spínaný zdroj	38
4.2.3	Návrh regulátoru	38
	Konfigurace	38
	Rozbor schématu	39
4.3	Senzory	40
4.3.1	Převodník úrovní I2C sběrnice	41
4.3.2	Prachový senzor (UART)	41
4.4	Analogové výstupy	42
4.4.1	Výstup 0-10 V / 4 - 20 mA	42
	Zesilovač	42
	Zpětná vazba	43
	Maximální a minimální zatížení	43
	RC článek	43
4.4.2	SSR (polovodičové relé)	44
4.5	Lokální výstupy pro uživatele	45
4.5.1	LED	46
4.5.2	Dotyková obrazovka	47

4.6	Metalické sběrnice	47
4.6.1	CIB	48
4.6.2	ModBus / RS-485	48
4.7	RF modul	48
4.7.1	LoRa modul	48
4.7.2	IQRF modul	50
4.7.3	Vlnová délka na vedení a charakteristická impedance	50
4.8	Mikrokontrolér	50
4.8.1	Programátor	51
4.9	Celkové schéma	52
5	Návrh plošného spoje	53
5.1	Minimální tepelné ovlivňování senzoru teploty	53
5.2	Vhodné umístění antén	53
5.2.1	2,54 GHz anténa modulu ESP-WROOM-32	53
5.2.2	868 MHz externí anténa pro LoRa modul	53
5.3	Proudění vzduchu kolem senzorů	54
5.4	EMC	54
5.4.1	Proudové smyčky	54
5.4.2	Blokovací kondenzátory	54
5.4.3	Topologie napájení	54
5.5	Výsledné PCB	55
6	Návrh krabičky	59
7	Firmware senzoru	63
7.1	Toolchain a nástroje	63
7.1.1	Framework	63
7.1.2	Kompilátor	63
7.1.3	Další nástroje použité pro vývoj	63
7.2	Použité knihovny	64
7.2.1	Knihovny použité v ESP-IDF	64
7.2.2	Knihovny použité ve firmware	64
7.3	Programování mikrokontroléru ESP32	64
7.4	Struktura firmware	64
7.5	Webové rozhraní	65
7.5.1	Uživatelské rozhraní	65
7.5.2	Administrátorské rozhraní	65
8	Ověření funkčnosti senzoru	68
8.1	Srovnání s referenčním senzorem	68
8.1.1	Referenční senzor Graywolf	68
8.1.2	Metodika měření	68
8.1.3	Naměřená data	69
	Teplota	69
	Relativní vlhkost	69
	Koncentrace oxidu uhličitého	69
	Atmosférický tlak	69
	Těkavé organické látky	72
	Prachové částice	72

8.2	Praktické nasazení	72
8.3	Doporučení pro další vývoj	73
9	Závěr	75
	Přílohy	
A	Kompletní schéma sensorové platformy	76
	Literatura	78

Zkratky

ADC	Analog to Digital Converter, AD převodník
AGC	Automatic Gain Control, automatické řízení zisku
DAC	Digital to Analog Converter, DA převodník
DSP	Digital Signal Processing, digitální zpracování signálu
DSSS	Direct-sequence spread spectrum, širokospektrální modulační technika
EMF	Electro-motoric Force, výstupní napětí elektrochemického senzoru
ESR	Equivalent Series Resistor, ekvivalentní sériový rezistor
FHSS	Frequency-hopping spread spectrum, širokospektrální modulační technika
FSK	Frequency Shift Keying, digitální frekvenční modulace
FW	Firmware
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying, filtrovaná digitální frekvenční modulace
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning, vytápění, ventilace a klimatizace
HW	Hardware
I2C	Inter-Integrated Circuit, komunikační sběrnice
IAQ	Indoor Air Quality, kvalita vnitřního ovzduší
IC	Integrated Circuit, integrovaný obvod
JSON	JavaScript Object Notation (formát dat)
LBT	Listen Before Talk, technika odposlechu kanálu před vysíláním
LED	Light Emitting Diode, světlo emitující dioda
LNA	Low-Noise Amplifier, nízkošumový zesilovač
LoRa	Long-Range, obchodní značka rádiové sítě
MOS	Metal-Oxide Semiconductor, senzor na bázi polovodič - oxid kovu
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, typ unipolárního tranzistoru
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (protokol pro úspornou telemetrii)
NDIR	Non-Dispersive Infra Red, nedisperzní infračervený (senzor)
NPK	Nejvyšší přípustná koncentrace
NTP	Network Time Protocol (TCP/IP protokol pro synchronizaci času)
p	Pressure, tlak
PCB	Printed Circuit Board, deska plošných spojů
PEL	Přípustný expoziční limit
PID	Photoionization Detector, fotoionizační detektor
PIFA	Planar Inverted F Antenna, planární invertovaná F anténa
PM	Particulate Matter, prachové částice
PM10	Particle Matter 10 microns, prachové částice 10 mikronů
PM2.5	Particle Matter 2.5 microns, prachové částice 2,5 mikronu
RH	Relative humidity, relativní vlhkost
RX	Receive / Receiver, příjem / přijímač
SAR	Succesive Approximation Register, AD převodník s postupnou aproximací
SMD	Surface-mounted device, zařízení osazované na povrch
SMPS	Switch-Mode Power Supply, spínaný zdroj
SS	Spread spectrum, rozprostřené spektrum (třída širokospektrálních modulačních technik)

SW	Software
T	Temperature, teplota
TVOC	Total Volatile Organic Compounds, úhrnné množství všech VOC
TVS	Transient Voltage Suppressor, zařízení potlačující přechodové přepětí
TX	Transmit / Transmitter, vysílání / vysílač
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, komunikační rozhraní
VOC	Volatile Organic Compounds, těkavé organické látky

1 Problematika monitoringu vnitřního prostředí

1.1 Úvod

Lidé 21. století tráví v budovách až 90 procent svého času [1]. Nevhodné životní prostředí v budově pak může být příčinou množství chorob nebo mít negativní vliv na koncentraci a pracovní výkonnost obyvatel. Parametrů, které mají vliv na kvalitu prostředí, je celá řada, mimo jiné např. akustické, světelné, kvalita vnitřního ovzduší nebo i třeba samotná dispozice budovy.

Kvalita vnitřního ovzduší je jednou z kritických, přitom poměrně snadno měřitelných i regulovatelných veličin. Zahrnuje množství parametrů, mezi něž patří zejména teplota, vlhkost, koncentrace jednotlivých plynů či jejich skupin a koncentrace polévatého prachu. Pro maximální komfort člověka je potřeba tyto parametry držet v přijatelných mezích.

Kvalita vnitřního ovzduší často není brána v potaz při rekonstrukci budov. Nové opláštění budovy, včetně výměny oken, sice zlepší tepelně izolační vlastnosti a tím i sníží náklady na vytápění, zároveň však omezí i přirozenou výměnu vzduchu. V rekonstruované budově pak paradoxně dojde ke zhoršení stavu kvality ovzduší. To pak vede k tzv. syndromu nezdravých budov [2].

Mimořádnou důležitost má kvalita ovzduší interiérech nových budov, kde lidé pracují ve velkoplošných kancelářích (openspace), ve kterých mnohdy není možné větrat okny. Klimatizované sály vyžadují monitoring parametrů ovzduší a jeho regulaci.

1.2 Měření veličiny

Jednou z prvořadých věcí, které je potřeba měřit (a která je často v domácnostech měřena) je *teplota*. K dispozici je celá řada levných a poměrně přesných čidel. Často bývají kombinovány v jednom pouzdru se senzorem *vlhkosti*; to je další důležitý parametr vnitřního ovzduší.

Lidé produkují velké množství *oxidu uhličitého*, proto je potřeba jej také měřit - jeho nadbytek se projevuje jako “vydýchaný” vzduch. V uzavřené nebo málo větrané místnosti s větším počtem osob jeho koncentrace stoupá velmi rychle (typický případ školních místností). Oxid uhličitý je také produktem spalování (společně s dalšími plyny, mezi nimiž je i jedovatý oxid uhelnatý). S nástupem miniaturizovaných NDIR čidel na trh se usnadnilo a zpřesnilo měření těchto látek.

Mnoho materiálů použitých pro výrobu nábytku a spotřebičů obsahuje podíl *těkavých organických látek* (volatile organic compounds - VOC), které se uvolňují do ovzduší (zejména pokud je nábytek nový - “vůně novoty”). Zdrojem těchto těkavých organických látek jsou též různé spreje, rozpouštědla, paliva, čističe, pesticidy, atd. Do jisté míry jsou zdrojem těchto látek i produkty metabolismu člověka. Na trhu je k dispozici množství senzorů VOC na elektrochemickém principu, je proto vhodné měřit i tento parametr. Tyto senzory pak úhrnně měří množství plynů (total volatile organic compound - TVOC), včetně ethanu, ethanolu, acetonu, oxidu uhelnatého.

Dalším parametrem, který je možné sledovat, je *koncentrace polétavého prachu*. Ten může vznikat různými pochody, mezi hlavní producenty patří automobilová doprava a spalování (tepelné elektrárny, spalovny, domácnosti topící pevnými palivy apod). V době psaní této práce jsou běžně dostupné první typy senzorů na měření koncentrace částic o velikosti do 2,5 mikronu a 10 mikronů (tzv. PM2.5 a PM10). Nicméně miniaturizace těchto senzorů zatím příliš nepokročila.

Posledním měřeným parametrem je *atmosférický tlak*. Sensory tlaku jsou běžně dostupné a jsou k dispozici těchto senzorů v kombinovaných senzorech.

1.2.1 Optimální hodnoty parametrů vnitřního vzduchu

Senzor, jehož návrh je předmětem této práce, má sloužit pro informativní měření a monitorování kvality ovzduší, popř. řízení klimatizačních jednotek (HVAC jednotek - heating, ventilation and air conditioning). Nemá sloužit jako bezpečnostní čidlo. Proto jsou u následujících veličin uváděny pouze rozsahy hodnot pro lidský komfort, nikoliv bezpečné (povolené) limity.

Teplota a relativní vlhkost

Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých (Vyhláška č. 410/2005 Sb.) specifikuje dovolený rozsah teploty pro místnosti pro dlouhodobý pobyt na 20 až 28 °C. Optimální teplota je pak 22 ± 2 °C. Dovolенý rozsah relativní vlhkosti je pak 30 - 65 procent [3].

Nižší vlhkost způsobuje vysoušení dýchacích cest a jiných sliznic, což může způsobit vyšší náchylnost člověka k nemocem [4]. Vyšší vlhkost pak klade vyšší nároky na lidskou termoregulaci.

Koncentrace oxidu uhličitého

Koncentrace oxidu uhličitého ve venkovním prostředí se pohybuje kolem 400 ppm (objemových, tedy 400 miliontin celkového objemu). To je i ideální hodnota pro člověka. Obecně platí, že čím vyšší koncentrace oxidu uhličitého, tím méně příznivé prostředí pro člověka.

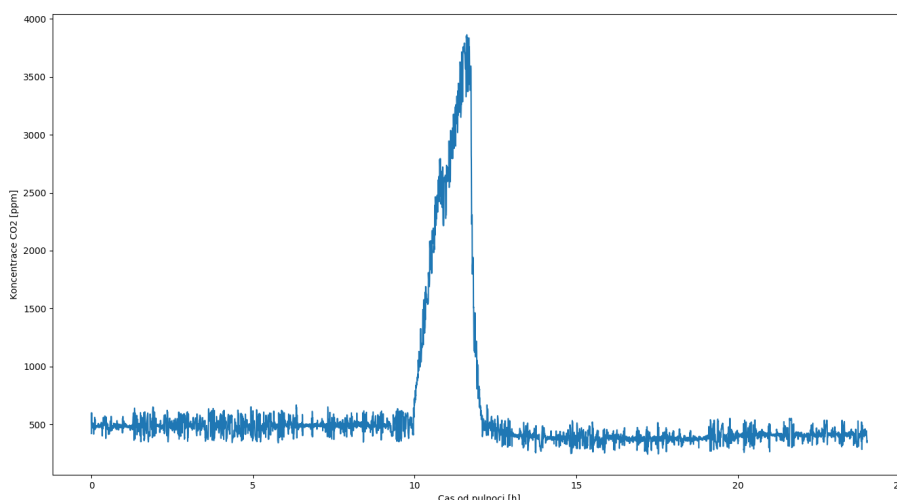
Empiricky zjištěné hodnoty ukazují, že koncentrace pod 1000 ppm jsou akceptovatelné. V uzavřených, málo či vůbec odvětrávaných místnostech s větším počtem lidí však hodnoty snadno dosahují 3000 ppm i více. Takové hodnoty sice nepředstavují bezprostřední zdravotní riziko, způsobují ale únavu a snižují pozornost.

Na obrázku 1 je průběh koncentrace oxidu uhličitého ve třídě nejmenované školy. Z prudkého nárůstu koncentrace je vidět, že žáci do třídy vstoupili kolem desáté hodiny. Koncentrace poměrně rychle překročila 3000 ppm. Z rychlého poklesu koncentrace se dá soudit, že po výuce (nebo již v jejím průběhu) byla třída větrána. Třída byla za celý den obsazena pouze jednou v dopoledních hodinách.

V České republice je maximální přípustná hodnota koncentrace oxidu uhličitého dána závaznou vyhláškou Ministerstva pro místní rozvoj č. 268/2009 Sb. na 1500 ppm [5]. Rozdělení do kvalitativních tříd pak specifikuje norma ČSN EN 15251 [6], viz tabulka 1.

Koncentrace VOC

U těkavých organických látek obecně platí, že čím nižší koncentrace, tím lépe. Ideální prostředí pro člověka by pak mělo mít nulový obsah těchto látek. Maximální hodnoty



Obrázek 1 Koncentrace oxidu uhličitého ve třídě v průběhu jednoho dne

Kategorie	Koncentrace [ppm]
I	$c_{AMB} + 350$
II	$c_{AMB} + 500$
III	$c_{AMB} + 800$
IV	$> c_{AMB} + 800$

Tabulka 1 Kvalitativní kategorie dle koncentrace CO_2 (c_{AMB} je hodnota v exteriéru). Zdroj: Vyhláška Ministerstva pro místní rozvoj č. 268/2009 Sb.

jsou pak dány nařízením vlády ČR č. 361/2007 Sb. [7], jde o přípustný expoziční limit (PEL) $0,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a nejvyšší přípustná koncentrace (NPK) $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (platí pro formaldehyd).

Koncentrace polétavého prachu (particulate matter)

Prachové částice jsou klasifikovány do kategorií dle horního limitu velikosti. Nejčastěji měřené jsou PM_{2,5} a PM₁₀ (horní limit velikosti částic 2,5 a 10 mikronu). Na obrázcích 3 a 2 je mapa znečištění pevnými částicemi v roce 2015.

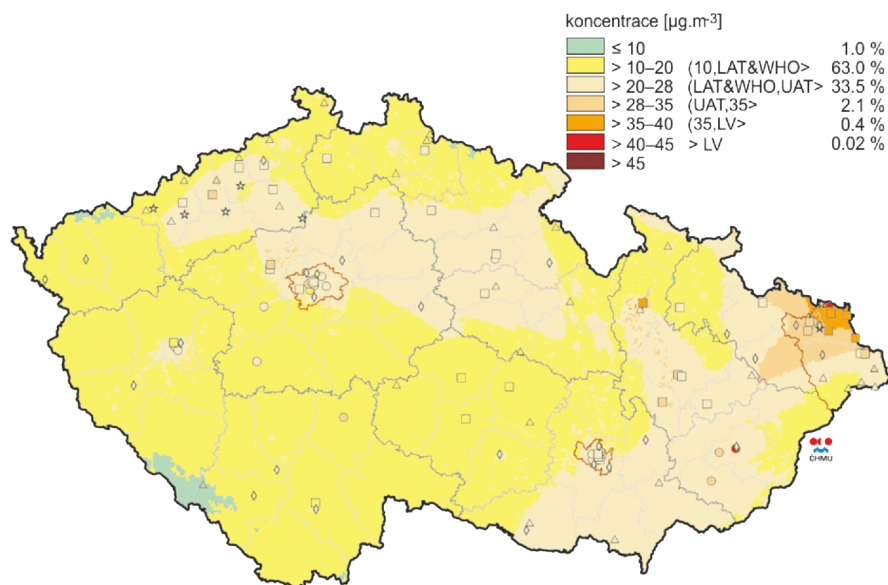
Stejně jako u VOC platí, že čím menší koncentrace polétavého prachu, tím lépe. Maximální přípustná hodnota se liší podle složení prachu [7].

Tlak vzduchu

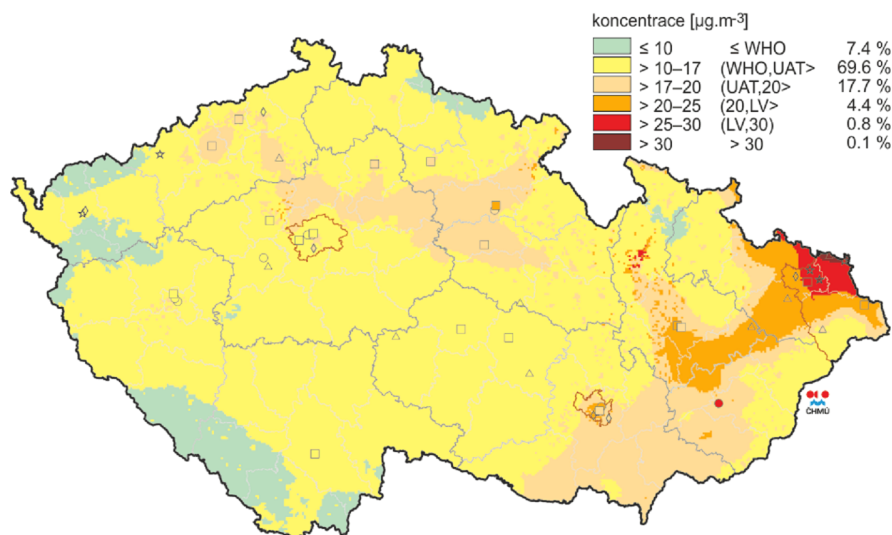
Jako ideální tlak vzduchu se dá brát standardní hodnota 1013.25 hPa. Změna tlaku je dobrým indikátorem počasí.

1.2.2 Regulace parametrů vnitřního ovzduší

Základním způsobem regulace vnitřního ovzduší je nucená výměna vzduchu na základě měření. V sofistikovanějších systémech pak může být vzduch z vnějšího prostředí upraven změnou teploty a vlhkosti i filtrací. Pro vyšší efektivitu může být v zimním období



Obrázek 2 Průměrná roční koncentrace pevných částic PM10 v roce 2015. Zdroj: ČHMÚ [8]



Obrázek 3 Průměrná roční koncentrace pevných částic PM2,5 v roce 2015. Zdroj: ČHMÚ [8]

prováděna rekuperace, tedy využití tepla odváděného vzduchu. Omezujícím činitelem při regulaci je energetická náročnost vytápění či klimatizování vzduchu.

Bez přítomnosti HVAC jednotek často není možné plně vyhovět všem podmínkám, v zimě můžeme mít vydýcháno a teplo, nebo čistý vzduch a zimu.

1.3 Původní verze senzoru

Ing. Vojtěch Skřivánek pod vedením Ing. Vladimíra Horyny v roce 2016 vypracoval diplomovou práci na téma Senzor kvality vnitřního prostředí - viz obrázek 4 - senzor teploty je označen jako SHT21). Bohužel se ale ukázalo, že pro reálné nasazení není senzor příliš vhodný, neboť použité elektrochemické senzory na měření oxidu uhličitého a VOC produkují velké množství tepla. To je způsobeno tím, že pro zajištění správné funkce mají elektrochemické senzory vyhřívání. To prakticky znemožňuje měření teploty

- v uzavřené krabici byla odchylka měřené teploty kolem 9 °C.

Elektrochemické senzory také trpí silným driftem; to znamená, že jejich výstupní napětí je závislé na teplotě. Také samotná závislost výstupního napětí na koncentraci měřeného plynu se s časem mění. Tyto senzory ze své podstaty nemohou v dlouhodobém horizontu měřit přesně absolutní hodnotu koncentrace. V době, kdy Ing. Skřivánek vytvářel svou práci, nebyly ještě k dispozici cenově dostupné optické NDIR senzory (non-dispersive infrared) pro oxid uhličitý. Tyto senzory se oproti elektrochemickým vyznačují vyšší přesností a zejména stabilitou.

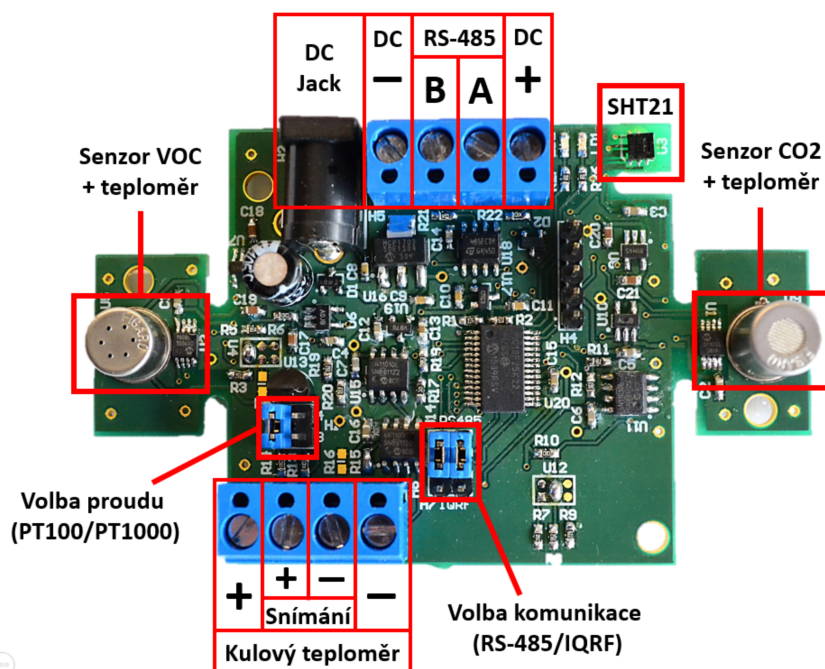
Původním zadáním autora této práce bylo pouze přepracovat desku plošných spojů (printed circuit board - PCB) a upravit firmware senzoru tak, aby měření koncentrace plynu bylo spolehlivé. Přepracovaná verze je na obrázku 5. Bohužel i tato verze trpěla silnou odchylkou měřené teploty. Graf samoohřevu po zapnutí senzoru je vidět na obrázku 9. Šíření tepla po desce plošných spojů zachycuje snímek termokamerou (obrázek 6).

Na obrázku 7 je vidět naměřený výstup tří elektrochemických senzorů VOC typu TGS2602 v průběhu dvou dnů. Ačkoliv senzory byly sepnuty ve stejnou dobu, je vidět, že jeden z nich trpí driftem. Tyto senzory mohou mít z výroby velký rozptyl vykazovaných hodnot, což musí konstruktér brát v úvahu.

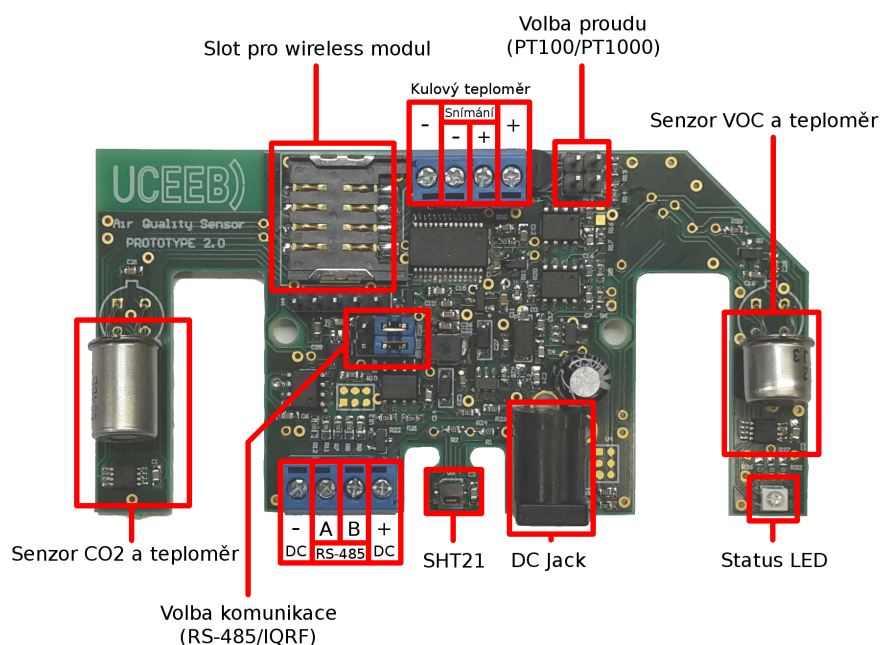
Na obrázku 8 je pak vidět výsledky měření oxidu uhličitého senzorem TGS4161. Senzor byl kalibrován podle referenčního čidla Graywolf, přesto je vidět drift již během tří dnů. Na tomto obrázku je též zajímavý fakt, že na grafu oxidu uhličitého lze určit, kdy se v okolí senzoru pohybovali lidé. Přes den je vidět zvýšené hodnoty s velkým rozptylem (množství špiček). V noci pak lze vidět pomalý pokles koncentrace způsobený přirozenou výměnou vzduchu.

Kalibraci elektrochemických a MOS senzorů byla věnována poměrně dost práce. V krátkodobém hledisku senzory pracovaly přesně, v dlouhodobém horizontu se však oproti referenčnímu čidlu rozcházely. Autokalibrace zabrání příliš velkým odchylkám, ale ze svého principu nemůže zajistit vysokou přesnost. Zakládá se totiž na předpokladu, že nejnižší hodnota v dlouhodobém časovém horizontu je rovna koncentraci v exteriéru (cca 400 ppm).

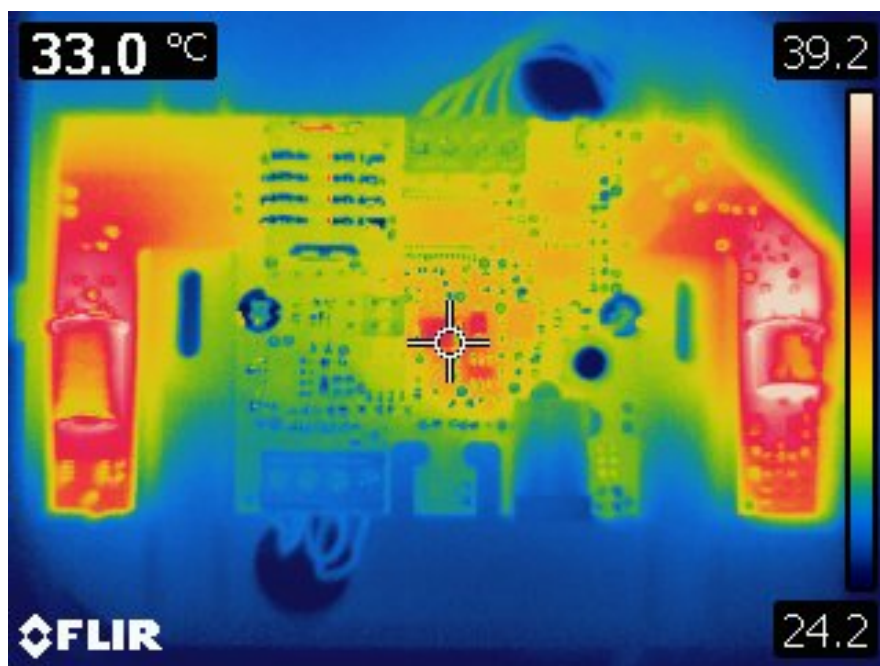
Z důvodů uvedených výše se jevílo jako nejefektivnější řešení kompletně přepracovat původní senzor, včetně použitých komponent.



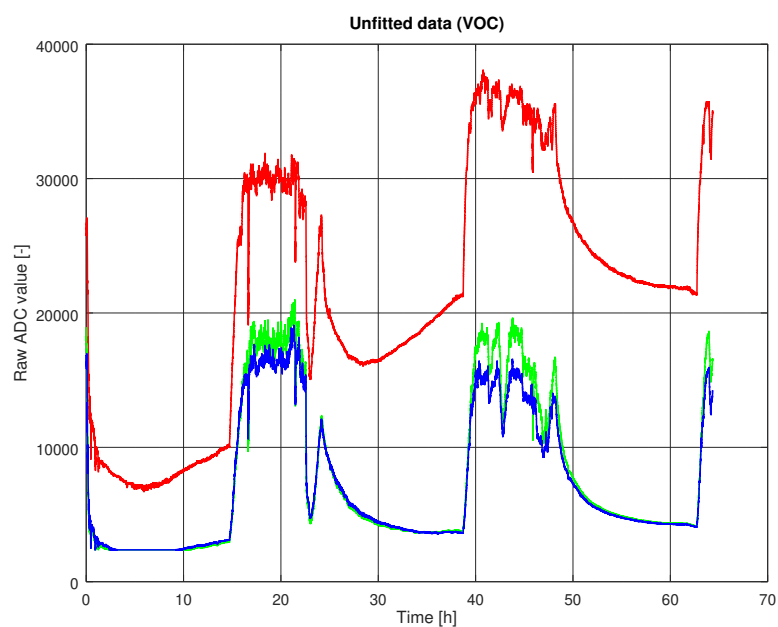
Obrázek 4 PCB původní verze senzoru. Převzato z diplomové práce Ing. Skřivánka



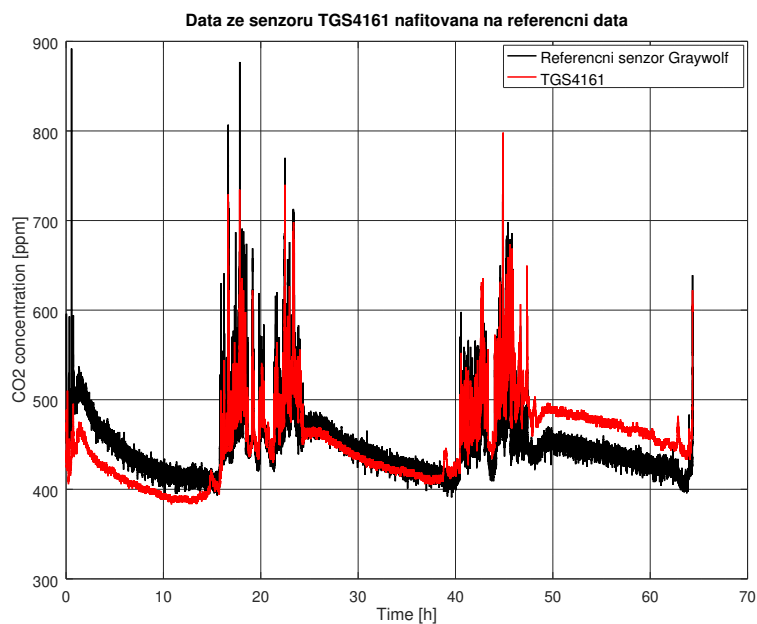
Obrázek 5 Přepracovaná verze senzoru (přepracoval Jan Mrňa, 2017)



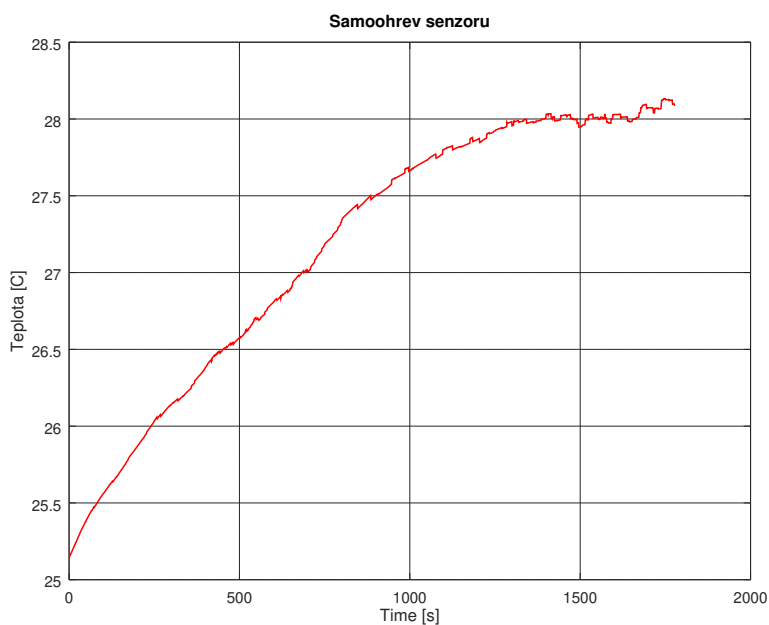
Obrázek 6 Snímek přepracované verze termokamerou Flir E60



Obrázek 7 Porovnání výstupu tří identických senzorů TGS2602 v průběhu dvou dnů



Obrázek 8 Data ze senzoru TGS4161 v porovnání s referenčními daty



Obrázek 9 Samoohřev přepracované verze senzoru po zapnutí

2 Podobné senzory dostupné na trhu

Senzorů měřících kvalitu vnitřního ovzduší je na trhu celá řada. Liší se v měřených veličinách i v komunikačním rozhraní. Kombinace, jež nabízí tato sensorová platforma, je však unikátní. Zařízení měří teplotu, relativní vlhkost, oxid uhličitý, těkavé organické látky a prach a disponuje bezdrátovým komunikačním rozhraním WiFi, MQTT, Lora / IQRf, analogovým výstupem a rozhraním ModBus/RS-485.

Pro srovnání je v této kapitole uvedeno několik zařízení podobného charakteru. Seznam není vyčerpávající, a dá se očekávat že v blízké budoucnosti bude podobných zařízení rychle přibývat.

2.1 Elgato Eve Room

Zařízení od firmy Elgato měří teplotu, vlhkost a VOC a CO₂ ekvivalent. Tento ekvivalent je pouze hodnotou odvozenou z VOC senzoru, a nedá se tudíž považovat za přesnou hodnotu koncentrace oxidu uhličitého. Zařízení komunikuje pomocí Bluetooth a je kompatibilní s Apple HomeKit. Napájené je z dvou AA baterií. Orientační cena ke 22.5.2018 je 2200 Kč [9].



Obrázek 10 Elgato Eve Room. Převzato z alza.cz

2.2 AXIS360-C02 LORA SENSOR

Senzor firmy AXIS360 měří oxid uhličitý, teplotu a vlhkost. Disponuje také PIR senzorem (pohybové infračervené čidlo) a senzorem osvitů. Konfigurace senzoru je možná pomocí NFC (Near-Field Communication) rozhraní. Je jej tedy možné nakonfigurovat pomocí smartphone s NFC podporou. Pro odečet dat je k dispozici rozhraní LoRa. Zařízení je napájené ze dvou AA baterií. Výrobce udává výdrž baterií 10 let. Cena zařízení ke 22.5.2018 je €270 (orientačně 6947 Kč) [10].



Obrázek 11 AXIS360-C02 LORA SENSOR. Převzato z axis360-sensors.com

2.3 Protronix NEW LINE II

Čidlo českého výrobce Protronix. Je k dispozici v následujících kombinacích měřených veličin:

- teplota, vlhkost
- VOC, teplota, vlhkost
- CO₂, teplota, vlhkost

Každá z kombinací má verzi s i bez relé. Senzory disponují analogovými výstupy. Verze měřící oxid uhličitý pak je k dispozici i ve verzích s bezdrátovým rozhraním Sigfox a IQRF. Všechny verze vyžadují externí napájení 14 - 40 VDC nebo 18 - 30 VAC. Cena zařízení není na stránkách výrobce uvedena [11].



Obrázek 12 Protronix New Line II. Převzato z careforair.eu

3 Výběr komponent

Tato sekce se věnuje analýze zadání, průzkumu existujících technologií plynových senzorů a výběru konkrétních komponent pro novou senzorovou platformu. Po výběru komponent pak následuje formulace požadavků na platformu (napájení, komunikace). Je též ověřena kompatibilita vybraných komponent.

Pro účely této práce bude řešené zařízení dále v textu označováno jako “senzorová platforma”.

3.1 Senzory

3.1.1 Teplota a relativní vlhkost

Výběr senzoru

Pro měření teploty byl využit kombinovaný senzor teploty a relativní vlhkosti Sensirion SHT31. Předchůdce tohoto senzoru, SHT21, byl použit v původním designu Ing. Skřivánka a jevil se jako přesný a spolehlivý. Senzor má široký rozsah napájecího napětí (od 2,4 do 5,5 V) a komunikuje po I2C sběrnici (adresa 0x44 a 0x45, volitelné napětovou úroveň na pinu ADDR). Typická spotřeba proudu při měření je 0,8 mA, maximální pak 1,5 mA [12]. Graf přesnosti měření teploty je na obrázku 14. Graf přesnosti měření relativní vlhkosti je na obrázku 15.

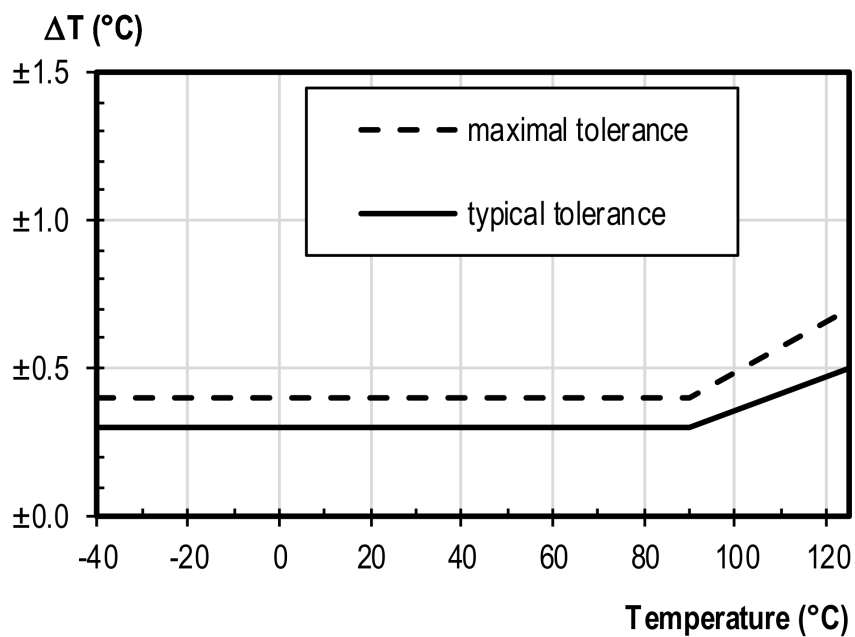
Rozměry senzoru jsou 2,5 x 2,5 x 0,9 mm (Š x D x V). Foto senzoru je na obrázku 13.

Požadavky a omezení

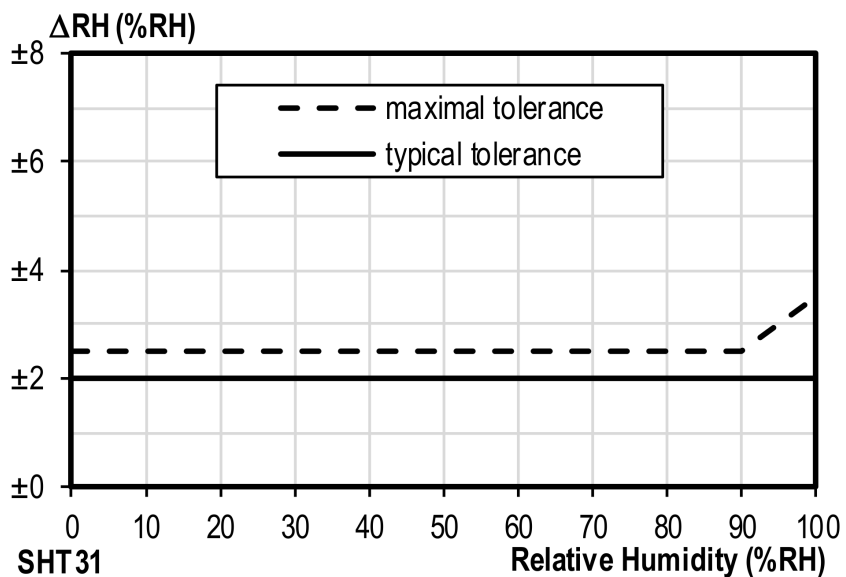
Díky širokému rozsahu napájení je možné senzor provozovat na napětí jak 3,3 V, tak i na 5 V, což jsou často se vyskytující hodnoty napájecího napětí mikrokontrolérů. Senzor podporuje pouze I2C sběrnici, ta je ale přítomna na mnoha architekturách



Obrázek 13 Foto senzoru SHT31. Zdroj: datasheet SHT31 [12]



Obrázek 14 Přesnost měření teploty senzoru SHT31. Zdroj: datasheet SHT31 [12]



Obrázek 15 Přesnost měření relativní vlhkosti senzoru SHT31. Zdroj: datasheet SHT31 [12]

mikrokontrolérů ve formě periferie. V případě její absence je pak možné ji softwarově emulovat (tzv. bit-banging).

Konstrukce PCB

Metody přenosu tepla Největším omezením teplotního senzoru, které je ovšem společné pro všechny typy senzorů, je nutnost umístit senzor co nejdále od všech zdrojů tepla, aby se zamezilo samoohřevu (jeden z neduhů předchozí platformy). Jak ukázal redesign platformy Ing. Skřivánka, měření teploty je velmi citlivé, a maximální vzdálenost na relativně malé ploše PCB nemusí být dostatečná. I v případě umístění čidla i tepla generujících komponent (zejména elektrochemických senzorů) na vyfrézované “poloostrovy” (viz fotka 5) není samoohřev eliminován.

Metody šíření tepla jsou:

- vedení
- proudění
- sálání

Tyto metody jsou podrobněji rozebrány v následujících oddílech.

Sálání, tedy přenos energie elektromagnetickým zářením, v tomto případě nebude velkou mírou přispívat k samoohřevu, neboť čidlo i sálající objekt jsou osazeny na stejném PCB, nemají tedy na sebe přímý “výhled”. V úvahu připadá sálání tepla z krabičky kryjící celou platformu, to ale pouze v případě, že by byla výrazně zahřívána teplem ze zařízení. I v tomto případě by tak příspěvek sálání nebyl zřejmě příliš velký.

Přenos tepla *prouděním* je nutné brát v potaz, zejména z hlediska vzájemné orientace senzoru a generátoru tepla i mechanické konstrukce senzoru. Senzor je obklopen vzduchem, který po lokálním zahřátí (v místě nad teplo generující komponentou) může v krabičce cirkulovat. Teplotní gradient způsobí rozdílné hustoty vzduchu, a tím i stoupání teplejšího vzduchu.

Z hlediska praktického návrhu je přenos tepla prouděním možné omezit tak, že senzor umístíme pod teplo generující komponentu. Teplý vzduch tak bude stoupat pryč od senzoru teploty. Perforace krabičky pak umožní teplému vzduchu uniknout z prostoru sensorové platformy. Při vhodném návrhu umístění teplo generujících komponent by zřejmě bylo možné dosáhnout jistého “komínového” efektu. To znamená, že vzduch z vnějšího prostředí, jehož teplotu chceme měřit, bude nasáván ve spodní části krabičky, kde bude též umístěn i senzor. Teplo generující komponenty budou pak umístěny v horní, popř. střední části krabičky. V horní části krabičky bude perforace, umožňující ohřátému vzduchu uniknout. Vzhledem k malému teplotnímu gradientu ale tento efekt nebude příliš silný.

Dominantním způsobem přenosu tepla je *vedení* plošným spojem a materiálem desky. Materiál FR-4, ze kterého se běžně PCB pro nízkofrekvenční aplikace vyrábí, má koeficient přenosu tepla přibližně $0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Měď, ze které jsou cesty vyleptané na desce, má koeficient přenosu tepla $401 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pro porovnání, vzduch má koeficient přenosu tepla $0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Omezení přenosu tepla Pro potlačení přenosu tepla vedením je potřeba minimalizovat průřez materiálu a maximalizovat délku cesty mezi zdrojem tepla a senzorem. Jelikož měď je zde dominantní (má řádově větší tepelnou vodivost než kupřet FR-4), je potřeba minimalizovat množství mědi mezi zdrojem a senzorem. To v praxi znamená nepoužívat rozlitou měď, a naopak použít co nejmenší množství tenkých cest na spojení senzoru s okolní elektronikou.

Zvětšení tepelného odporu dosáhneme prodloužením pomyslné nejkratší cesty mezi senzorem teploty a zdrojem tepla. Toho můžeme docílit několika způsoby:

1. Umístěním zdroje tepla a senzoru co nejdál od sebe
2. Zvětšením plochy PCB
3. Změnou tvaru vnějšího obrysu PCB
4. Frézováním PCB (přerušeni přímé cesty frézováním)

Všechny tyto metody však jsou limitovány mechanickým návrhem a cenou výsledného výrobku. Při výrobě se platí za plochu PCB i za délku frézování. Výsledný návrh proto nutně musí být kompromisem. Přesto musí být zaručeno co nejmenší ovlivnění měřené teploty.

3.1.2 Metody měření koncentrace plynu

Senzory koncentrací plynu se dělí na několik kategorií [13]:

1. Metal-Oxide Semiconductor (MOS)
2. Non-Dispersive Infrared (NDIR) - nedisperzní infračervený optický senzor
3. Electrochemické senzory
4. Pelistor
5. Photoionization Detector (PID) - fotoionizační detektor

Ke každému typu je podáno stručné vyvětlení principu měření. Těm metodám, které jsou využity v konečném designu, je věnováno více pozornosti.

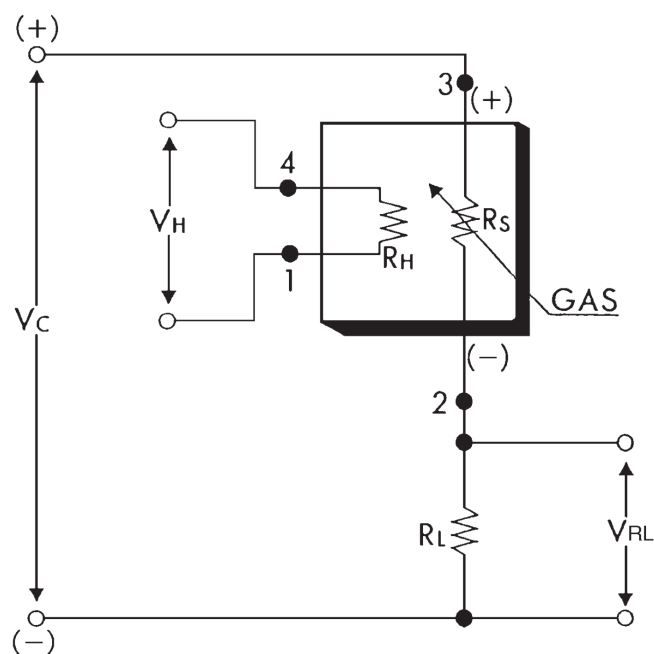
Senzory Metal-Oxide Semiconductor

Tento senzor pracuje na principu chemisorpce (druh adsorpce) měřeného plynu na pevném elektrolytu, kdy dochází k měřitelné změně vodivosti substrátu. Reakce způsobující změnu vodivosti není přesně popsána. Jedná se zřejmě o komplexní proces zahrnující difúzi, chemisorpci a desorpci plynů a další [13].

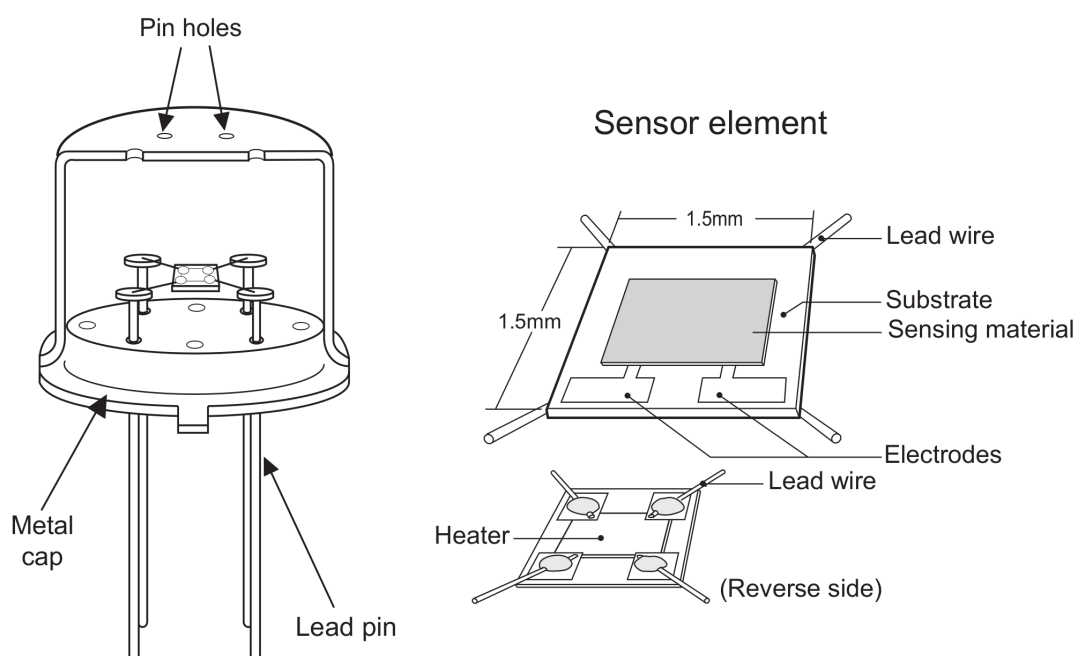
Rychlost a průběh reakce je silně závislý na teplotě. Pro správnou funkci senzor vyžaduje teploty v rozmezí 500-900 K. Proto tyto senzory vyžadují vyhřívání. Ve výsledném designu je s tímto nutné počítat, a neumísťovat je blízko komponent citlivých na teplotu prostředí. Miniaturizované verze těchto senzorů (v SMD pouzdrech), které se v době psaní této práce začaly objevovat na trhu, vyžadují menší výkon tepelného zdroje. Jsou proto energeticky efektivnější a zároveň snižují samoohřev výsledného zařízení.

Tyto senzory se většinou prodávají v pouzdrech, obsahují pouze prvek realizující samotné snímání plynu, bez další elektroniky zpracovávající výsledný signál. Proto je pro použití těchto senzorů potřeba analogového zpracování signálu. To může být v nejjednodušší formě tvořeno pouze odporovým děličem přímo vzorkovaným AD převodníkem. Jednoduché schéma, zobrazující odporový dělič s MOS senzorem a snímáním výstupního signálu je na obrázku 16.

MOS senzory jsou často používány pro měření kvality vnitřního ovzduší (IAQ - indoor air quality). Příkladem může být např. TGS2602 (obrázek 17) a TGS2620, což jsou senzory VOC použité v původním designu Ing. Skřivánka. Příkladem novějších (miniaturizovaných) MOS senzorů v SMD pouzdře může být Figaro TGS8100 (pro měření TVOC), Amphenol SGX Sensortech MICS-6814 (pro měření NH₃, CO, NO₂). Zajímavější jsou ale SMD MOS senzory s integrovanou elektronikou, které umožňují digitální komunikaci s nadřazeným systémem. Příkladem může být Sensirion SGP30 (pro měření TVOC) a Bosch Sensortec BME680 (pro měření TVOC, tlaku, teploty a vlhkosti).



Obrázek 16 Jednoduché snímání výstupu MOS senzoru s vyhříváním. Převzato z [14]



Obrázek 17 Struktura MOS senzoru TGS2602. Převzato z [14]

Non-Dispersive Infrared senzory (NDIR)

NDIR senzory měří koncentraci plynu ve vzduchu optickou metodou. Využívají toho, že každá látka má specifické absorpční spektrum obsahující maxima a minima. To znamená, že existuje vlnová délka elektromagnetického záření, pro něž daná látka vykazuje maximální absorpci. Pokud se toto maximum nekryje s maximy jiných látek, vyskytujících se v měřené směsi plynů, je možné na základě úbytku intenzity záření vypočítat koncentraci dané látky.

Praktická implementace takového senzoru pak často vypadá tak, že zdroj záření (žárovka nebo LED) prosvěcuje komoru zaplněnou měřeným plynem. Na druhé straně komory je optický filtr, propouštějící pouze vlnovou délku odpovídající absorpčnímu maximu daného plynu. Pro CO₂ je toto maximum na 4.26 μm [15], tedy v infračervené oblasti (viz obrázek 18). Za filtrem je pak fotocitlivý prvek (fotodioda nebo fototranzistor citlivý na danou vlnovou délku). Často se pak ještě používá referenční kanál, kde je přidán druhý fotocitlivý prvek a optický filtr pro referenční vlnovou délku (vybranou tak, aby neodpovídala absorpčnímu maximu žádného plynu vyskytujícímu se v měřené směsi). Takový systém je schematicky zobrazen na obrázku 19. Tento referenční kanál pak umožňuje kompenzovat stárnutí zdroje světla. Úměrně s klesající intenzitou světla na měřeném kanálu se bude snižovat i intenzita na referenčním kanálu.

Koncepce NDIR měření umožňuje měřit souběžně více plynů. Toho dosáhneme zvětšením množství kanálů s různými optickými filtry. Mezi plyny měřitelnými touto metodou patří O₂, CO, NO, NO₂, HNO₃, NH₃, H₂O, O₃ a množství dalších (viz [16]).

Koncentrace plynu se z intenzity dopadajícího světla vypočítá pomocí Lambert-Beerova zákona [17]:

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-A} = 10^{-\epsilon lc} \quad (1)$$

Kde I je intenzita dopadajícího záření za přítomnosti plynu, I_0 je intenzita (na téže vlnové délce) bez přítomnosti měřeného plynu, A je absorpce na jednotku délky, ϵ je koeficient molárního útlumu, l je délka trasy a c je koncentrace. Jako hodnota I_0 může být brána hodnota z referenčního kanálu, to však vyžaduje kalibraci celého měřícího systému a změření daných konstant.

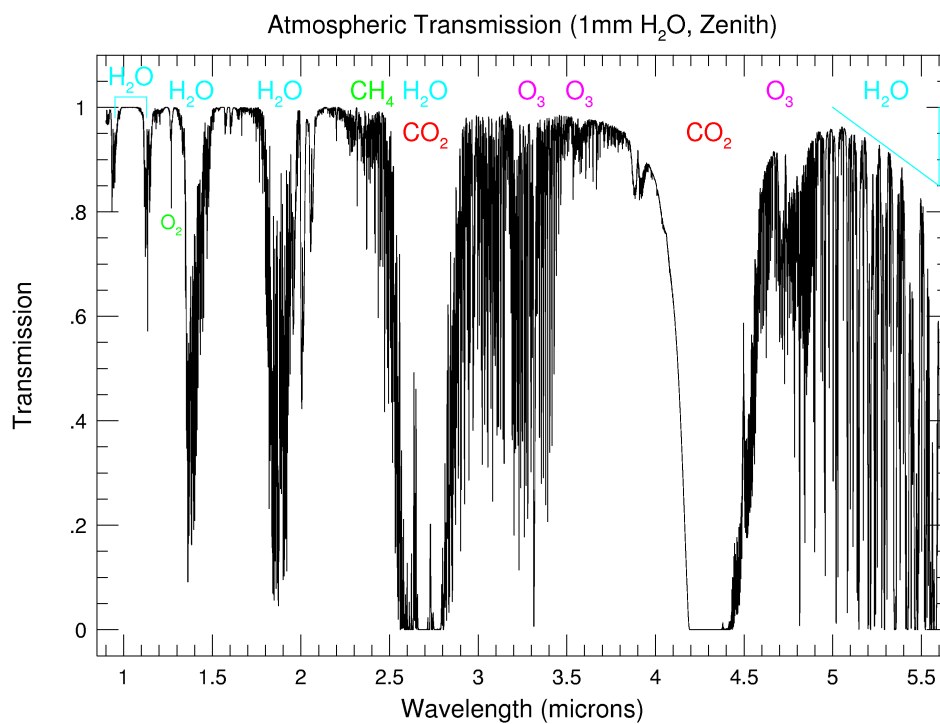
Disperzní senzory pak pracují na podobném principu jako NDIR, s tím rozdílem, že světlo je před průchodem komorou s plynem rozptýleno pomocí hranolu nebo mřížky. Pro měření je tedy využita pouze jedna vlnová délka. Pokud má takový systém možnost mechanicky manipulovat s rozptylovým prvkem, je možné měnit vlnovou délku měření. Takový senzor je oproti NDIR větší a složitější, ale umožňuje měření v širokém spektru. To se ovšem promítne i na ceně senzoru, která je oproti NDIR senzorům řádově vyšší.

Elektrochemické senzory

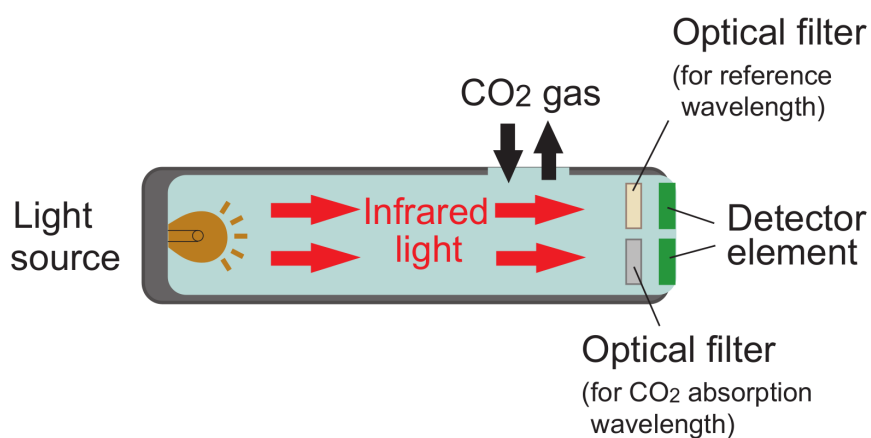
Elektrochemické senzory detekují plyn pomocí chemické reakce, která generuje rozdíl potenciálů. Plyn proniká membránou do elektrolytu, kde způsobuje redoxní reakci, která vyvolá tok elektrického proudu mezi elektrodami [13].

Takový senzor ve většině případů bude vyžadovat analogový zesilovač s velkou vstupní impedancí. Jeho použití tedy vyžaduje složitější návrh a větší množství komponent. Stejně jako u MOS, senzor podléhá teplotnímu driftu, který je potřeba kompenzovat.

Příkladem elektrochemického senzoru může být Figaro TGS5141 (pro měření CO) nebo TGS4161 (pro měření CO₂), použitý v předchozím designu Ing. Skřivánka.



Obrázek 18 Transmisní spektrum vzduchu. Převzato z [18]



Obrázek 19 Schématické znázornění NDIR senzoru s referenčním kanálem. Převzato z [19]

Pelistory

Pelistory využívají k detekci plynu katalytického spalování. Za přítomnosti katalyzátoru, který snižuje zápalnou teplotu plynu, je plyn ohřát. To způsobí jeho vznícení a ohřátí senzoru teploty (často ve formě platinového odporového teploměru). Samotná spalovací komora je pak od vnějšího prostředí oddělena mřížkou nebo sintrem, čímž se zamezí šíření požáru.

Pelistory lze proto využít pouze k detekci hořlavých plynů. Nalézají široké využití v průmyslových oblastech, kde hrozí exploze či požáry způsobené úniky plynu. Pro měření IAQ však nejsou vhodné.

Fotoionizační detektory

Fotoionizační detektory pracují na principu ionizace plynu. UV lampa prosvěcuje prostor mezi dvěma elektrodami, na něž je aplikováno elektrické napětí. V případě přítomnosti daného plynu dojde k ionizaci jednotlivých molekul, což změní vodivost plynu samotného a díky elektrickému poli (vybuzeného rozdílem potenciálů na elektrodách) dojde k pohybu ionizovaných částic k elektrodám. Přítomnost plynu je možno detekovat jako elektrický proud protékající zdrojem napětí pro elektrody.

Tyto detektory jsou vhodné pro detekci např. TVOC (celkového obsahu VOC plynů), nicméně nejsou v současné době k dispozici v přijatelné cenové hladině spotřební elektroniky.

Shrnutí

Pro aplikaci měření IAQ jsou nejvhodnější senzory optické (NDIR), MOS a elektrochemické. Z komponent dostupných na trhu v době psaní práce se senzory na optickém principu jeví jako nejpřesnější a nejstabilnější v dlouhodobém horizontu, avšak jsou k dispozici pouze pro měření oxidu uhličitého. Pro měření TVOC v koncentracích běžně přítomných v budovách se jeví jako nejlepší řešení senzory MOS, ačkoliv trpí silným driftem teplotním i časovým. Proto je z hlediska praktického návrhu lepší využít senzor se zabudovanou elektronikou, která signál zpracovává a disponuje digitálním výstupem, který je již snadné interpretovat.

3.1.3 Oxid uhličitý

V poslední době se na trhu začínají objevovat NDIR senzory miniaturizované natolik, že je reálné jejich začlenění do kompaktní kombinované platformy. Příkladem je Figaro CDM7160. Tento senzor vyniká malými rozměry (17x32 mm), oproti vyhřívaným MOS sensorům i nižší spotřebou (průměrná 10 mA při 5V napájecího napětí) i jednoduchostí odečítání dat (I2C / UART). V době návrhu platformy to byl nejmenší NDIR senzor oxidu uhličitého na trhu.

Základní parametry senzoru CDM7160 V době psaní této práce vydala firma Sensirion senzor SCD30 pro měření koncentrace CO₂, který je velikostně srovnatelný se zmíněným CDM7160. Oproti němu však navíc disponuje senzorem teploty a vlhkosti, má větší rozsah napájecího napětí (již od 3 V) [19] a je též cenově výhodnější. Pro případnou další verzi této platformy by bylo vhodné senzor SCD30 vyzkoušet a zvážit jeho použití.

Rozsah měřených hodnot	300 - 5000 ppm CO ₂
Napájecí napětí	4.75 - 5.25 VDC
Spotřeba	60 mA špičková, 10 mA průměrná
Přesnost	±50 ppm + 3% hodnoty
Response time T90	2 minuty
Komunikace	I2C / UART
Rozměry	32 x 17 x 7.4 mm
Cena (SOS electronic, 1 kus, 10.4.2018)	1230 Kč

Tabulka 2 Parametry senzoru CDM7160. Zdroj: datasheet CDM7160

Rozsah měřených hodnot	400 - 40000 ppm CO ₂
Napájecí napětí	3.3 - 5.5 VDC
Spotřeba	75 mA špičková, 19 mA průměrná
Přesnost	±30 ppm + 3% hodnoty
Response time T63	20 s
Komunikace	I2C / UART
Rozměry	35 x 23 x 7 mm
Cena (SOS electronic, 1 kus, 10.4.2018)	870 Kč

Tabulka 3 Parametry senzoru SCD30. Zdroj: datasheet SCD30

Rozsah měřených hodnot	350 - 10000 ppm CO ₂
Napájecí napětí pro vyhřívání	5,0 ±0,2 VDC
Spotřeba	50 mA konstantní
Přesnost	±20 % při 1000 ppm
Response time T90	90 s
Komunikace	Analogové; nutný zesilovač s velkým Z_{in}
Rozměry	válec o výšce 12 mm, průměr 9,2 mm
Výstupní napětí (EMF) při 350 ppm CO ₂	220 až 490 mV
Δ EMF pro Δ koncentrace 3000 ppm	44 až 72 mV
Cena	cca 600 Kč

Tabulka 4 Parametry senzoru TGS4161. Zdroj: datasheet TGS4161

Základní parametry senzoru SCD30 Dle datasheetu SCD30 je součástí firmware senzoru pravidelná autokalibrace, která vyžaduje, aby senzor byl jednou za čas vystaven venkovní koncentraci CO₂ (ta se pohybuje okolo 400 ppm) [20]. Autokalibrace bude ve většině případů pouze měnit offset senzoru. To znamená, že nejnižší naměřená hodnota za delší časový úsek bude považována za 400 ppm a dle toho bude upravena rovnice výpočtu koncentrace. Více o autokalibraci senzorů oxidu uhličitého lze najít v aplikační poznámce firmy Protronix [21].

Pro porovnání s NDIR senzory je zde uveden elektrochemický senzor TGS4161, použitý pro měření CO₂ na platformě Ing. Skřivánka.

Základní parametry senzoru TGS4161 [22] Již z datasheetu je patrné, že rozptyl výstupního napětí jednotlivých senzorů TGS4161 bude velký. Dle údajů samotného výrobce může rozdíl výstupního napětí činit až 270 mV. Přitom rozdíl výstupního napětí senzoru mezi koncentracemi 400 a 3400 ppm bude pouze 44 až 72 mV. Přesnost udávaná v datasheetu je 20 procent při 1000 ppm, což je nedostačující. Zvláště přihlédneme-li

Rozsah měřených hodnot	0 - 1000 ppm ethanol/vodík
Napájecí napětí	1,8 ±0,18 VDC
Spotřeba	48,2 mA při měření
Přesnost	±15 % v rozsahu 0-30 ppm
Komunikace	I2C
Rozměry	2,45 x 2,45 x 0,9 mm (Š x D x V)
Cena (SOS electronic, 1 kus, 15.4.2018)	186 Kč

Tabulka 5 Parametry senzoru SGP30. Zdroj: datasheet SGP30

k tomu, že hodnoty uvedené v tomto datasheetu jsou velmi optimistické. Autor této práce provedl měření na několika kusech TGS4161 a ne vždy parametry odpovídaly hodnotám v datasheetu. Senzor TGS4161 tedy není pro účely této práce vhodný.

Výběr senzoru

V době návrhu platformy nebyl k dispozici senzor Sensirion SCD30, byl proto vybrán senzor Figaro CDM7160. V době návrhu platformy to byl nejmenší NDIR senzor koncentrace CO₂ na trhu (v cenové hladině uživatelské elektroniky). Přejít z elektrochemického senzoru na NDIR modul s vlastní elektronikou urychlil návrh při zvýšení dlouhodobé stability a přesnosti. Zároveň tím z návrhu odpadla komponenta generující velké množství tepla, což bylo podmínkou nutnou k redukci samoohřevu zařízení.

Požadavky a omezení

Senzor CDM7160 vyžaduje napájení 5V, což bude muset být zohledněno ve výsledném návrhu. Jeho maximální proudový odběr je 60 mA. Senzor komunikuje po sběrnici I2C. Z hlediska mechanického návrhu bude nutné zaručit, že senzor bude na dobře větraném místě.

3.1.4 Těživé organické látky

V době návrhu platformy se jako nejperspektivnější zdál nově vydaný MOS senzor Figaro TGS8100. Díky své malé velikosti má menší spotřebu pro vyhřívání, a tím pádem by se snížil i celkový samoohřev zařízení. Pak se však na trh dostaly dva další senzory od velkých výrobců, a to Sensirion SGP30 a Bosch Sensortec BME680. Oba tyto senzory jsou též typu MOS a jejich SMD pouzdra jsou velikostně srovnatelná. Oproti TGS8100 však mají integrovanou další elektroniku. V případě BME680 pak mají integrován i senzor teploty, vlhkosti a tlaku. Z hlediska návrháře je použití těchto senzorů výhodnější, neboť snižují celkové množství komponent i čas nutný pro návrh samotný.

Základní parametry senzoru Sensirion SGP30 [23]

SGP30 obsahuje procesor pro zpracování digitálního signálu (DSP procesor), který zpracovává signál ze snímací části. Nadřazenému systému, s nímž komunikuje pomocí I2C sběrnice, umožňuje odečítat ekvivalentní koncentraci vodíku a ethanolu a celkovou hodnotu TVOC. Protože MOS senzory ze své podstaty trpí časovým driftem, interní elektronika obsahuje autokalibrační procedury. Nemá však žádnou non-volatile paměť (ta uchovává data i při výpadku napájení), o ukládání kalibračních konstant se proto musí starat nadřazený systém.

Rozsah měřených hodnot plynu	neuveden
Napájecí napětí	1,71 až 3,6 VDC
Spotřeba	12 mA při měření
Přesnost	±5 %
Komunikace	I2C, SPI
Rozměry	3 x 3 x 0,93 mm (Š x D x V)
Cena (Mouser electronics, 1 kus, 15.4.2018)	205 Kč

Tabulka 6 Parametry senzoru BME680. Zdroj: datasheet BME680

Výhodou senzoru SGP30 je možnost odečítat rovnou koncentraci TVOC bez dalších přepočtů. Nevýhodou pak je nutnost napájecího napětí 1,8 V, což bude pravděpodobně vyžadovat přidání další komponenty (LDO regulátoru) do designu.

Základní parametry senzoru Bosch Sensortec BME680 [24]

BME680 také integruje elektroniku komunikující s nadřazeným systémem. Narozdíl od SGP30 však signál není zpracován na senzoru samotném, ale v nadřazeném systému pomocí firmou Bosch dodané knihovně (BSEC). Tato knihovna se skládá ze dvou částí: první je ve formě zdrojového kódu a podporuje pouze základní funkcionalitu (vyčítání hodnot ze senzoru, bez přepočtů, kompenzace i kalibrace), druhá je ve formě uzavřené knihovny, která obstarává veškeré nutné výpočty a kalibrační procedury. Programátor musí zaručit pravidelné volání rutin z této knihovny. Stejně jako u SGP30, pro dlouhodobou přesnost vyžaduje senzor použití non-volatile paměti nadřazeného systému pro uložení kalibračních hodnot.

Při použití této knihovny je možné získat kalibrované a kompenzované hodnoty teploty, vlhkosti, tlaku a IAQ indexu. Knihovna neposkytuje hodnoty o koncentraci VOC, ale nahrazuje je IAQ indexem spočteným na základě aktuální koncentrace TVOC. Možné důvody pro toto rozhodnutí jsou:

- Měření absolutních hodnot koncentrací je na MOS senzorech dlouhodobě nestabilní a nepřesné (v relativním měřítku však měří dobře).
- Naměřený odpor MOS senzoru je vždy buď přepočítán na ekvivalent jednoho plynu (např. ethanol, což však ale docela jistě neodpovídá reálné situaci) nebo na celkovou hodnotu TVOC, což je ale opět umělá hodnota, která pravděpodobně neodpovídá skutečné situaci. Senzor má různou citlivost na různé plyny, stejné hodnoty TVOC lze dosáhnout různými kombinacemi plynů. Ze své podstaty je tak přepočítaná TVOC koncentrace pouze přibližný ukazatel množství těkavých látek v ovzduší. Použití bezrozměrného indexu kvality vnitřního ovzduší zde proto má své opodstatnění.

Výběr senzoru

Výběr probíhal mezi SGP30 a BME680. Vybrán byl senzor BME680. Důvody pro toto rozhodnutí jsou:

- Umožňuje měřit další veličiny, zajímavý je pro nás zejména tlak. Teplota a vlhkost musí být kompenzovány kvůli ohřevu senzoru, nejsou tedy tak přesné.
- Možnost napájení 3,3 V (konkurenční senzor SGP30 vyžaduje 1,8 V, což by znamenalo komponentu navíc).
- Jde o komponentu od zavedeného výrobce.

Vizualizace senzoru BME680 je na obrázku 20.



Obrázek 20 Vizualizace senzoru BME680 (velikost 3x3x0.93 mm). Převzato z [24] a upraveno

Požadavky a omezení

Senzor generuje teplo pouze při měření, a díky své velikosti nepotřebuje velký tepelný výkon. Přesto ale není vhodné jej umísťovat do blízkosti komponent citlivých na teplo (což je senzor teploty).

BME680 podporuje komunikaci přes sběrnice I2C i SPI. Umožňuje napájení 3,3 V, což je často užívaná hodnota pro mikrokontroléry.

3.1.5 Tlak

Senzor atmosférického tlaku je již zahrnut v senzoru BME680, není proto potřeba další dedikované komponenty pro tuto veličinu.

3.1.6 Senzor prachových částic

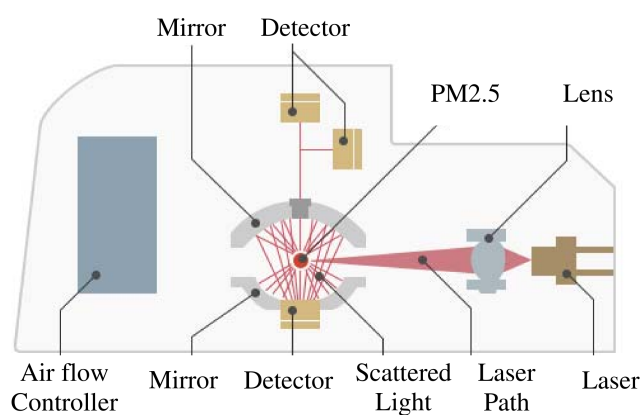
Senzory využívající klasické metody měření množství prachových částic (např. TEOM - Tapered element oscillating microbalance [25]), používané pro přesné měření jsou velmi nákladné a rozměrné, nepřipadají proto pro tuto aplikaci v úvahu. V poslední době se však objevuje množství levných senzorů prachu, pracujících na jednodušším principu. V těchto čidlech vzduch kontrolovaně proudí komorou prozářenou usměrněným svazkem optického záření. Přítomnost prachových částic způsobuje rozptyl světla, které je detekováno fotocitlivými prvky rozmístěnými v komoře [26] (obrázek 21).

Na trhu je k dispozici množství senzorů čínské produkce. Od zavedených výrobců je k dispozici pouze senzor Sharp GP2Y1010AU0F, který je však již poměrně koncepčně starý (2007) a disponuje pouze analogovým odečtem [27]. Dle vyjádření firmy Sensirion [28] se dá očekávat v brzké době vydání nového senzoru PM2.5, nicméně v době návrhu i psaní této práce k dispozici ještě nebyl. Dalším výrobcem, který zveřejnil zprávu o vývoji prachového senzoru, byl v roce 2016 Mitsubishi Electric [26]. Pro koncového zákazníka však k dispozici v době psaní této práce není.

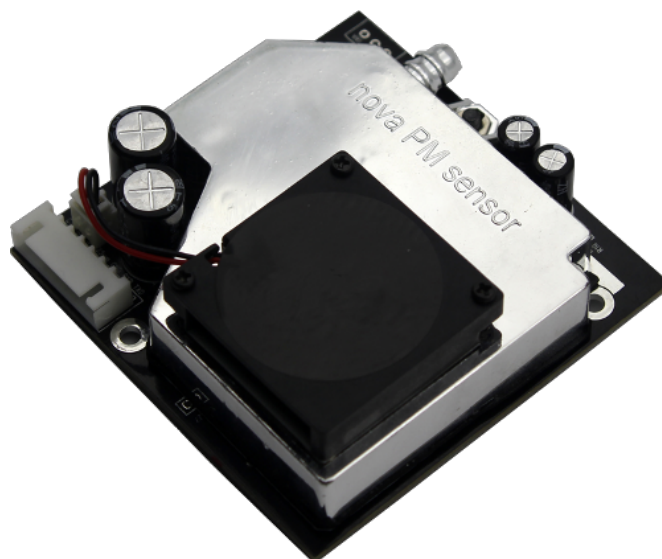
Výběr senzoru

Z množství nabízených senzorů byl vybrán NOVA Fitness SDS011. Důvodem výběru bylo poměrně dobré hodnocení v testu [30] a dostupnost pro koncového zákazníka. Senzor je na obrázku 22.

Základní parametry senzoru NOVA Fitness SDS011 [31]



Obrázek 21 Schéma prachového senzoru Mitsubishi. Převzato z [26]



Obrázek 22 Senzor SDS011. Převzato z [29]

Měřené skupiny	PM2.5, PM10
Rozsah měření	0.0 - 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Napájecí napětí	4,7 - 5,3 VDC
Spotřeba	70 mA
Přesnost	$\pm 15\%$ a $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$
Komunikace	UART
Rozměry	71 x 70 x 23 mm (Š x D x V)
Cena (AnalogLamb, 1 kus, 21.4.2018)	495 Kč

Tabulka 7 Parametry senzoru SDS011. Zdroj: datasheet SDS011

Požadavky a omezení

Senzor vyžaduje napájení 5V a má poměrně velkou spotřebu proudu 70 mA. To je nutné brát v potaz při návrhu napájecího zdroje platformy. Největší omezení plynou z velkého rozměru senzoru, který navíc nemá možnost osazení na PCB. Je tedy potřeba připravit na desku konektor a mechanický návrh krabičky provést tak, aby umožňovala osazení jak PCB, tak i prachového senzoru.

3.2 Mikrokontrolér (MCU)

V zadání je definováno použití platformy Espressif ESP32. Tato platforma je pro návrháře levných embedded systémů a IoT zařízení velmi zajímavá, neboť v jednom integrovaném obvodu nabízí velké množství periférií a komunikačních interface [32]:

- 32-bit dvoujádrový procesor o maximální taktovací frekvenci 240 MHz (600 DMIPS)
- RF (WiFi/Bluetooth): antenna switch, balun, výstupní zesilovač, vstupní zesilovač (LNA), filtry, AGC
- 448 KB ROM, 520 KB SRAM, QSPI flash/SRAM až 4 x 16 MB
- Low-power koprocesor
- 12-bit SAR ADC (18 kanálů)
- 2 x 8-bit DAC
- 10 x kapacitní dotykový interface
- Teplotní senzor
- Hallův senzor
- 4 x SPI, 2 x I2S, 2 x I2C, 3 x UART, 1 x host (SD/eMMC/SDIO), 1 x slave (SDIO/SPI), Ethernet MAC interface, CAN 2.0, IR, PWM, low-noise analogový předzesilovač
- HW akcelerované kryptografické funkce (AES, SHA-2, RSA, ECC, generátor náhodných čísel)

Na trhu jsou k dispozici moduly s integrovaným obvodem ESP32, flash pamětí a pasivními komponentami potřebnými pro správnou funkci ESP32. Ty mimo jiné zahrnují filtrační kondenzátory, pull-up a pull-down rezistory a impedanční přizpůsobení mezi integrovaným obvodem a anténou ve formě π - článku. K dispozici jsou moduly s PIFA anténou na PCB i moduly s U.FL konektorem, umožňující připojit externí anténu.

Výběr modulu

Použit byl modul ESP-WROOM32 s integrovanou anténou na PCB. Důvodem výběru byla přítomnost dokumentace pro tento modul, možnost zakoupení vývojového kitu obsahujícího tento modul a také skutečnost, že vše potřebné včetně antény je integrováno na modulu.

Požadavky a omezení

Senzor vyžaduje napájení 3,3 V. Špičkový odběr při inicializaci ESP32 může krátkodobě dosáhnout 500 mA. Napájecí zdroj musí být proto dostatečně tvrdý, aby při nárůstu proudu nedošlo k poklesu napětí pod specifikované limity (2,3 až 3.6 V). Další doporučení výrobce pro HW návrh jsou uvedeny v ESP32 Hardware Design Guidelines [33]. Mimo jiné je specifikována i doporučená orientace modulu (kvůli redukci vzájemného ovlivňování antény a ostatních zařízení na PCB).



Obrázek 23 Foto modulu ESP-WROOM32. Převzato z TME.eu

3.3 RF moduly

Komunikační rozhraní je jednou z kritických částí IoT zařízení. Právě komunikační zařízení totiž slouží k předávání dat do nadřazeného systému.

Zařízení má podporovat použití bezdrátové komunikace LoRa nebo IQRF. Obě tyto rádiové technologie pracují v nelicencovaných pásmech a jsou určené pro přenosy malých objemů dat. Obě jsou také zaměřeny na IoT (Internet of Things) zařízení.

V původním designu Ing. Skřivánka byl použit SIM slot kompatibilní s IQRF moduly. Tento koncept byl pro současnou verzi opuštěn, modul je přímo osazen na PCB. Ztrácí se tím sice flexibilita zařízení, nicméně při použití se neočekává nutnost změny druhu bezdrátové komunikace a hlavně odpadá nutnost designu PCB pro modul samotný. Některé moduly IQRF jsou kompatibilní se SIM slotem, což ale neplatí o LoRa modulech dostupných na trhu.

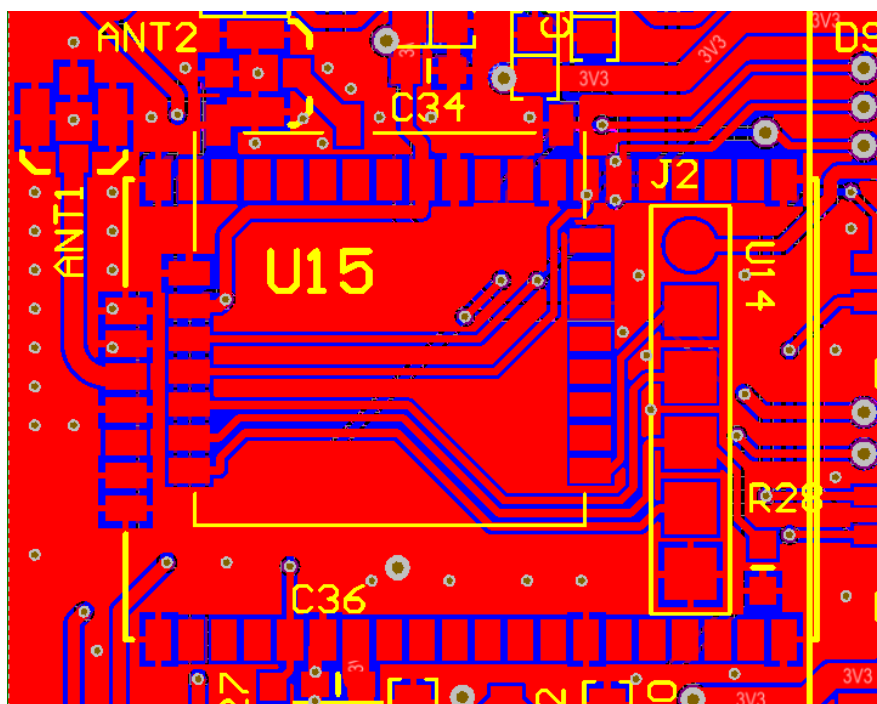
Footprinty (plocha na PCB, na kterou je modul osazen) obou modulů se překrývají, šetří se tedy plocha PCB. Osadit je možné buď LoRa nebo IQRF modul. Detail překrývajících se footprintů je na obrázku 24. U15 je IQRF modul a napravo od něj je jeho programovací konektor. Řada padů obklopujících modul a konektor ze tří stran je footprint LoRa modulu. Vlevo nahoře je pak vidět anténní konektor, jenž je k LoRa modulu připojen vedením.

3.3.1 LoRa modul

LoRa (zkratka pro Long-Range, v překladu “dlouhý dosah”) je bezdrátová komunikační technologie vyvinutá francouzskou firmou Cycleo. V roce 2012 byla firma Cycleo, včetně LoRa technologie, koupena firmou Semtech [34]. LoRa je primárně určena pro komunikaci na větší vzdálenosti. V případě městské zástavby je maximální dosah kolem 6 kilometrů, v otevřeném prostranství pak až 18 kilometrů [35]. Může tedy být použita i pro velké areály či pro zařízení umístěná v exteriéru.

Fyzická vrstva LoRa protokolu

LoRa pracuje na volných kmitočtových pásmech (v Evropě 868 MHz). Šířku pásma lze nastavit na 125, 250 či 500 kHz. Fyzická vrstva protokolu je uzavřená a její kompletní specifikace není k dispozici. Firma Semtech, které práva na intelektuální vlastnictví protokolu LoRa patří, je totiž též výrobcem čipů obsluhujících rádiové rozhraní LoRa modulů. Množství amatérských výzkumníků však provedlo různě úspěšné pokusy o reverzní inženýrství LoRa protokolu. Za zmínku stojí záznam přednášky z 24. DEF CON konference [36].



Obrázek 24 Detail překrývajících se footprintů RF modulů

Jakkoliv firma Semtech neposkytuje specifikaci fyzické vrstvy, je známo že LoRa pracuje na *chirp spread spectrum* modulaci. Použitím spread spectrum technik lze výkon RF signálu distribuovat do širšího frekvenčního pásma. To zvětšuje odolnost přenosu vůči úmyslnému či neúmyslnému rušení a multipath fadingu. Multipath fading je destruktivní interference signálu se sebou samým, způsobená vícecestným šířením v komplexním prostředí.

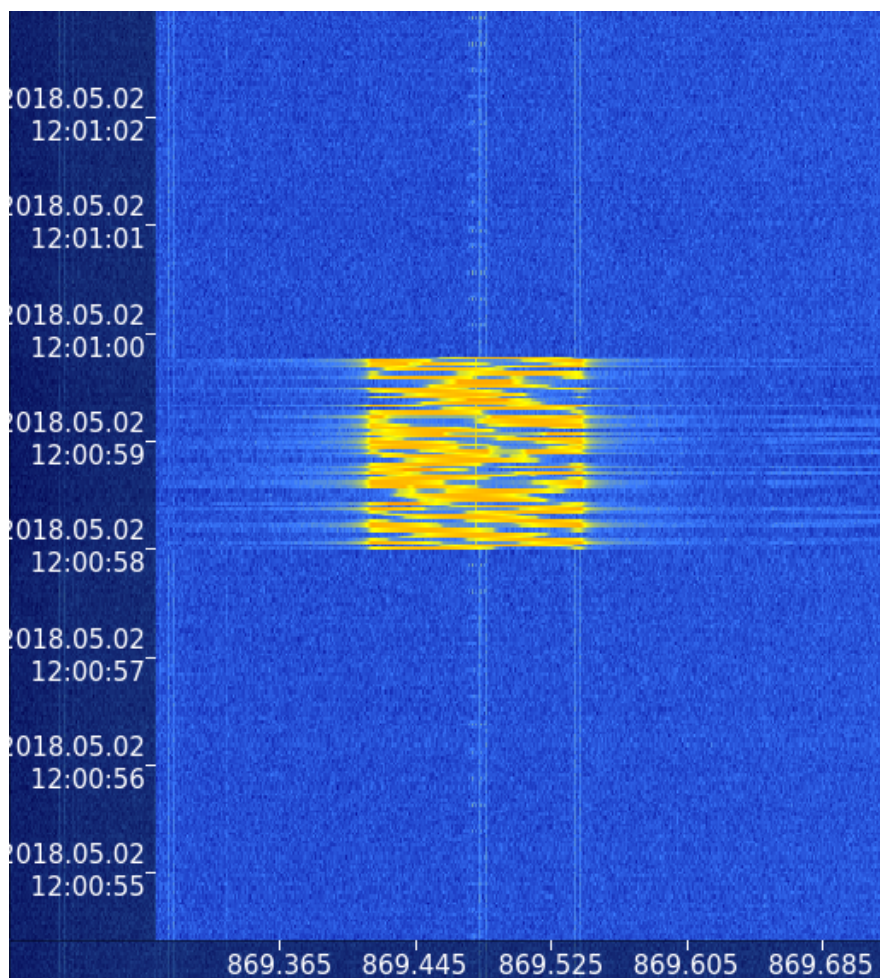
Na obrázku 25 je zobrazena jedna datová zpráva LoRa přenosu. Na horizontální ose je frekvence, na vertikální je čas (tzv. waterfall graf). Barva pak znamená intenzitu přijatého signálu. V datové zprávě je vidět opakující se pilovitý vzor. Jedná se o tzv. chirp. Ten je v podstatě tvořen pouze změnou frekvence v čase (ať už rostoucí nebo klesající). Pomocí těchto chirpů jsou pak kódovány symboly zprávy.

Záznam byl pořízen pomocí RTL-SDR přijímače a zobrazuje jednu zprávu vyslanou ze sensorové platformy.

Mezi další spread spectrum techniky patří FHSS (Frequency-hopping spread spectrum), DSSS (direct-sequence spread spectrum) a THSS (time-hopping spread spectrum). Kromě výše zmíněných předností přináší tyto metody ještě jednu výhodu, a to možnost utajení přenosu samotného. Toho však v případě LoRa technologie není využito.

Obecně se schopnost spread spectrum technik zlepšit příjem označuje jako *processing gain*, tedy zisk úrovně signálu dosažený jeho dodatečným zpracováním.

LoRa též umožňuje nastavení přenosové rychlosti. Při nižší přenosové rychlosti lze dosáhnout robustnějšího spojení na delší vzdálenosti, avšak odeslání zprávy trvá déle. Pro použití v mobilních aplikacích je pak zajímavý poznatek, že pro vyšší přenosové rychlosti není LoRa příliš odolná vůči Dopplerovu jevu [35]. Pro nižší přenosové rychlosti se tento problém však neprojevuje.



Obrázek 25 Záznam LoRa datového přenosu zaznamenaného pomocí RTL-SDR

LoRaWAN

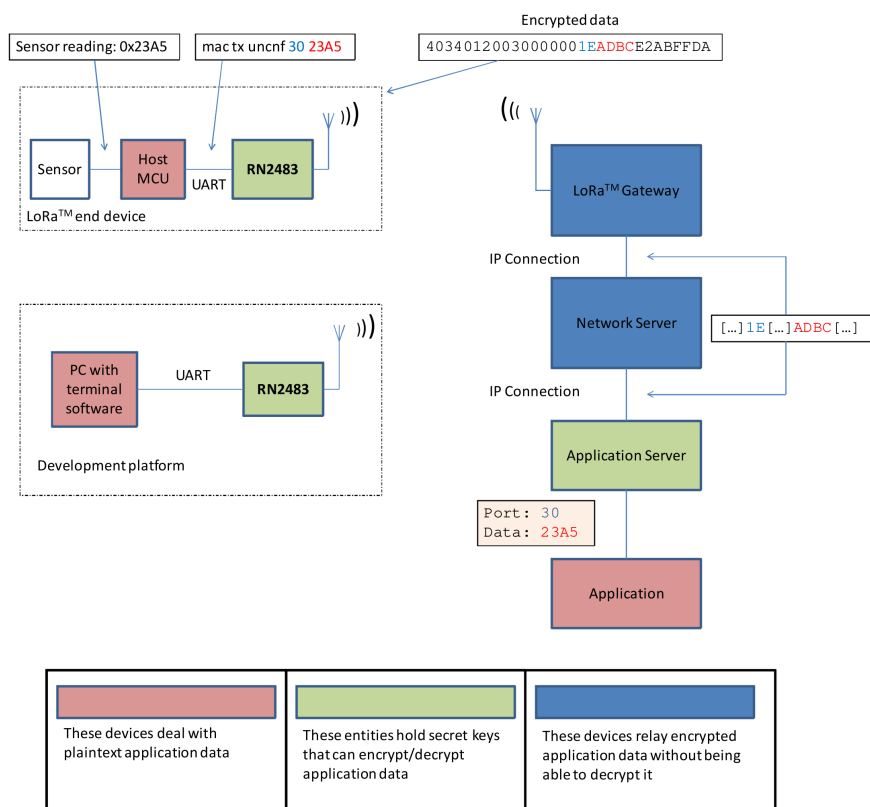
LoRaWAN je vyšší komunikační protokol pro LoRa technologii. Zatímco LoRa specifikuje především fyzickou vrstvu, LoRaWAN specifikace [37] se týká především MAC (media access control) vrstvy protokolu. Umožňuje na LoRa technologii postavit rozsáhlé sítě s množstvím zařízení.

Infrastruktura LoRaWAN a přenos dat

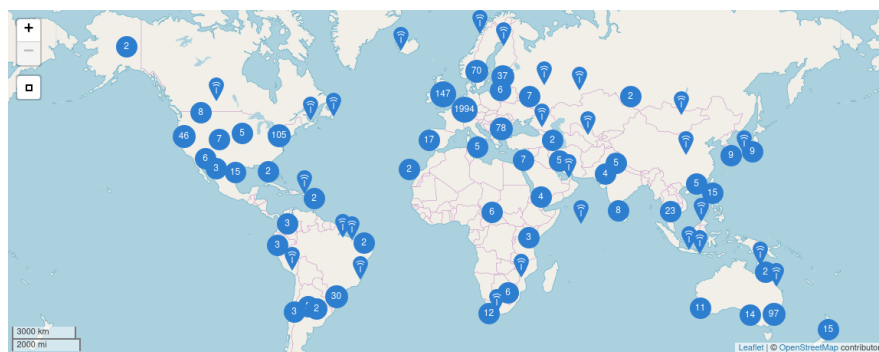
Existuje množství poskytovatelů LoRaWAN konektivity. Takový poskytovatel se stará o infrastrukturu sítě. Základním prvkem infrastruktury je *LoRa gateway*, což je prvek s LoRa rádiovým rozhraním a připojením k Internetu. Připojení může být uskutečněno jakoukoliv metodou - LTE mobilní síť, ethernet, WiFi a další. Gateway přímo komunikuje s LoRa zařízeními ve svém dosahu. Poskytovatel pak pomocí množství gateway zařízení pokrývá danou oblast.

Poskytovatelé mají různou kvalitu pokrytí. Existují jak komerční, tak komunitní LoRaWAN sítě. V České republice je jedním z hlavních komerčních poskytovatelů např. ČRA (České Radiokomunikace). Ve třetím kvartálu 2017 pokrývala síť většinu republiky [38]. Komunitní poskytovatel LoRa konektivity pak je např. TheThingsNetwork (TTN), který se skládá z mezinárodní komunity dobrovolníků, kteří udržují vlastní gateway a dávají ji k dispozici všem LoRa uživatelům, kteří jsou na TTN registrovaní. Použití

3 Výběr komponent



Obrázek 26 Schematické znázornění přenosu dat v síti LoRa. Zdroj: RN2483 command reference [40]

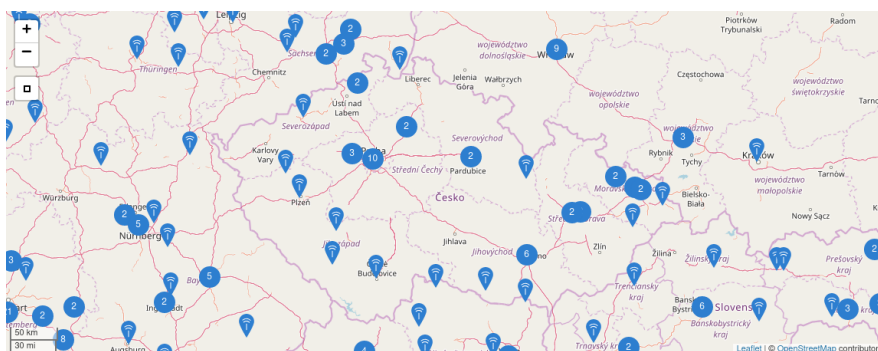


Obrázek 27 Mapa světa s vyznačenými gateway prvky sítě TheThingsNetwork. Zdroj: Web TheThingsNetwork [39]

TTN síť není zpoplatněno a využít ji může každý [39].

Na obrázku 27 je mapa světa s vyznačenými gateway prvky TTN sítě. Číslo v kroužku znamená množství prvků v dané oblasti, samotný symbol vysílače pak jedinou gateway. Na obrázku 28 je pak stejná mapa pouze pro oblast Česka.

Přenášená data jsou šifrována pomocí 128-bit AES šifry [37]. Cesta dat je schematicky znázorněna na obrázku 26. Je patrné, že data jsou po většinu cesty šifrována, a to jak při rádiovém přenosu, tak i při přenosu přes Internet.



Obrázek 28 Mapa Česka s vyznačenými gateway prvky sítě TheThingsNetwork. Zdroj: Web TheThingsNetwork [39]

Legislativa a podmínky provozu na volném pásmu

Zařízení vysílající na volném frekvenčním pásmu 868 MHz a 433 MHz spadají do kategorie zařízení krátkého dosahu (SRD - short range device). Vztahuje se na ně Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [41]. To je harmonizováno s legislativou ostatních evropských států dle doporučení ERC 70-03 [42].

LoRa technologie spadá dle terminologie daného oprávnění do klasifikace *h1*, pokud vysílá na 868 MHz, a do klasifikace *g*, resp. *g1* pokud vysílá na 433 MHz [41].

Kategorie *h1* se týká zařízení vysílající na frekvenci 863 - 870 MHz s širokopásmovou modulací jinou než FHSS. Na takové zařízení se vztahují následující omezení:

- efektivní vyzářený výkon (Effective Radiated Power, ERP) maximálně 25 mW (14 dBm)
- spektrální hustota výkonu 6,2 dBm / 100 kHz
- klíčovací poměr maximálně 0,1 procenta nebo použití technik přístupu ke spektru (LBT - Listen Before Talk)

Tato omezení jsou v následujícím textu blíže popsány.

Efektivní vyzářený výkon (ERP) je vypočten ze zisku dané antény a jejího vysílacího výkonu. Vyjadřuje vysílací výkon, jakým by musel být buzen půlvlnný dipól, aby vytvořil ve vzdálené oblasti stejnou výkonovou hustotu elektromagnetického pole jako daná anténa (ve směru maxima vyzařování). Situaci popisuje následující rovnice:

$$ERP = P_{TX} + G_{TX} + 2,15 \text{ dB} \quad (2)$$

Kde P_{TX} je vysílací výkon, G_{TX} je zisk antény (v maximu vyzařování) a 2,15 dB je zisk půlvlnného dipólu. Pokud tedy použijeme směrovou anténu (která má ze své definice velký zisk), je nutné snížit vysílací výkon, abychom splnili podmínku maximálního povoleného ERP 14 dBm.

Spektrální hustota výkonu určuje, jaký kumulativní výkon je dovolen na daném frekvenčním kanálu, popř. celém pásmu. V tomto případě tedy musí být integrál výkonu přes frekvenční rozsah 100 kHz menší než 6,2 dBm.

Klíčovací poměr (duty cycle) je podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá, v rámci jakékoliv jedné hodiny [41]. Určuje tedy, jak dlouho může zařízení vysílat v průběhu jedné hodiny. Této podmínce se dá vyhnout, pokud zařízení využívá techniku LBT (Listen Before Talk). Takové zařízení před zahájením vysílání ověří, zda je daný kanál je volný. Pokud je obsazen, může využít jiného kanálu či počkat na uvolnění kanálu.

K podmínkám klíčovacího poměru ale někteří poskytovatelé LoRaWAN sítí přidávají vlastní omezující podmínky. Například TTN má Fair Access Policy (tedy politiku rov-

ného přístupu), která uživatele zavazuje k omezení vysílacího času na 30 sekund za 24 hodin pro jedno zařízení [43].

Kategorie *g* a *g1* se týká zařízení vysílající na frekvenci 433 - 435 MHz [41]. Kategorie *g* má následující omezení:

- ERP maximálně 10 mW (10 dBm)
- klíčovací poměr maximálně 10 procent

V tomto případě není možno klíčovací poměr obejít pomocí technik LBT.

Kategorie *g1* pak má následující podmínky:

- ERP maximálně 1 mW (0 dBm)
- pro širokopásmové kanály o šířce větší než 250 kHz je spektrální hustota výkonu omezena na -13 dBm / 10 kHz

V tomto případě není klíčovací poměr omezen. Pokud zařízení vysílá s ERP větší než 0 dBm, spadá do kategorie *g*. V opačném případě spadá do kategorie *g1*.

Výběr modulu

Na trhu je množství LoRa transceiverů, a to jak ve formě samotných integrovaných obvodů (IC, integrated circuit) i hotových modulů. Použití integrovaného obvodu razantně zvyšuje čas nutný pro návrh sensorové platformy, avšak byl by zřejmě cenově výhodnější při velkém množství vyrobených kusů. Pro diagnostiku návrhu by však bylo potřeba vybavení, kterým laboratoř pracoviště nedisponovala, neboť není zařízena na návrh vysokofrekvenčních obvodů.

Zvolen byl proto hotový modul, který obsahuje jak již zmíněný integrovaný obvod, tak veškeré pasivní komponenty nutné pro správný chod zařízení (filtrovací kondenzátory, krystalové oscilátory, impedanční přizpůsobení k anténě a další). Pro návrháře je výhodou, že modul stačí pouze připájet na PCB a nevyžaduje krom anténního konektoru většinou žádné další komponenty. Další podstatnou výhodou je, že modul je již certifikován, a při přesném zachování výrobcem doporučeného zapojení není nutné výsledné zařízení re-certifikovat [44]. Některé moduly navíc mají EM (elektromagnetický) štít tvořený plechovým krytem modulu. To pak zlepší vlastnosti výsledného zařízení z hlediska EMC (elektromagnetické kompatibility).

Nevýhodou modulu pak bude jeho cena, která téměř jistě bude vyšší než cena všech potřebných komponent samotných. Pro nízkonákladovou výrobu to však ale není tak důležitý faktor, neboť je nutné započítat i cenu vývoje. Ta v případě použití hotového modulu bude znatelně nižší.

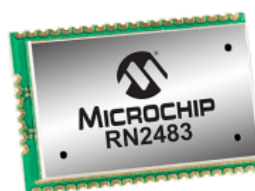
V době návrhu byly zvažovány dva moduly, a to Microchip RN2483 a HopeRF RFM95W. Důvodem byla předchozí zkušenost s oběma moduly. Zatímco RFM95W se skládá pouze z transceiveru a nutných pasivních komponent, RN2483 má navíc i mikrokontrolér, ve kterém je implementován LoRaWAN protokol. To znamená, že při použití modulu RFM95W by bylo nutné implementovat LoRaWAN protokol v hlavním mikrokontroléru platformy (ESP32). Open-source implementace LoRaWAN stacku je sice k dispozici od firmy Semtech [45], je však pouze pro STM mikrokontroléry a transceivery řady Semtech SX17xx. Její použití by tedy vyžadovalo přepsání velké části knihovny pro jinou platformu.

Modul RN2483 naproti tomu obsahuje proprietární implementaci LoRaWAN protokolu. Nadřazený mikrokontrolér pouze posílá příkazy pomocí sběrnice UART. Připojení k LoRa síti a odeslání zprávy je pak možné provést pouze zasláním několika příkazů.

Z důvodu úspory času byl použit modul Microchip RN2483. Cenově je méně příznivý, avšak jeho použití ušetří velké množství času při vývoji. Modul je na obrázku 29.

Napájecí napětí	2,1 - 3,6 VDC
Max. spotřeba (868 MHz, $P_{TX} = 14,1$ dBm)	38,9 mA
Frekvence	863 - 870 MHz a 433,05 - 434,79 MHz
Modulace	FSK, GFSK, LoRa
Citlivost (1% PER - Packet Error Rate)	-146 dBm
Maximální výkon na 433 MHz	10 dBm
Maximální výkon na 868 MHz	14 dBm
Komunikace	UART
Rozměry	17,8 x 26,7 x 3,34 mm (Š x D x V)
Cena (Mouser Electronics, 1 kus, 1.5.2018)	322,56 Kč

Tabulka 8 Parametry modulu RN2483. Zdroj: datasheet RN2483



Obrázek 29 Vizualizace modulu RN2483. Zdroj: Web společnosti Microchip

Základní parametry LoRa modulu Microchip RN2483 [44]

Požadavky a omezení

Modul vyžaduje napájení 3,3 V při proudovém odběru 40 mA. Poměrně velké rozměry modulu je nutné vzít v potaz při mechanickém návrhu. Dále je nutné vhodně umístit anténní konektor a k jeho připojení použít vedení s charakteristickou impedancí 50 Ω . Datasheet specifikuje parametry vedení. Je tedy možné využít výrobcem doporučených hodnot, pokud použijeme stejné materiály a tloušťky plošného spoje a měděných cest.

3.3.2 IQRF modul

IQRF je bezdrátová technologie české společnosti MICRORISC. Oproti síti LoRa je určená spíše pro komunikaci na kratší vzdálenost. Maximální vzdálenost pro komunikaci touto technologií v budovách jsou desítky metrů, ve volném prostoru pak stovky. Není však oproti LoRa technologii tak limitována množstvím přenesených dat.

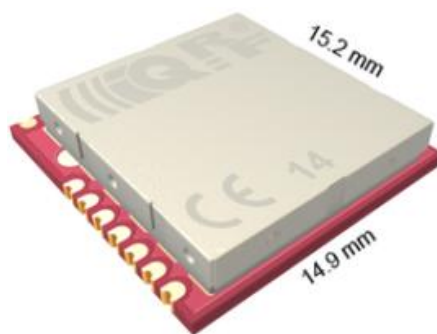
Fyzická vrstva IQRF protokolu

Pracuje na volných pásmech 868 MHz, 916 MHz a 433 MHz [46]. IQRF používá modulaci GFSK [47]. Oproti LoRa je IQRF úzkopásmové. Opět se jedná o proprietární protokol, bližší informace nejsou k dispozici.

IQRF přenáší data rychlostí 19,836 kb/s nebo 19,2 kb/s. Vysílací výkon je až 9 dBm.

Vyšší vrstvy IQRF protokolu

IQRF protokol se krom fyzické vrstvy skládá ještě z linkové a síťové. Tyto vyšší vrstvy podporují využití tzv. mesh sítí. V takové síti může být paket (zpráva) přenesen nejen



Obrázek 30 Vizualizace modulu TR76D. Zdroj: Web společnosti IQRF

Napájecí napětí	3,0 - 3,4 VDC
Max. spotřeba (868 MHz, $P_{TX} = 9$ dBm)	21,5 mA
Frekvence	868 MHz a 916 MHz
Modulace	GFSK
Citlivost	-104 dBm
Maximální výkon	9 dBm
Komunikace	UART, PWM, GPIO
Rozměry	14 x 15,2 mm (Š x D)
Cena (TME, 1 kus, 1.5.2018)	446,95 Kč

Tabulka 9 Parametry modulu TR-76D. Zdroj: datasheet TR-76D

přímou cestou ze zdrojového zařízení A do cílového zařízení B, ale i retranslací přes všechna zařízení po cestě. Takové štafetové přenosy paketů umožňují větší dosah celé sítě. Topologie mesh sítě také umožňuje spolehlivější přenos dat, neboť redundantní cesty zaručují přenos dat i při výpadku jednoho zařízení.

Výběr modulu

Jediným výrobcem modulů je společnost MICRORISC, resp. její dceřiná společnost IQRF Tech. V době psaní této práce je k dispozici několik variant modulů lišících se velikostí, způsobem připojení k nadřazenému systému a typem připojení antény. Pro účely této práce je nejvhodnější pájitelný modul, který má anténní vývod ve formě pinu. Na ten je možné připojit anténní konektor. Použití by tak bylo identické jako v případě LoRa modulu. Opět je také potřeba dodržet charakteristickou impedanci vedení ke konektoru (50Ω).

Ze sortimentu výrobce byl vybrán modul TR-76D. Vizualizace modulu je na obrázku 30.

Základní parametry modulu IQRF Tech TR-76D [47]

Požadavky a omezení

Modul vyžaduje napájecí napětí v rozmezí 3 až 3,4 V. Maximální spotřeba proudu je 21,5 mA [47]. Anténu (resp. anténní konektor) je potřeba k modulu připojit vedením o charakteristické impedanci 50Ω . Omezením při mechanickém návrhu bude velikost modulu a nutnost umístění antény a její připojení koaxiálním kabelem ke konektoru na PCB.

3.4 Další komponenty

Návrh sensorové platformy obsahuje oproti zadání několik součástí navíc:

- analogový výstup (0-10 V a proudová smyčka 4 - 20 mA)
- komunikační rozhraní ModBus RTU na RS-485
- komunikační rozhraní CIB (rozhraní pro komunikaci s PLC firmy Teco)
- polovodičové relé (SSR - Solid State Relay)
- LED výstup pro indikaci stavu ovzduší i diagnostiku zařízení
- příprava na připojení rezistivního dotykového displeje

Tyto komponenty jsou ve stručnosti probrány v následujících sekcích.

3.4.1 Analogový výstup

Přítomnost analogového výstupu mění požadavky na napájení. V případě použití tohoto rozhraní je potřeba, aby platforma měla k dispozici napájecí napětí větší než 10 V. Jednou možností by bylo využít step-up DC-DC měnič, který by zvyšoval napájecí napětí z 5 V na požadovanou úroveň. Takové řešení by však bylo zbytečně drahé a složité. Jako jednodušší se jeví zvýšit požadované vstupní napětí platformy a potřebná napětí pro všechny komponenty generovat buď lineárním regulátorem nebo spínaným zdrojem.

Často používaná hodnota napájení je 12 V. To by v tomto případě vyhovovalo, neboť proti požadovaným 10 V je zde rezerva. Pro případ proudové smyčky lze pak maximální zatěžovací (shunt) rezistor spočítat Ohmovým zákonem:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,02} \Omega = 600 \Omega \quad (3)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že napětí 12 V je schopno generovat požadovaný maximální proud (20 mA) na rezistoru o maximální hodnotě 600 Ω . To je dostačující, neboť obvyklá hodnota zatěžovacího rezistoru je 250 Ω nebo 500 Ω .

Analogový výstup pak bude generován mikrokontrolérem ve formě PWM signálu. Ten bude filtrován RC článkem a zesílen operačním zesilovačem. Vzorkování výstupního napětí na výstupním rezistoru pak zajistí zpětnou vazbu, díky které bude analogový výstup přesně řízen.

Výstup musí být vybaven přepětovou ochranou.

3.4.2 Komunikační rozhraní ModBus / RS-485

Komunikační protokol ModBus na sběrnici RS-485 je často využíván pro komunikaci s nadřazeným systémem MaR (měření a regulace). Proto je vhodné, aby sensor kvality ovzduší byl tímto rozhraním vybaven. Z hlediska HW návrhu stačí použít převodník úrovně pro RS-485. Použit byl Texas Instruments SN65HVD72, který vyžaduje vstupní napájení pouze 3,3 V.

Sběrnice musí být vybavena přepětovou ochranou.

3.4.3 Komunikační rozhraní CIB

CIB je proprietární komunikační sběrnice české společnosti Teco. Komunikuje probíhá na napájecí sběrnici o napětí 24 V. Komunikační signál je tedy superponován na napájecím napětí. To přináší komplikaci do návrhu platformy, neboť vodič napájení musí

být nejdřív přiveden na pin CIB modulu, a z jiného pinu tohoto modulu je pak odváděno napájecí napětí pro celé zařízení. Toto napájecí napětí je již “očištěno” od vyšších frekvenčních složek komunikačního signálu.

Modul CIB však nebude osazen na všech zařízeních, je proto nutné návrh provést modulárně. Na přemostění napájení v nepřítomnosti modulu lze využít propojky ve formě nulových rezistorů nebo tzv. solder bridge. Nulové rezistory jsou vhodné pro strojovou výrobu, na ruční pájení je pak zřejmě snazší použít solder bridge.

Důležité je, aby při použití CIB sběrnice nebyl na vodiči vstupního napětí (před CIB modulem) žádný kondenzátor. To by vytvořilo frekvenční filtr (dolní propust), která by mohla deformovat či úplně znemožnit komunikaci po sběrnici. Pro verze s CIB modulem tedy nesmí být vstupní kondenzátory osazeny.

3.4.4 Polovodičové relé (SSR - Solid State Relay)

Senzorová platforma bude vybavena signálovým relé. Polovodičové relé neumožňuje spínat takové proudy a napětí jako relé mechanické, bývá ovšem fyzicky menší a nemá takový odběr. Vybráno bylo relé Omron G3VM-61GR2. Toto SSR má galvanicky oddělenou část spínací a část spínanou. Oddělení je provedeno opticky. Typický proud LED (na spínací straně) je 10 mA při 1,33 V napájecího napětí. Minimální proud LED pro sepnutí je 3 mA. Maximální napětí na spínané straně je 60 V a maximální proud je 1,7 A.

Toto relé je možné rovnou spínat z MCU, je nutno však dodržet maximální dovolený proud z pinu mikrokontroléru. Na spínací straně relé je pak ještě vhodné přidat přepětovou ochranu a pojistku, která rozpojí obvod při zkratu.

3.4.5 LED výstup pro indikaci stavu ovzduší i diagnostiku zařízení

Pro rychlou kontrolu stavu kvality vnitřního ovzduší by bylo vhodné, aby zařízení bylo vybaveno LED indikátorem. To může zároveň sloužit jako diagnostický prvek. V případě poruchy zařízení či jiného stavu vyžadujícího intervenci uživatele lze takový stav indikovat např. blikáním určité frekvence a barvy.

Jako vhodné řešení se zdá použití RGB světelné diody řízené PWM signálem. To umožňuje zobrazit širokou škálu barev (omezenou pouze rozlišením PWM signálu). Takové řešení bude dostatečné pro vykreslení plynulého přechodu mezi barvami, což může být použito pro indikaci kvality ovzduší (např. plynulý přechod zelená - žlutá - červená). Vybraná LED je Multicomp 703-1028. Ta obsahuje v jednom čírem SMD pouzdře tři LED se společnou anodou - červená, modrá, zelená. Každá LED má odběr 20 mA.

Protože odběr těchto LED bude pravděpodobně vyšší než je dovolené proudové zatížení MCU pinu, je vhodné LED budit pomocí tranzistoru. Vybraný tranzistor je MOSFET NTZD3154N (N - kanál). Ten obsahuje v jednom pouzdře dva tranzistory. Pro řízení jedné RGB LED je tak potřeba dvou NTZD3154N.

3.4.6 Příprava na připojení rezistivního dotykového displeje

Elegantnější a více informativní alternativou k LED indikaci může být barevný displej. Ten může uživateli poskytnout přesnou informaci o stavu ovzduší, a stejně tak dobře může poskytnout informace o stavu zařízení. Možnost interakce pomocí dotykového displeje pak rozšiřuje možnosti zobrazení dat. Uživatel například může přepnout na zobrazení historického vývoje dané veličiny. Pokud bude zařízení připojeno na MaR

systém, připadala by v úvahu i možnost nastavování vzduchotechniky (např. teplota v místnosti).

Vybraný displej je MCT028D0TW240320PMLIPS. Je to 2.8" TFT (Thin Film Transistor) rezistivní dotykový displej. Jeho rozlišení je 240 x 320. Nabízí množství rozhraní pro komunikaci, z nichž se jako nejvhodnější pro tuto platformu jeví SPI. Displej má pro účely podsvícení zabudovaných šest LED o celkové spotřebě 120 mA při 3,3 V. Napájení logiky a budiče displeje též vyžaduje 3,3 V. Protože displej nahrazuje funkcionalitu LED, je možné tranzistory původně určené pro LED použít pro buzení podsvícení. Tím navíc přibude možnost softwarové regulace intenzity podsvícení displeje.

Pro vyčítání rezistivního dotykového rozhraní je nutné využít čtyři piny mikrokontroléru. Tyto piny musí být schopné vyčítat pomocí AD převodníku a zároveň mít GPIO funkcionalitu (tedy možnost na svůj výstup přepnout zem nebo napájecí napětí). Více o vyčítání rezistivních dotykových displejů lze najít např. v aplikační poznámce NXP AN10675 [48].

3.5 Požadavky komponent

V této sekci jsou stručně probrány celkové požadavky na platformu. Požadavky plynou z mechanických omezujících podmínek a příkonu jednotlivých komponent.

3.5.1 Komunikace s MCU

Pro komunikaci se senzory a výstupy bude použito PWM (LED, podsvícení, analogový výstup), I2C (senzory), SPI (displej), UART (senzor prachu, RF moduly). Ne všechny komponenty budou použity zároveň, při nedostatku volných pinů na MCU je tedy možné je multiplexovat, tedy použít jeden pin pro více komponent, které nebudou souběžně osazeny.

3.5.2 Napájení

Platforma bude navržena modulárně. Pro verzi bez analogového výstupu je možné použít napájecí napětí 5 V (např. pomocí micro USB konektoru). Pro verzi s analogovým výstupem je pak nutné použít napájecí napětí minimálně 12 V. Odběr zařízení na 3,3 V bude ve špičce překračovat 500 mA, je tedy vhodné dimenzovat zdroj na 1 A. Na 5 V bude odběr menší, tento zdroj využívá pouze NDIR senzor oxidu uhličitého a prachový senzor, jejichž celková spotřeba během měření by neměla přesahovat 150 mA. Přesto je však vhodné použít dostatečně tvrdý zdroj, protože senzor prachu obsahuje DC elektromotor (pro pohon větráku). Ten při rozběhu může krátkodobě razantně zvýšit odběr. Proto by bylo vhodné zdroj 5 V dimenzovat aspoň na 500 mA.

3.5.3 Mechanické omezení

Platforma bude obsahovat množství komponent, z nichž některé jsou poměrně velké. Je nutné je rozmístit tak, aby bylo vyhověno podmínkám minimálního tepelného ovlivňování, krabičkou mohl volně proudit vzduch a zároveň aby zařízení bylo co možná kompaktní. Dále je nutné přihlídnout k pravidlům kvalitního EMC návrhu, tedy např. minimalizovat délku vysokofrekvenčních signálů, správně navrhnout topologii napájení apod.

4 Návrh schéma

V této kapitole je probrán návrh schématu sensorové platformy. Představeno je blokové schéma, v následujících sekcích jsou pak rozebrány jednotlivé moduly platformy.

4.1 Blokové schéma

Na obrázku 31 je blokové schéma sensorové platformy. Ukazuje logická propojení mezi komponentami a jejich komunikační rozhraní. Ve schématu není zohledněno napájení.

Centrálním uzlem celé platformy je mikrokontrolér (MCU, Microcontroller Unit). Ten komunikuje se senzory a zpracovává vyčtená data. Ta pak může posílat pomocí bezdrátového rozhraní, a to buď pomocí WiFi (zabudované na mikrokontroléru) nebo LoRa/IQRF modulu. V obou případech je možnost obousměrné komunikace, t.j. server může posílat data na senzor a naopak. Toho by se dalo využít např. pro vzdálenou změnu nastavení. Data zaslaná na server je pak možno zobrazit např. ve webovém rozhraní. Díky tomu si může uživatel prohlédnout data, ať už se nachází kdekoliv.

Lokální výstupy pro uživatele pak jsou ve formě LED (jejichž barva indikuje stav ovzduší a sensorové platformy) nebo dotykového displeje. V případě displeje je též komunikace obousměrná; uživatel může se zařízením interagovat, měnit zobrazení dat, nastavení senzoru apod.

Konečně senzor také podporuje komunikaci po metalických sběrnících. Analogový výstup je volitelně 0-10 V nebo 4 - 20 mA (proudová smyčka). CIB modul pak umožňuje komunikaci po proprietární CIB sběrnici, která je podporována především českou firmou Teco, jež je výrobcem a distributorem PLC zařízení pro automatizaci budov.

Protokol ModBus/RS-485 je velmi rozšířený a hojně podporovaný. Proto je přítomen i na této sensorové platformě. Mnoho výrobců PLC ModBus podporuje, je proto vhodnou volbou pro komunikaci s generickým PLC. Existují i převodníky RS-485 do USB, díky kterým je pak možné data vyčítat i pomocí osobního počítače či embedded systému.

Posledním výstupem je pak SSR (solid-state relay), neboli polovodičové relé. To umožňuje sepnout kontakt např. v případě překročení přednastavené hodnoty oxidu uhličitého. Toho se dá využít pro jednoduchou regulaci vzduchotechniky. Relé je pouze signálové, nelze jím spínat spotřebiče s velkým odběrem.

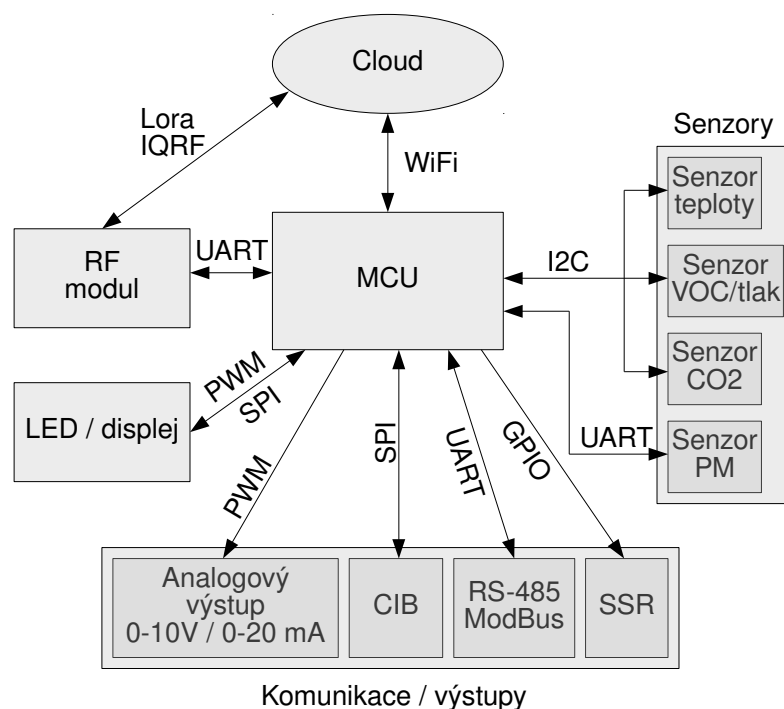
4.2 Napájení

Tato sekce se věnuje napájecímu systému, jeho návrhu, možnostem a omezením. Také jsou zde rozebrány možné konfigurace sensorové platformy z hlediska napájecí soustavy.

4.2.1 Definice problému

System napájení musí podporovat několik konfigurací:

- Napájecí napětí 5 V s MicroUSB konektorem (konfigurace senzoru bez analogového výstupu)
- Napájecí napětí větší než 12 V s 3,5 mm svorkovnicí



Obrázek 31 Blokové schéma sensorové platformy

- Napájení po CIB sběrnici; sběrnice připojena do 3,5 mm svorkovnice; 22 V výstup CIB modulu

Pro všechny tyto konfigurace musí existovat jediné PCB, kde bude možnost volby konfigurace pomocí solder bridge a propojek (nulových rezistorů).

Vstupní napájení je tedy 5 V, popř. 12 V či 22 V. Toto napětí je potřeba snížit na 5 V a 3,3 V (pro analogové výstupy je pak potřeba i 12 V). Odběr na těchto napětích je ale poměrně velký, spotřeba na 3,3 V bude nárazově přesahovat 500 mA. Spotřeba na 5 V může nárazově přesahovat 100 mA.

4.2.2 Typy step-down regulátorů

Z hlediska principu funkce lze step-down (snižující) regulátory rozdělit do dvou tříd.

Lineární regulátor

Lineární regulátor snižuje výstupní napětí pomocí úbytku na regulačním členu (transistor či jiný spínací prvek). Na regulačním členu tedy bude napětí rovno rozdílu mezi vstupním a výstupním napětím. To ovšem znamená, že pro velké proudy a rozdíly mezi napětím nebude tento typ regulátoru příliš efektivní. Např. v případě regulace 12 V na 3 V bude napěťový úbytek na regulátoru 9 V. Při proudu 1 A pak bude užitečný výkon 3 W, zatímco výkon mařený na regulátoru bude 9 W. Účinnost takového zdroje, daná podílem užitečného a celkového výkonu, pak bude pouze $\frac{3}{12} = 0.25$, tedy 25 procent.

Výhodou lineárního regulátoru je ovšem jeho cena a malé množství externích komponent. Oproti spínaným zdrojům také není zdrojem rušení, což je pro některé aplikace klíčové.

Spínaný zdroj

Ve step-down SMPS (switch-mode power supply) je tranzistorem spínáno vstupní napětí přes prvek induktivního charakteru (cívku) do zátěže. Přechodový jev na induktivním prvku zpomalí náběh napětí na výstupu. Jakmile napětí na výstupu dosáhne požadované hodnoty, je vstupní napětí vypnuto. V tu chvíli pak kolabující EM pole v cívce začne indukovat napětí, které má z hlediska zátěže stejnou polaritu jako původní zdroj. V tomto stavu se tedy jako zdroj chová cívka. Aby však smyčka obvodu byla kompletní, je potřeba přidat diodu (na obrázku 32 označena jako D4). V okamžiku, kdy se cívka chová jako zdroj napětí pak tato dioda uzavře smyčku zem - zátěž - cívka - dioda - zem.

Tento cyklus se periodicky opakuje a výstupní napětí osciluje kolem požadované hodnoty. Při použití filtračních kondenzátorů je pak tato oscilace (tzv. ripple) minimalizována. Kapacita filtračních kondenzátorů musí být zvolena s ohledem na proudový odběr a frekvenci spínání.

Vyšší efektivita SMPS oproti lineárnímu regulátoru je pak dána tím, že spínací prvek pracuje v režimu buď úplného otevření, nebo úplného zavření.

Na podobném principu pak funguje step-up (boost) SMPS, který ovšem napětí zvyšuje. To však v tomto designu není využito.

Protože v tomto případě bude odběr i rozdíl vstupního a výstupního napětí poměrně velký, je vhodnější použít spínaný zdroj.

4.2.3 Návrh regulátoru

Na obrázku 32 je zobrazeno schéma napájení. Komponenty byly vybrány s ohledem na specifikované minimální požadavky. Horní limit napájecího napětí je pak dán limity použitých komponent, zejména integrovaným obvodem spínaného zdroje (MCP16301). Ten má maximální vstupní napětí 30 V. Aby byla zachována dostatečná rezerva, bylo zvoleno maximální vstupní napětí 24 V. Na tuto hodnotu pak byly dimenzovány ostatní komponenty.

Konfigurace

Z hlediska napájení budou existovat tři konfigurace.

První konfigurace bude napájena z 5 V zdroje přes MicroUSB konektor. Nebude obsahovat analogový výstup 0 - 10 V a proudovou smyčku 4 - 20 mA, neboť pro napájení této periferie je potřeba minimálního napětí 12 V. To je však jediné omezení této verze. Pro použití této konfigurace je potřeba osadit nulový rezistor R5 a zároveň propojit solder bridge SB1. Solder bridge SB2 musí být rozpojen. V této verzi není nutné osazovat U6 a jeho přilehlé pasivní komponenty (celý blok označený přerušovanou čarou).

Druhá konfigurace bude napájena napětím 12 V. Pro vstup napájecího napětí bude použita svorkovnice o rozteči kontaktů 3,5 mm. Tato konfigurace není omezena z hlediska možných periferií. Pro použití této konfigurace je potřeba osadit nulový rezistor R5 a zároveň propojit solder bridge SB1 a SB2.

Třetí konfigurace je napájena pomocí CIB sběrnice. Pro připojení sběrnice bude použita stejná svorkovnice jako pro vstup napájení v konfiguraci 12 V. CIB konfigurace není z hlediska možných periferií nijak omezena, neboť výstupní napětí CIB modulu je 22 V. Pro použití této konfigurace musí být osazen CIB modul a zároveň nesmí být osazen nulový rezistor R5. Oba solder bridge SB1, SB2 musí být propojeny. Vstupní kondenzátory C13, C14 nesmí být osazeny; jejich přítomnost by narušila či znemožnila komunikaci po CIB sběrnici.

Rozbor schématu

Vstupní napětí je přivedeno na svorkovnici PS1 nebo MicroUSB konektory PS2 či PS6. Použit může být současně pouze jeden vstup napájení. V případě svorkovnice je napájecí systém chráněn proti přepólování Schottkyho diodou D1. Použití Schottkyho diody zajišťuje poměrně malý úbytek napětí na diodě (pro MBR0530T1G je to kolem 0,3 až 0,4 V [49]). V případě MicroUSB konektorů pak neočekáváme, že by mohlo dojít vinou uživatele k přepólování.

Přepětová a nadproudová ochrana Napájecí systém je chráněn pojistkou F1 a TVS (Transient Voltage Suppressor) diodou D3. Dioda zajišťuje ochranu proti přepětí, a to ať už ve formě statického výboje ESD nebo trvalého přepětí způsobeného nevhodným zdrojem napájecího napětí.

TVS dioda je typu P4SMAJ26A. Její stand-off napětí (napětí které dlouhodobě nepůsobí nedestruktivní průraz) je 26 V [50]. Toto napětí je tedy maximální napětí, při kterém bude napájecí systém ještě pracovat správně. Breakdown voltage je pak 28.9 V; při tomto napětí dojde v diodě k lavinovému průrazu a otevření diody. Maximální clamping voltage je pak maximální napětí, které na otevřené diodě být v případě reálné aplikace (velkých proudů protékajících diodou). Pro tuto diodu je maximální clamping napětí 42,1 V při 9,5 A. To sice překračuje absolutní maximum dovoleného napětí 40 V na spínaném zdroji MCP16301 [51], nicméně při proudu 10 A se použítá pojistka F0603E1R00FSTR přepálí během 10^{-4} s [52]. Přesná volt-ampérová charakteristika TVS diody není v datasheetu k dispozici, nicméně rezervy v parametrech komponent by měly být dostatečné.

Pojistka F0603E1R00FSTR je rychle reagující pojistkou dimenzovanou na 1 A. To by mělo zajistit správný chod i při maximálním nárazovém odběru (pod 1 A na 3,3 V a 100 mA na 5 V). Tento proud je zároveň ale dostatečně malý, aby v případě zkratu pojistka zareagovala dostatečně rychle a předešla tak případnému nebezpečí požáru.

Ve většině případů by tedy při přepětí měl být ochráněn jak integrovaný obvod spínaného zdroje, tak i veškeré komponenty jím napájené. Elektrostatické výboje (ESD) by měla pojmut TVS dioda samotná bez přepálení pojistky. Dlouhodobé nízké přepětí pak způsobí přepálení pojistky bez poškození TVS diody.

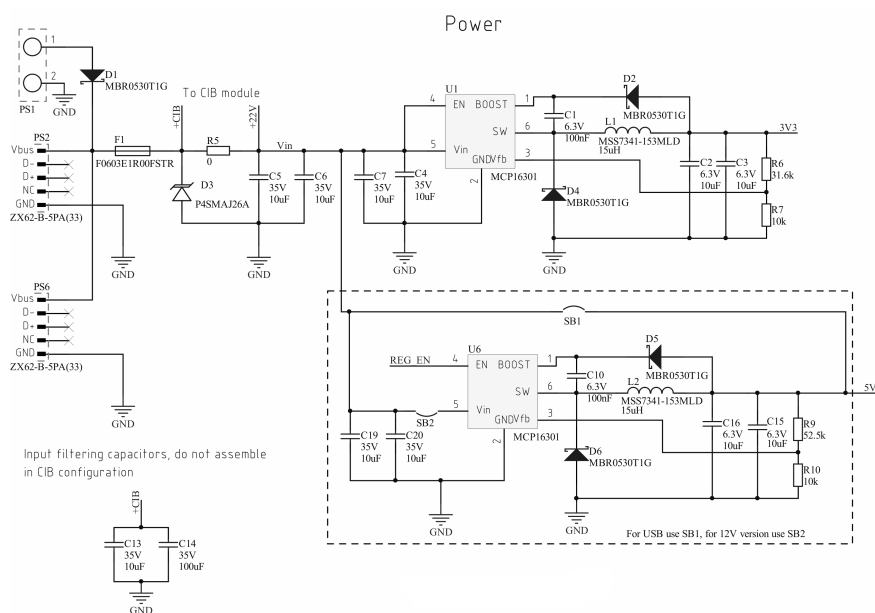
Fyzické umístění pojistky a TVS diody je zvoleno tak, aby bylo co nejbliž vstupu napájecího napětí. Minimalizací délky měděné cesty před ochrannými prvky se dosáhne minimalizaci indukčnosti. Ta by zpomalila náběh napětí a prodloužila čas, po který jsou komponenty za ochrannými prvky vystaveny přepětí.

Vstupní kapacita Za ochrannými prvky je osazeno několik kondenzátorů. Jejich úkolem je vyhladit vstupní napětí a filtrovat rušení z externího zdroje. Jeden kondenzátor je elektrolytický o kapacitě minimálně 100 uF a sedm je keramických o kapacitách 10 uF. Použitím většího množství různých typů kondenzátorů dosáhneme jednak větší kapacity a jednak menšího sériového odporu kondenzátoru (ESR - equivalent series resistor).

Elektrolytický kondenzátor C14 a jeden z keramických kondenzátorů (C13) je připojen na vstup ještě před rezistor R5. Tyto kondenzátory nesmí být osazeny, pokud je použita CIB sběrnice. Fyzické umístění těchto kondenzátorů je hned za ochrannými prvky.

Kondenzátory C5 a C6 jsou osazeny na cestě ke spínaným regulátorům. Kondenzátory C7 a C4 jsou osazeny co nejbliž integrovanému obvodu U1. Kondenzátory C19 a C20 jsou pak osazeny co nejbliž integrovanému obvodu U6.

4 Návrh schéma



Obrázek 32 Schéma napájení

Celková kapacita vstupu (při zavřeném výstupním budiči spínaných zdrojů) je 170 uF. Pro konfiguraci s CIB je pak vstupní kapacita před CIB modulem blízká nule (pouze parazitní kapacity). Za modulem je pak 60 uF.

Integrovaný obvod spínaného zdroje Použito je zapojení doporučené pro maximální efektivitu zdroje (z datasheetu MCP16301 [51]). Cívka L1 vykazuje velmi malý sériový odpor a je schopna trvale snášet proudy vyšší než 1 A.

Je však důležité si uvědomit, že dioda D4 též nese plnou proudovou zátěž výstupu, a je jí tedy nutné dle toho dimenzovat. Dioda MBR0530T1G byla použita proto, že byla přítomna v designu Ing. Skřivánka; její maximální trvalý odběr je 0,5 A, nárazový až 5,5 A [49]. Je tedy operována na hranici dovoleného zatížení. Jakkoliv nebyly pozorovány problémy s diodou, pro další verzi této platformy by bylo vhodné zvážit použití Schottkyho diody s větší proudovou zatížitelností. Dioda MBR0530T1G byla také použita pro ochranu proti přepólování na vstupu, čímž se snížil počet různých typů komponent na sensorové platformě.

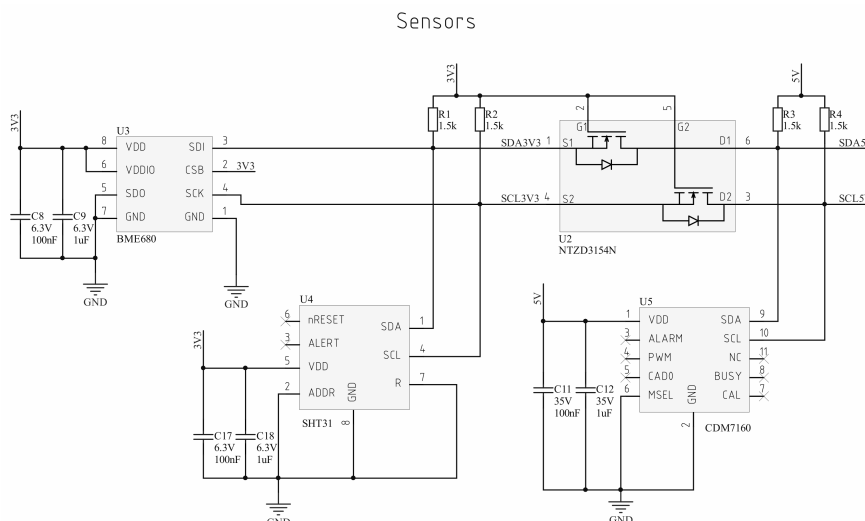
Na výstupu integrovaného obvodu jsou osazeny dva keramické kondenzátory o kapacitě 10 uF. Ty mají za úkol vyhlazovat výstupní napětí obvodu.

Rezistory R6 a R7 pak fungují jako napěťový dělič pro zpětnou vazbu. Změnou poměru jejich hodnot lze nastavovat výstupní napětí spínaného zdroje. Použité hodnoty byly převzaty z datasheetu MCP16301.

4.3 Senzory

V této sekci je rozebráno zapojení senzorů včetně komunikační sběrnice. Schéma zapojení senzorů je na obrázku 33. Schéma samotné obsahuje pouze několik částí:

senzory, jejich blokovací kondenzátory (vždy 100 nF a 1 uF), pull-up rezistory I2C sběrnice



Obrázek 33 Schéma senzorů

4.3.1 Převodník úrovní I2C sběrnice

V designu senzorové platformy jsou využity senzory pracující s různými napájecími napětími: senzory BME680 a SHT31 používají 3,3 V, zatímco sensor CDM7160 vyžaduje 5 V.

Pro CDM7160 je minimální úroveň napětí, která je brána jako logická jednička, 70 procent napájecího napětí [53]. To odpovídá 3,5 V. Není tedy možné jej provozovat na 3,3 V I2C sběrnici. Obdobně nelze sensor BME680 nelze provozovat na 5 V I2C sběrnici, neboť maximální napětí na kterémkoliv pinu je 4,25 V [24]. Tyto senzory tedy nelze zároveň přímo připojit na jednu komunikační sběrnici. Samotný mikrokontrolér též není kompatibilní s 5 V logikou.

Je tedy nutné využít převodníku napěťových úrovní pro I2C sběrnici. Elegantní řešení je využít jednoduchého zapojení s MOSFET tranzistorem, který obstarává funkci převodníku. Funkce tohoto zapojení je popsána v aplikační poznámce AN10441 od firmy NXP [54].

Toto zapojení je též vidět na obrázku 33. Využit je opět MOSFET typu NTZD3154N. Funkce zapojení je principiálně jednoduchá. Pokud je sběrnice na straně nižšího napětí (SDA3V3, SCL3V3) stažena na nízký potenciál (0 V), vznikne mezi piny gate a source tranzistoru rozdíl potenciálů 3,3 V. To je dostatečné napětí k otevření tranzistoru. Tím je k nulovému potenciálu stažena i strana vyššího napětí (SDA5V, SCL5V).

Pokud je sběrnice stažena k nulovému potenciálu na straně vyššího napětí (SDA5V, SCL5V), vznikne mezi piny source a drain N-MOSFET tranzistoru k rozdílu napětí $(5 - 3,3) \text{ V} = 1,7 \text{ V}$. Toto napětí je dostatečné k otevření diody, která je součástí tranzistoru. Tím je k nulovému potenciálu stažena i strana nižšího napětí (minus úbytek na diodě). Snížení napětí na SDA3V3 a SCL3V3 pak způsobí otevření tranzistoru, čímž je strana nižšího napětí stažena k nulovému potenciálu úplně.

4.3.2 Prachový senzor (UART)

Protože požadavek na použití prachového senzoru přišel až po dokončení návrhu a výroby prvních kusů, bylo nutné při jeho připojení improvizovat. K připojení senzoru je využít programovací konektor, který disponuje UART rozhraním.

4.4 Analogové výstupy

Platforma disponuje analogovým výstupem 0-10 V a proudovou smyčkou 4 - 20 mA. Oba tyto výstupy jsou realizovány jedním obvodem, a je tedy možno v jednom časovém okamžiku využívat pouze jeden z nich. Obvod je řízen z mikrokontroléru, je tedy možné analogovému výstupu přiřadit jakoukoliv z měřených hodnot.

Dalším analogovým výstupem je polovodičové signálové relé. Opět je ovládáno z mikrokontroléru, je tedy možné měnit jeho chování.

4.4.1 Výstup 0-10 V / 4 - 20 mA

Výstupní napětí i proud je lineární funkcí měřené veličiny. V případě výstupu 0 - 10 V může být např. koncentrace 400 ppm namapována na 0 V, koncentrace 5000 ppm na 10 V. Předpis funkce tedy může vypadat:

$$U_{\text{out}} = (C - 400) \cdot \frac{10}{C_{\text{max}} - 400} \text{ V} \quad (4)$$

Kde C je aktuální koncentrace, C_{max} je maximální koncentrace (např. 5000 ppm) a U_{out} je výstupní napětí. Pro proud by se pak použila obdobná lineární funkce.

Na obrázku 34 je schéma obvodu analogového výstupu. Tento obvod umožňuje generovat napěťový výstup 0 - 10 V nebo proudový výstup 4 - 20 mA (popř. jeho modifikaci 4 - 20 mA). Mikrokontrolér ESP32 sice disponuje DAC převodníkem, jenž by umožňoval přímo generovat výstupní analogové napětí, nicméně tento převodník má rozlišení pouze 8 bitů. To by znamenalo pouze 256 úrovní možného výstupu, což není dostatečně jemné. Další možností je řídit výstup PWM signálem, který je pak možno filtrovat a zesílit. PWM periferie na ESP32 má rozlišení 12 bitů, což by umožňovalo šestnáctkrát jemnější krok. PWM pracuje na frekvenci 5 kHz.

Celá analogová část má na vstupu svého napájení filtrační kondenzátory, které mají za úkol minimalizovat rušení z digitální části platformy.

Zesilovač

Operační zesilovač je přímo napájen ze vstupního napájecího napětí. Je nutné respektovat maximální vstupní napětí zesilovače, které je 32 V [55].

PWM výstup mikrokontroléru je přiveden na RC článek, který zde funguje jako filtr - dolní propust. Filtrovaný signál je pak přiveden na operační zesilovač v neinvertujícím zapojení. Zesílení pro DC (stejnoseměrnou složku signálu) je dáno:

$$G = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = 1 + \frac{R18}{R17} \quad (5)$$

Výstupní napětí ESP32 je 3,3 V. Toto napětí je potřeba zesílit na 12 V, což je minimální napájecí napětí platformy v konfiguraci s analogovým výstupem. Známe tedy požadovaný zisk:

$$G = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{12}{3,3} \doteq 3,636 \quad (6)$$

Volbou rezistoru $R18 = 10 \text{ k}\Omega$ a dosazením G a $R18$ do rovnice 5 získáme hodnotu druhého rezistoru $R17 \doteq 3,793 \text{ k}\Omega$. Volíme nejbližší rezistor z řady E12 [56], rezistor tedy bude mít hodnotu $R17 \doteq 3,9 \text{ k}\Omega$. Tím se zisk mírně sníží ($G \doteq 3,564$). To ale není na škodu, neboť operační zesilovače nejsou schopny dosáhnout na výstupu beze ztráty napájecího napětí. V případě napájení 12 V to znamená, že operační zesilovač není na svém výstupu schopen těchto 12 V dosáhnout.

Obvod neinvertujícího zesilovače ve své zpětné vazbě obsahuje kondenzátor C21. Ten pro nenulové frekvence funguje jako paralelní cesta k rezistoru R18; čím vyšší frekvence, tím nižší kapacitanci (odpor) vykazuje. Tím se efektivně mění poměr odporů zpětné vazby a dojde ke snížení zesílení (pro danou nenulovou frekvenci). Přítomnost kondenzátoru tedy způsobuje filtrování signálu a přispěje k potlačení vyšších frekvenčních složek PWM signálu.

Protože analogový výstup má reflektovat změny některé veličiny kvality vzduchu, neočekáváme že by se výstup měnil rychleji než v řádu sekund. Filtrování výstupu již od frekvencí desítek Hz nebude tedy mít nežádoucí vliv na výstupní signál.

Výstup zesilovače je přiveden na vstup napěťového sledovače. Jeho výstup je chráněn rezistorem o hodnotě 50Ω , který omezuje proud při zkratu. Přítomnost rezistoru by také měla zlepšit stabilitu operačního zesilovače v případě kapacitní zátěže. Dále je výstup chráněn TVS diodou (stejnou jako na vstupu napájecích obvodů). Maximální nedestruktivní napětí na pinech LM258 je 32 V [55], TVS dioda s breakdown voltage 26 V by jej tedy měla ochránit.

Zpětná vazba

Zpětná vazba z analogového obvodu je vyvedena za ochranným rezistorem a je přivedena na AD převodník mikrokontroléru. Pomocí této zpětné vazby je celý systém řízen. Návrhu firmware je nutno věnovat pozornost, neboť při nevhodně nastavených parametrech regulátoru by mohlo dojít k rozkmitání systému.

Maximální a minimální zatížení

Maximální výstupní proud operačního zesilovače LM258 je 60 mA [55]. Při 12 V výstupu to znamená, že pro všechny případy musí být součet rezistorů na výstupu minimálně $U/I = 12/0,06 \Omega = 200 \Omega$.

Výstup 0 - 10 V Limit velikosti zatěžovacího rezistoru je dán velikostí ochranného sériového rezistoru na výstupu. Ten je 50Ω . V případě maximálního výstupu musí být na zatěžovacím rezistoru úbytek napětí 10 V . Napájecí napětí je minimálně 12 V . Operační zesilovač LM258 je schopen maximálního výstupu $V_{cc+} - 1,5 \text{ V}$, tedy $10,5 \text{ V}$. To znamená, že na sériovém ochranném rezistoru bude úbytek $0,5 \text{ V}$. Zatěžovací odpor by tedy měl být aspoň 20x větší než ochranný, tedy 1000Ω . Pokud by tato hodnota byla nedostatečná, lze ji modifikovat zmenšením ochranného rezistoru nebo zvýšením napájecího napětí.

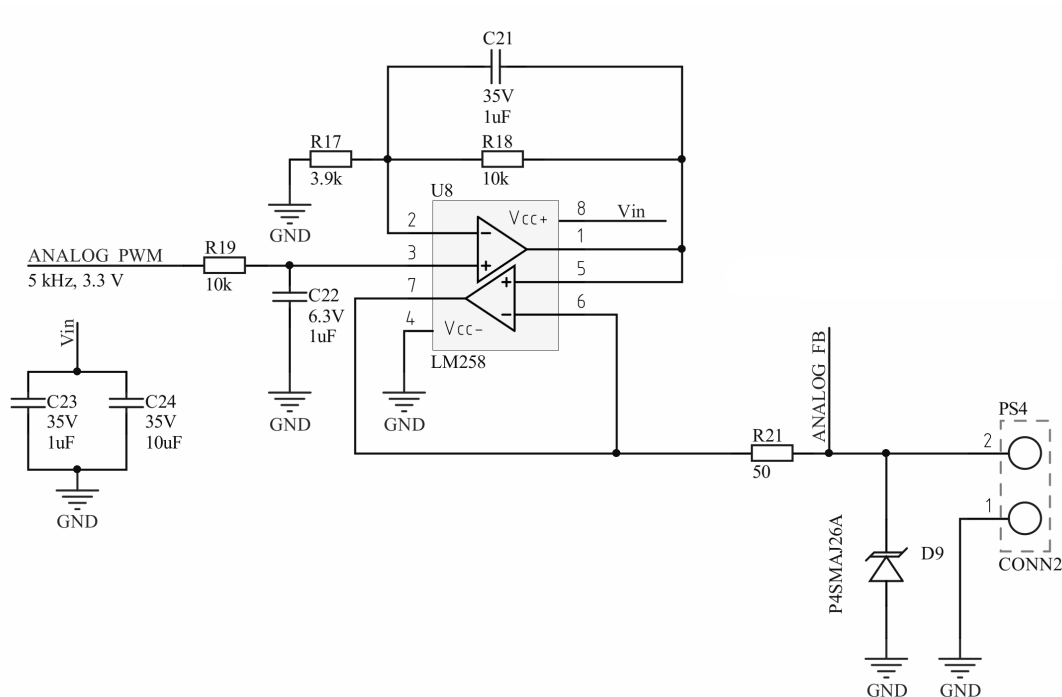
Výstup 4 - 20 mA Při maximálním výstupním napětí $10,5 \text{ V}$ lze generovat proud 20 mA maximálním odporem:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10,5}{0,02} \Omega = 525 \Omega \quad (7)$$

Tedy největší možný zatěžovací odpor je 525Ω . V této hodnotě je zahrnut i ochranný rezistor výstupu. Pokud by bylo potřeba tuto hodnotu zvýšit, lze tak učinit buď snížením odporu ochranného rezistoru, nebo zvýšením napájecího napětí.

RC článek

Na obrázku 36 je obvod analogového výstupu vymodelovaný v online simulátoru obvodů Falstad [57]. RC článek samotný je tvořen rezistorem 10k a kondenzátorem $1 \mu\text{F}$.



Obrázek 34 Schéma obvodu analogového výstupu 0 - 10 V / 4 - 20 mA

Vstupní signál je v simulaci reprezentován zdrojem obdélníkového signálu o frekvenci 5 kHz.

Frekvenční charakteristika ideálního nezatíženého RC članku s parametry $R = 10 \text{ k}\Omega$ a $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ je na obrázku 35. Vidíme, že cutoff frekvence (frekvence kde se charakteristika láme) je 10 Hz. Přenos članku na frekvenci 5 kHz je 0,003. Útlum základní frekvenční složky PWM signálu je tedy přibližně 25 dB. Další útlum je pak zajištěn kondenzátorem v neinvertujícím zesilovači.

Charakteristika je spočtena jako modul přenosu članku:

$$A = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{j\omega C} = j\omega CR \quad (8)$$

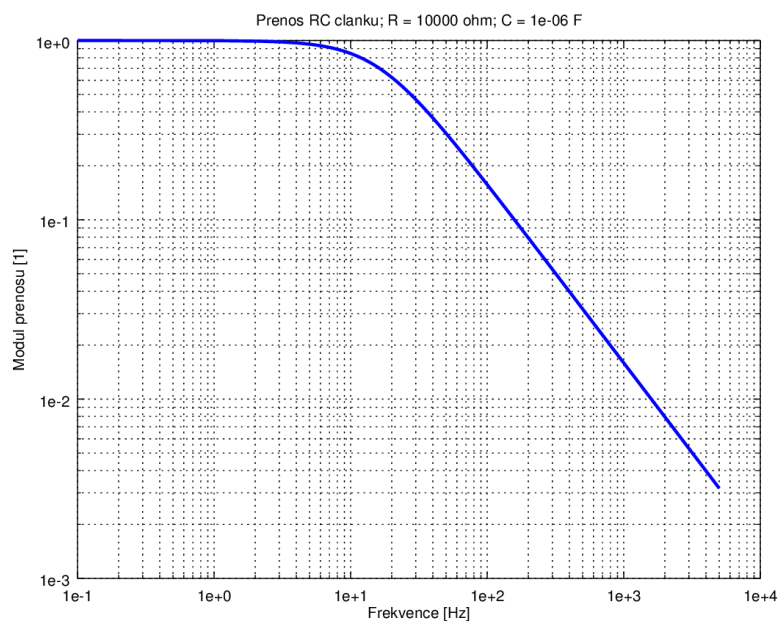
4.4.2 SSR (polovodičové relé)

Dalším analogovým výstupem je polovodičové signálové relé. Stejně jako výstup 0 - 10 V je řízeno z mikrokontroléru, je tedy možné vybrat veličinu spojenou s reléovým výstupem i nastavit limitní hodnotu, při které relé spíná. Je možné také implementovat hysterezi, která zamezí opakovanému spínání pokud je současná hodnota měřené veličiny blízko limitní hodnotě.

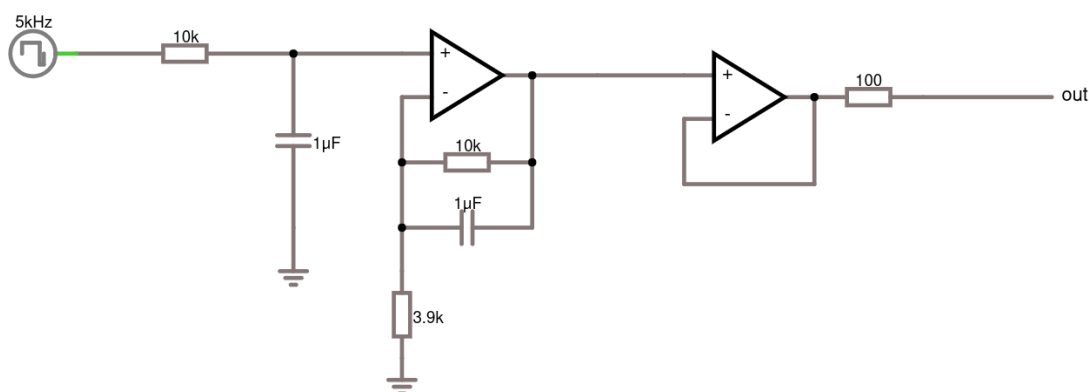
Vybráno bylo polovodičové relé, které oproti mechanickému relé má výhodu nižší spotřeby, menších rozměrů a větší životnosti (větší počet cyklů sepnutí). Nevýhodou pak je nižší dovolené spínané napětí a větší náchylnost na přepětí a ESD.

Na obrázku 37 je schéma zapojení polovodičového relé. To je proti nadproudu chráněno rychlou pojistkou 1 A (stejnou jako v vstupní pojistka napájení). Proti přepětí a ESD je relé chráněno dvěma proti sobě zapojenými TVS diodami. Obvod umožňuje spínat v obou polaritách.

TVS dioda ve svém propustném směru spíná již při napětí jednotek voltů. Je tedy potřeba použít dvě diody proti sobě zapojené. Tím zajistíme, že přepětová ochrana



Obrázek 35 Modul frekvenční charakteristiky RC članku



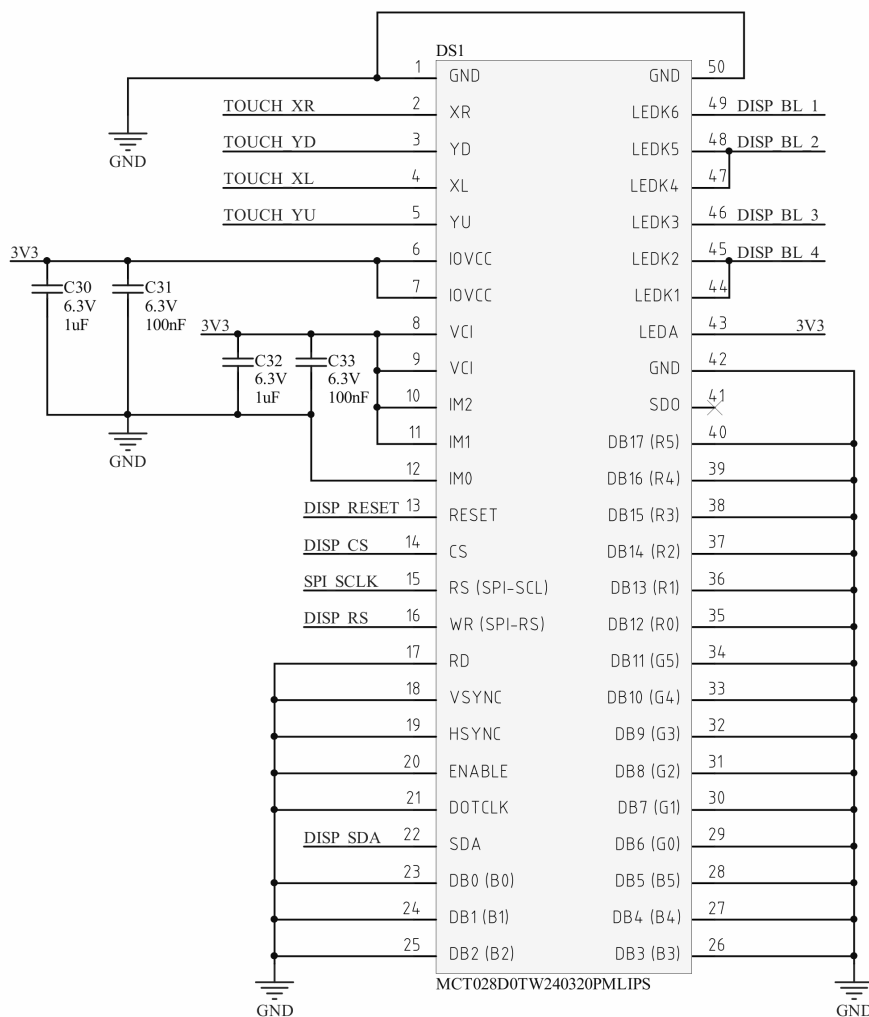
Obrázek 36 Schéma obvodu analogového výstupu simulovaného ve Falstad Circuit Simulator [57]

začne pracovat v obou polaritách při napětí rovnému součtu breakdown napětí a dopřednému napětí v propustném směru. Použitá TVS dioda je opět stejná jako v případě ochranných prvků napájecích obvodů.

4.5 Lokální výstupy pro uživatele

Pro komfort uživatele je důležité, aby mohl snadno zjistit stav kvality vnitřního ovzduší. Webové rozhraní může poskytnout detailní informace, nicméně vyžaduje od uživatele interakci s nějakým zařízením (mobilní telefon, tablet, osobní počítač). Lokální výstup na zařízení dává stručnou informaci, která je ale k dispozici na první pohled.

Lokálním výstupem pak může být displej na zařízení nebo v jednodušším případě barevná indikace stavu ovzduší, v nejjednodušším případě pouze indikátor červená - žlutá - zelená.



Obrázek 39 Schéma zapojení dotykového displeje

4.5.2 Dotyková obrazovka

Dalším lokálním výstupem může být barevný dotykový displej. Ten je náročnější na zapojení i řízení, nicméně oproti LED je mnohem informativnější. Také umožňuje interakci uživatele se zařízením.

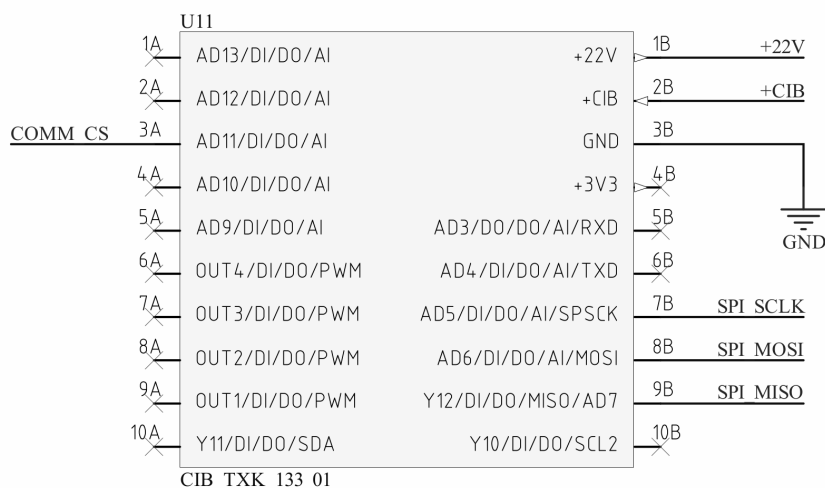
Vybraný displej je řízen pomocí SPI. Vstup z dotykové obrazovky je vyčítán analogově. Piny mikrokontroléru, které jsou připojeny k rezistivnímu dotykovému rozhraní, musí obsahovat AD převodník. Zároveň musí být schopny na svůj výstup sepnout zem nebo napájecí napětí.

Na obrázku 39 je schéma zapojení displeje. Konfigurace s displejem nemůže obsahovat LED, jednak z důvodů mechanických (displej kryje místo, kde jsou LED normálně osazeny), a jednak z důvodu nedostatku pinů na mikrokontroléru. Piny a tranzistory pro buzení LED jsou totiž využity pro buzení podsvícení displeje.

Displej byl zapojen dle doporučeného zapojení v datasheetu [59].

4.6 Metalické sběrnice

V této sekci jsou probrány metalické sběrnice, které zařízení podporuje.



Obrázek 40 Schéma zapojení CIB modulu

4.6.1 CIB

CIB (Common Installation Bus) je proprietární sběrnice firmy Teco. Použita je především pro jejich výrobky. Podporou této sběrnice lze snadno integrovat zařízení do systému s PLC tohoto výrobce.

Na obrázku 40 je schéma CIB modulu. CIB modul je přímo připojen na napájecí vodič, který pro CIB slouží zároveň jako datový. V konfiguraci s CIB modulem je tak napájení vedeno oklikou přes tento modul. Modul má výstup 22 V, který je veden do napájecích obvodů platformy. Komunikace mikrokontroléru s CIB modulem probíhá přes SPI sběrnici.

4.6.2 ModBus / RS-485

Protokol Modbus využívající fyzické vrstvy RS-485 je starší, ale stále velmi často používaný standard v oboru automatizace budov. Z hlediska návrhu HW je jeho implementace poměrně jednoduchá, sestává se pouze z RS-485 převodníku, jenž je připojen na UART. Je vhodné ještě ochránit vstup proti přepětí a ESD. Schéma tohoto zapojení je na obrázku 41.

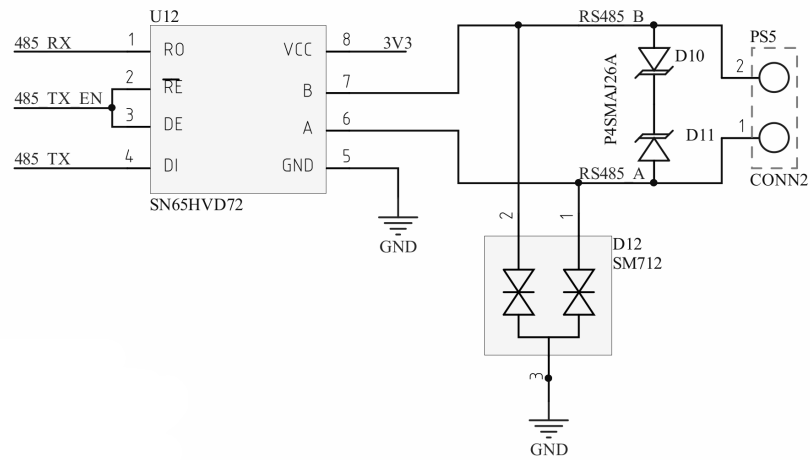
4.7 RF modul

Zapojení RF modulů je na obrázku 42. Vybrat lze pouze jeden typ modulu; nemohou být zároveň osazeny oba. Jejich footprinty (plocha na PCB) se totiž překrývají.

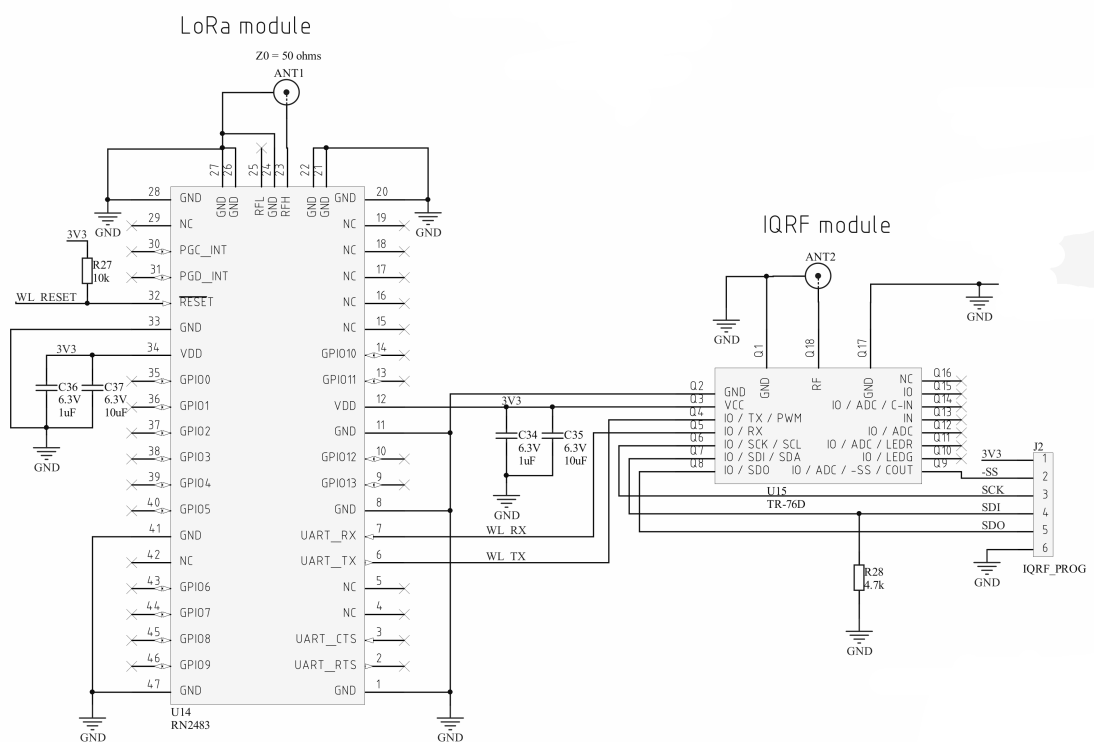
Oba moduly komunikují s mikrokontrolérem přes UART. Oba moduly jsou též opatřeny blokovacími kondenzátory.

4.7.1 LoRa modul

LoRa modul je připojen k U.FL anténnímu konektoru pomocí vedení o charakteristické impedanci 50 Ω. Pro návrh vedení byl použit doporučený design z datasheetu [44]. Anténa musí být umístěna tak, aby v se v jejím blízkém poli nevyskytovaly jiné objekty, zejména ne vodivé.



Obrázek 41 Schéma obvodu RS-485 budiče



Note: either LoRa or IQRF can be assembled; not both

Obrázek 42 Schéma zapojení RF modulů

4.7.2 IQRF modul

IQRF modul má programovací konektor, jehož pomocí lze modul programovat. K anténnímu konektoru U.FL je pak připojen vedením o stejných parametrech jako LoRa modul. Ačkoliv footprinty modulů jsou společné, vedení i anténní konektor jsou vedeny pro každý modul zvlášť. Využití jednoho vedení pro oba moduly by znamenalo, že by na vedení bylo slepé rameno, což by mohlo způsobit vznik stojatých vln na vedení. To by mělo negativní vliv na přenos výkonu mezi anténou a RF modulem. Podobné slepé nebo uzemněné ramena se využívají pro impedanční přizpůsobení. Zde by tento efekt nebyl žádoucí, ačkoliv při dané frekvenci a poměrně malých délkách vedení zřejmě tyto jevy nebudou dominantní.

4.7.3 Vlnová délka na vedení a charakteristická impedance

Při frekvenci 868 MHz je ve volném prostoru vlnová délka rovna:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{868 \cdot 10^6} \text{ m} \doteq 0.346 \text{ m} \quad (9)$$

Na vedení pak vlnová délka bude kratší kvůli nižší rychlosti šíření EM vlny, dané:

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (10)$$

kde ϵ_{eff} je efektivní permitivita. Ta je dána geometrickým uspořádáním a relativními permitivitami okolních materiálů. Efektivní permitivita vzduchu je blízká jedné; efektivní permitivita materiálu FR-4, který je pro nízkofrekvenční PCB často používán, se pohybuje kolem 4,4. Efektivní permitivita se pak bude pohybovat mezi těmito dvěma hodnotami.

Pokud by efektivní permitivita byla např. 4 (pro tento případ nepravděpodobně vysoká hodnota), bude vlnová délka na vedení rovna:

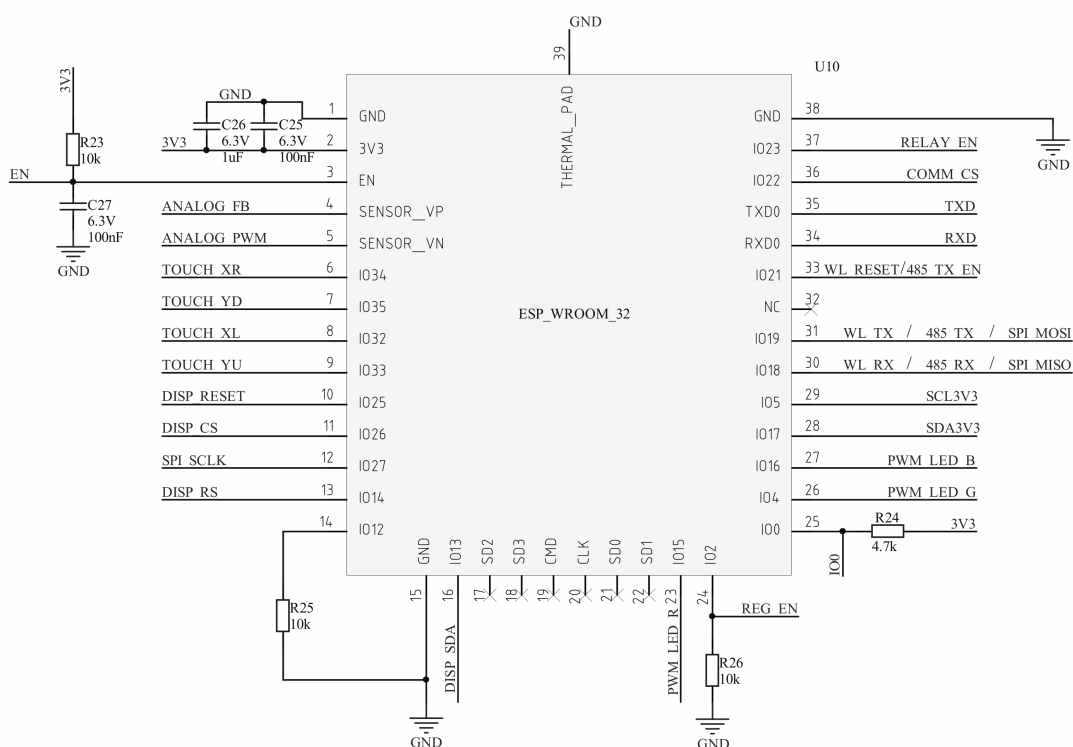
$$\lambda = \frac{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}}{f} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \cdot f} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{4} \cdot 868 \cdot 10^6} \text{ m} \doteq 0,172 \text{ m} \quad (11)$$

Empirické pravidlo říká, že pokud je délka vedení větší než 1/12 vlnové délky, je potřeba zohlednit efekty odrazů na rozhraní vedení a ostatních RF prvků. V tomto případě tedy můžeme odhadem říci, že pokud je délka vedení menší než jeden centimetr, není kritické řešit charakteristickou impedanci vedení.

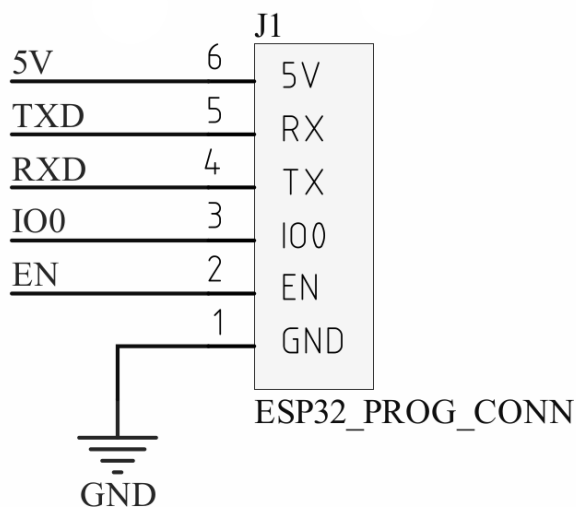
4.8 Mikrokontrolér

Schéma zapojení mikrokontroléru je na obrázku 43. Je zde vidět využití jednotlivých pinů MCU. Schéma obsahuje blokové kondenzátory, pull-up a pull-down rezistory a resetovací obvod u pinu EN (reset pin je u ESP32 nazván enable). Zapojení bylo provedené dle doporučeného zapojení datasheetu [32].

Jak je z obrázku patrné, v případě této platformy byly využity všechny piny, které modul ESP-WROOM-32 nabízí. Nezapojené piny 17 - 23 jsou interně využity pro komunikaci s flash pamětí.



Obrázek 43 Schéma zapojení MCU



Obrázek 44 Schéma zapojení programátoru

4.8.1 Programátor

ESP32 je programováno pomocí UART rozhraní. Programátor dále využívá piny IO0 a EN, kde EN funguje jako reset a IO0 je tzv. strapping pin, jehož logická úroveň po resetu určuje mód procesoru (programování nebo standardní režim). Pin 5V je zde pro připojení senzoru prachu, pro jehož komunikaci je využito rozhraní UART0, které je standardně vyhrazeno pro programování a komunikaci s debuggerem.

4.9 Celkové schéma

Kompletní schéma platformy je v příloze A.

5 Návrh plošného spoje

Tato kapitola se zabývá návrhem desky plošných spojů. Návrh byl proveden v software Altium 14. PCB bylo navrhováno jako dvouvrstvé. To je při relativně velkém množství komponent kompromis, který snížil cenu zařízení při zhoršení EMC vlastností.

Tvar PCB a rozmístění součástek bylo provedeno tak, aby vyhovovalo následujícím podmínkám (dle priority):

1. minimální tepelné ovlivňování senzoru teploty
2. vhodné umístění antén
3. dobré proudění vzduchu kolem senzorů
4. EMC

5.1 Minimální tepelné ovlivňování senzoru teploty

Metody přenosu tepla po PCB a jejich minimalizace jsou probrány v sekci 3.1.1. Primárním požadavkem je maximalizace délky trasy po PCB mezi senzorem teploty a zdroji tepla. To bylo provedeno pomocí frézování.

Na obrázku 45 je hotové PCB v konfiguraci s LoRa transceiverem, anténou a krabičkou. Senzor teploty je v pravém dolním rohu na samostatném “poloostrově”. V prvních verzích platformy byl senzor umístěn na spodní straně PCB. V dolním dílu krabičky je v pravém dolním rohu perforace, která zajišťuje dobrý přístup vnějšího vzduchu k senzoru. V následující verzi od tohoto bylo upuštěno, neboť umístění jediné součástky na spodní stranu PCB zvyšovalo cenu zařízení.

5.2 Vhodné umístění antén

V blízkém poli antén se nesmí vyskytovat vodivé objekty. V ideálním případě by se pak kolem antény neměly vyskytovat jakékoliv předměty; i plast krabičky může negativně ovlivnit vyzařování antény. Této podmínce však nelze vždy úplně vyhovět.

5.2.1 2,54 GHz anténa modulu ESP-WROOM-32

Dle ESP32 Hardware Design Guide [33] je ideální umístění ESP-WROOM-32 modulu na desce plošných spojů vpravo nahoře (horizontální orientace antény). Anténa modulu je tak umístěna mimo PCB samotné, a zároveň napájecí vstupy antény jsou blíže kraji PCB než jeho středu. Na obrázku 45 je vidět, že anténa modulu (vpravo nahoře) je skutečně umístěna mimo PCB platformy.

5.2.2 868 MHz externí anténa pro LoRa modul

Anténa je připojena U.FL koaxiálním konektorem. Ten je k LoRa modulu přiveden vedením o charakteristické impedanci 50Ω . Anténa je pak uchycena v krabičce tak, aby její vyzařovací část nebyla umístěna nad PCB platformy. Anténa je orientována v horizontální polarizaci.

5.3 Proudění vzduchu kolem senzorů

Snímací části senzorů CDM7160 a BME680 jsou umístěny ve spodní části krabičky přibližně v její vertikální ose. V blízkosti senzorů nejsou umístěny žádné velké komponenty, které by mohly bránit proudění vzduchu. Zároveň jsou senzory umístěny nad vyfrézovanou plochou.

5.4 EMC

Deska byla navržena jako dvouvrstvá. Horní vrstva je využita pro umístění součástek, signálové a napájecí cesty. Spodní vrstva byla primárně využita pro rozlitou zem. Kvůli velkému množství součástek je však na mnoha místech zem přerušena signálovými cestami, které nebylo možné vždy umístit na vrchní stranu.

5.4.1 Proudové smyčky

Původním záměrem bylo udržovat signálové cesty na spodní straně co nejkratší a pokud možno ve směru, kde nebudou narušovat návratové proudové smyčky signálových cest.

Pokud je na horní straně PCB signálová cesta, není vhodné pod ní na spodní straně přerušovat zem, protože tím se prodlouží cesta návratového proudu. Návratový proud putuje cestou nejmenší impedance; pro vyšší frekvence se po vylité zemi pohybuje přesně pod signálovou cestou na horní straně. Pokud je v tomto místě vylitá zem přerušena jinou cestou, návratový proud musí jít delší cestou. Tím se zvětší celková proudová smyčka a zhorší se EMC parametry obvodu.

Jedním z cílů kvalitního EMC návrhu je tedy minimalizace proudových smyček, a to jak na napájecích cestách, tak především na signálových. Čím vyšší frekvence, tím kritičtější je velikost proudových smyček.

Protože se však ukázalo poměrně obtížné realizovat schéma této platformy na dvouvrstvé desce, tyto pravidla byly často porušovány.

5.4.2 Blokovací kondenzátory

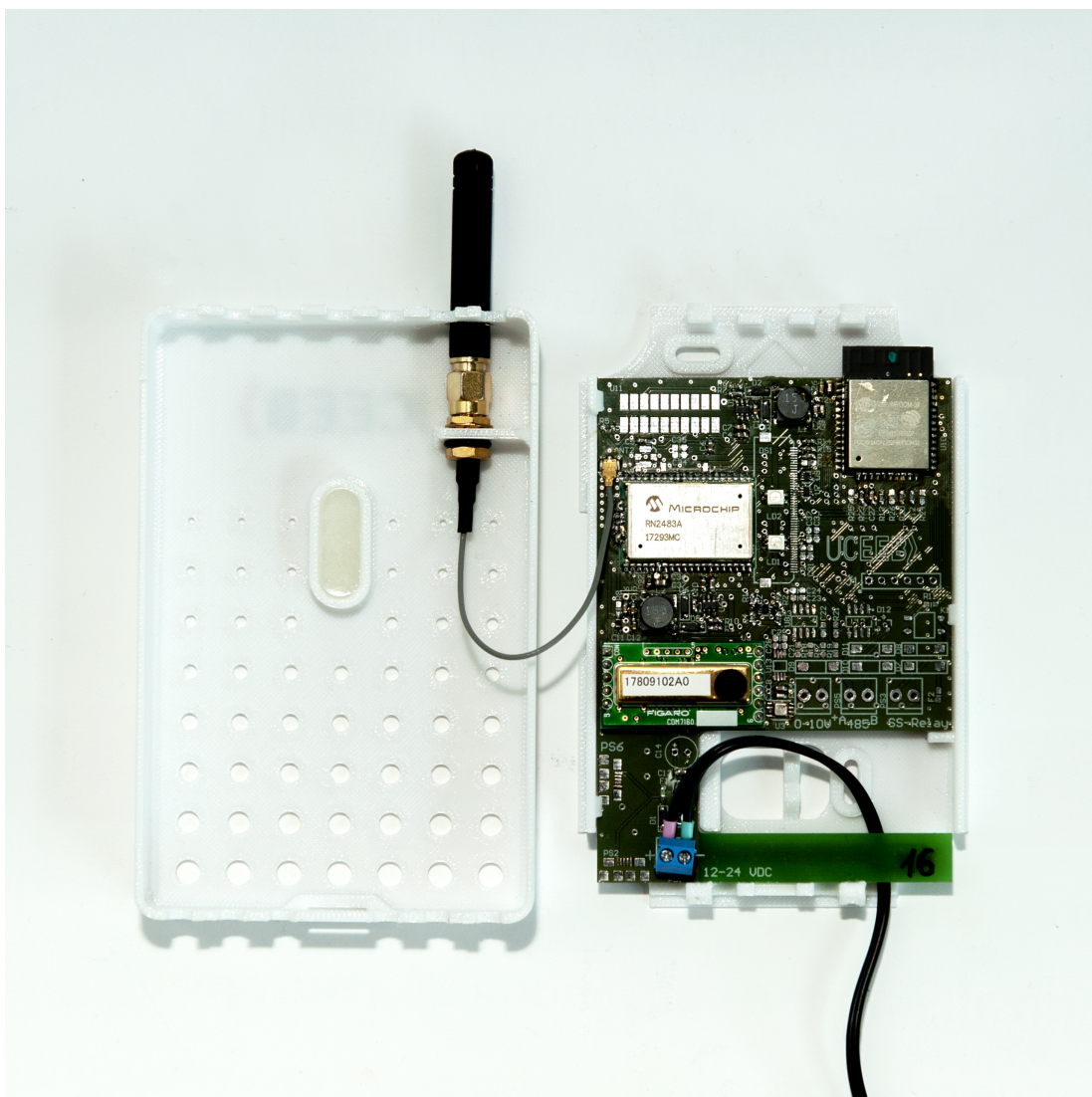
Zároveň je potřeba umísťovat blokovací kondenzátory blízko integrovaných obvodů. Tím zajistíme, že se proudové smyčky vyšších frekvencí uzavřou přes tyto kondenzátory, a neputují přes napájecí cesty až ke napájecím obvodům. V případě této platformy byly ke všem IC přidány dva blokovací kondenzátory, a to 100 nF a 1 μ F. Využití více různých druhů kondenzátorů má několik výhod:

- zvětšení kapacity
- snížení ESR (sériového odporu kondenzátoru)
- posun rezonance kondenzátoru k vyšším frekvencím

Rezonance kondenzátoru je způsobena parazitními parametry kondenzátoru a je nežádoucí.

5.4.3 Topologie napájení

Z hlediska minimalizace přenosu rušení mezi zařízeními je vhodné, aby napájení mělo topologii hvězdy, v jejímž středu jsou napájecí obvody. Ideálně by tedy mělo každé zařízení mít vlastní napájecí vodič, který vede rovnou ke zdroji. Není vhodné, aby na jedné napájecí cestě bylo za sebou více zařízení - jakýkoliv šum generovaný jedním zařízením by se pak přenesl rovnou do druhého.



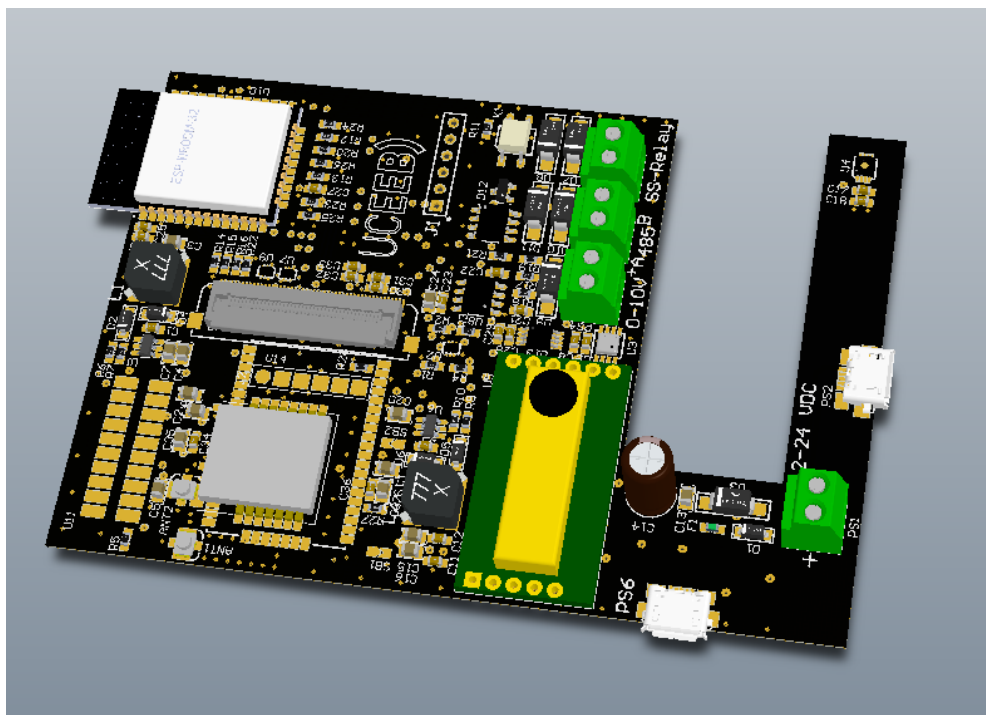
Obrázek 45 Fotka platformy v LoRa konfiguraci s krabičkou

5.5 Výsledné PCB

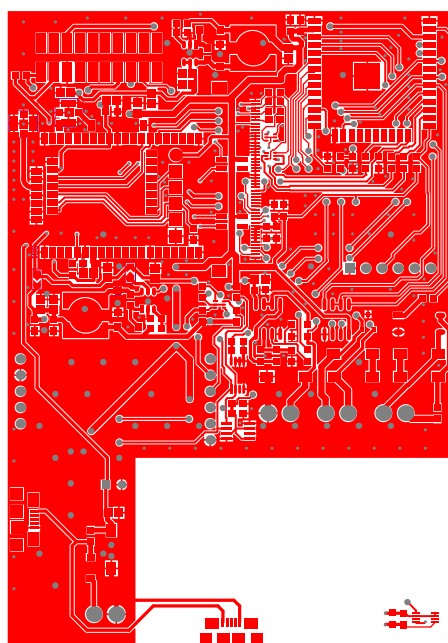
Horní (top) vrstva PCB je zobrazena na obrázku 47. Na této vrstvě jsou umístěny všechny komponenty, napájecí cesty a většina signálových. Volné plochy byly vylity mědí a dobře prokoveny k zemi na druhé vrstvě.

Na obrázku 48 je spodní vrstva. Zde byly signálové cesty využity pouze v případě potřeby. Kvůli množství součástek na horní straně je zde však signálových cest poměrně dost.

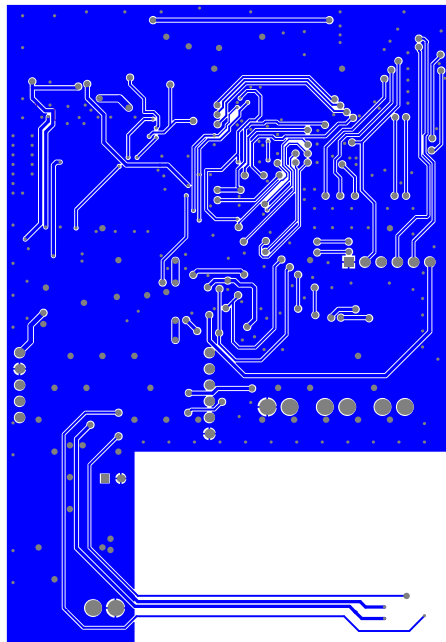
Na obrázku 49 jsou pak obě vrstvy přes sebe společně s potiskem (silkscreen). Vizualizace PCB provedená v programu Altium je pak na obrázku 46. Foto PCB s popisem komponent je na obrázku 50.



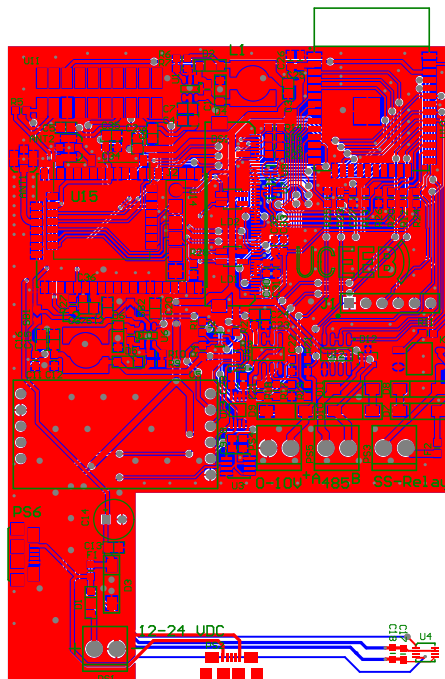
Obrázek 46 Vizualizace PCB provedená v programu Altium 14



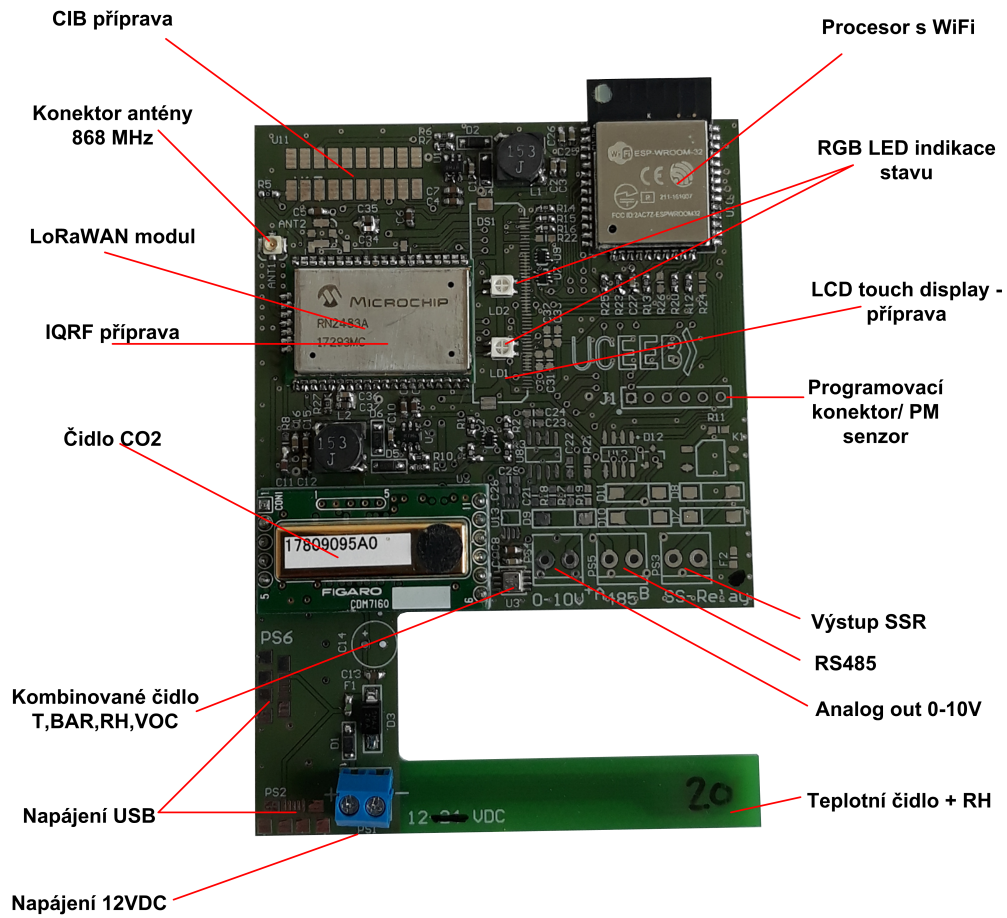
Obrázek 47 Vrstva top (vrchní vrstva mědi)



Obrázek 48 Vrstva bot (spodní vrstva mědi)



Obrázek 49 Vrstvy top, bot, silkscreen (potisk top vrstvy)



Obrázek 50 Foto PCB s popisem komponent. Autor: Ing. Jan Včelák, Ph.D.

6 Návrh krabičky

Návrh krabičky byl proveden v CAD software firmy Dassault Systèmes. Jednoduchý návrh byl proveden i pro předělanou verzi Ing. Skřivánka. Tato krabička je na obrázku 51.

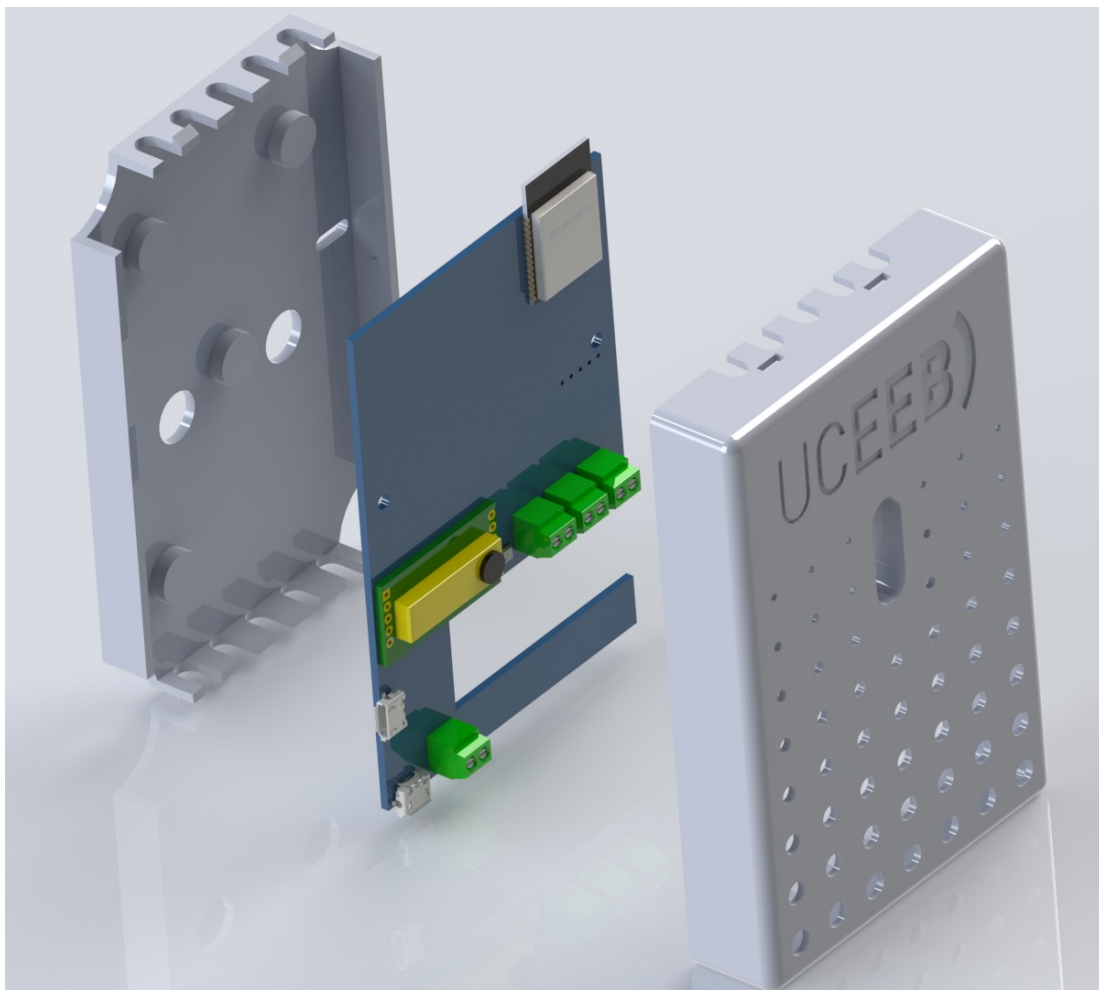
Pro současnou verzi pak byl proveden nový návrh krabičky. Její vizualizace je na obrázku 52. Krabička je silně perforovaná, aby bylo zajištěno větrání. Spodní a horní díl jsou k sobě mechanicky uchyceny bez nutnosti použití dalšího spojovacího materiálu. Horní díl krabičky má otvor pro indikační LED. Ten je dodatečně vyplněn průsvitným materiálem, který světlo rozptyluje natolik, že je celý otvor stejnoměrně osvětlen. Použit se dá např. lepidlo z tavné pistole (neutrální barvy) nebo průsvitný silikon. Pro výrobu větších sérií by pak bylo možno okno vyplnit průhledným plastovým dílem.

Krabička byla poté předělána Ing. Alešem Vodičkou. Tato verze je vhodná pro všechny možné konfigurace napájení a komunikačních periférií, tedy i tu s externí anténou. Krabička v konfiguraci s prachovým senzorem je na obrázku 53. Krabička v konfiguraci s displejem je na obrázku 54. Oproti starší verzi doznala mnoha vylepšení, mimo jiné lepší uchycení PCB, propracovanější design a vhodnější montážní otvory pro uchycení na stěnu. Rozměry krabičky jsou na obrázku 55.

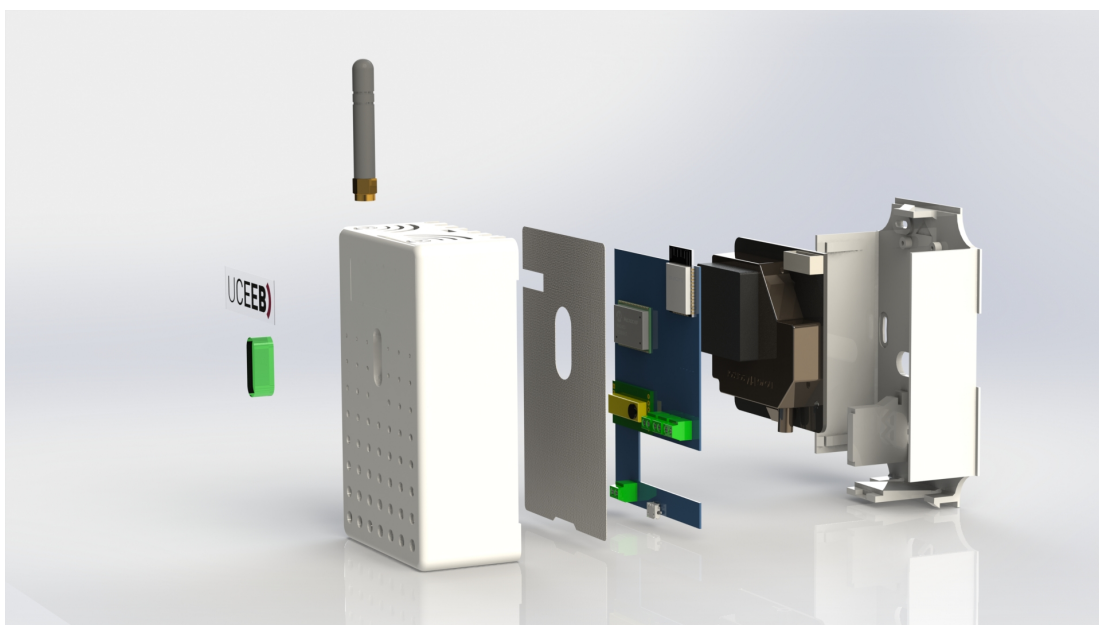
Všechny krabičky byly pro prototypovou výrobu tisknuty na 3D tiskárně Stratasys Fortus 400MC.



Obrázek 51 Návrh krabičky pro předělanou verzi Ing. Skřivánka



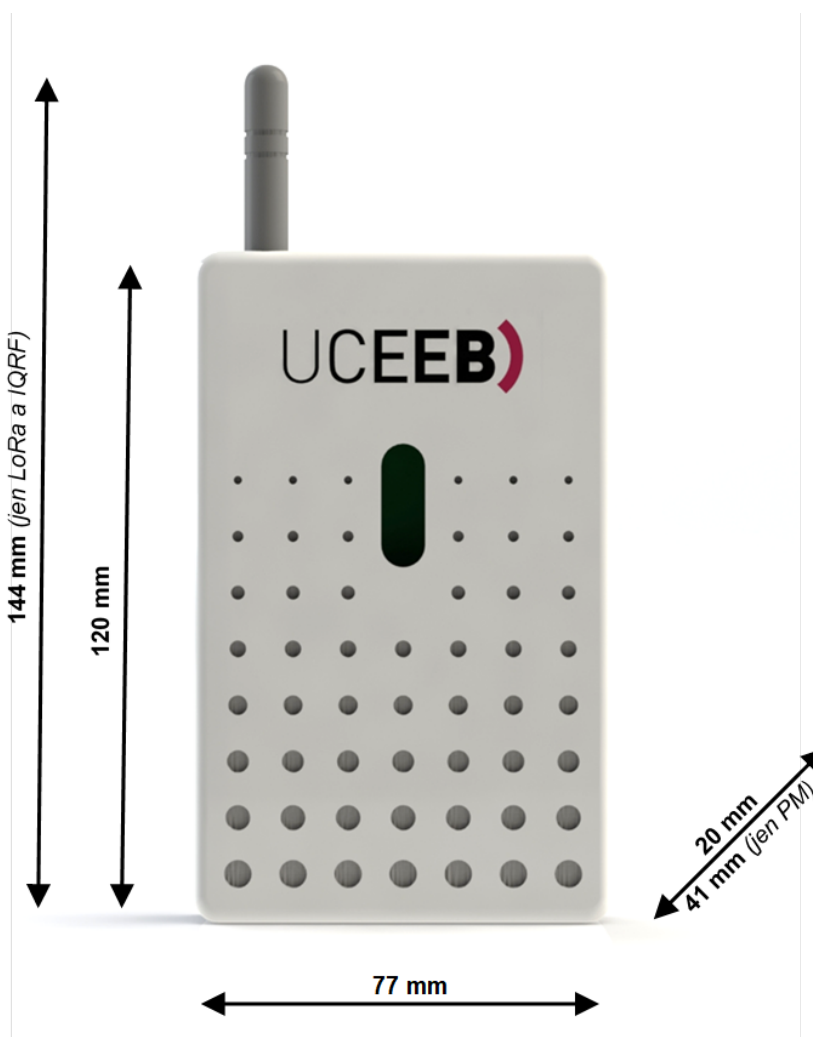
Obrázek 52 Původní návrh krabičky pro platformu



Obrázek 53 Návrh krabičky provedený Ing. Alešem Vodičkou, verze s prachovým senzorem



Obrázek 54 Návrh krabičky provedený Ing. Alešem Vodičkou, verze s displejem



Obrázek 55 Rozměry krabičky navržené Ing. Alešem Vodičkou

7 Firmware senzoru

V této sekci je probrán vývoj firmware platformy. Původní verze firmware se základní funkcionalitou byla prací autora, na dalším vývoji se podíleli Ing. Marek Maška a Rudolf Gavlas. Původní verze zahrnovala:

- vyčítání senzorů
- konfigurace senzoru a ukládání do non-volatile paměti
- práce s WiFi: AP mód pro konfiguraci a client mód pro připojení k síti
- webové rozhraní pro zobrazení dat
- zabezpečené webové rozhraní pro konfiguraci
- základní posílání dat přes MQTT ve formátu JSON
- základní obsluha LoRa modulu
- synchronizace času pomocí NTP (network time protocol)

Zatímco autor této práce byl zaneprázdněn dokumentací projektu, další vývoj vedli Marek Maška a Rudolf Gavlas. Jejich práce zahrnovala:

- opravení množství chyb
- vylepšení WiFi konektivity a ošetření chybových stavů
- výrazné vylepšení MQTT knihovny
- integrace Bosch knihovny pro pokročilou práci se senzorem BME680
- lepší organizace vláken programu
- celkové zkvalitnění kódu
- testování platformy v různých podmínkách

Probrán bude aktuální firmware v době psaní této práce.

7.1 Toolchain a nástroje

7.1.1 Framework

Firmware je psán v C ve frameworku ESP-IDF (Integrated Development Framework), který je poskytován výrobcem ESP32, firmou Espressif. Většina ESP-IDF je ve formě otevřeného kódu. Framework také obsahuje množství kódu z řady open-source knihoven, které jsou probrány v sekci 7.2.

ESP-IDF je licencováno pod Apache License 2.0 [60].

7.1.2 Kompilátor

Další podstatnou částí je ESP32 toolchain. Ten obsahuje kompilátor, linker a další utility pro transformaci kódu do binárního spustitelného souboru, jenž lze nahrát do mikrokontroléru ESP32. Postup samotného programování je probrán v sekci 7.3.

Součástí toolchainu jsou i uzavřené knihovny na obsluhu WiFi, Bluetooth a dalších periférií mikrokontroléru ESP32.

7.1.3 Další nástroje použité pro vývoj

Pro správu verzí firmware byl použit verzovací systém git [61]. Jako textový editor byl autorem této práce použit open-source Visual Studio Code společnosti Microsoft [62].

7.2 Použité knihovny

7.2.1 Knihovny použité v ESP-IDF

Součástí ESP-IDF je celá řada open-source knihoven a projektů. Některé z nich jsou uvedené v následujících odstavcích.

FreeRTOS Real-Time Operating System je jednoduchý operační systém pro embedded zařízení. Mimo jiné umožňuje multi-threading a řízení přístupu k prostředkům. Licencován je pod MIT License [63].

libsodium Sodium crypto library je knihovna pro šifrování, dešifrování a hashování. Je k dispozici pod licencí ISC [64].

mbedtls je knihovna pro SSL zabezpečení od společnosti ARM. Je součástí projektu ARMmbed, což je operační systém portovatelný na řadu ARM procesorů. Licencován je pod Apache 2.0 licencí [65].

nghttp2 je knihovna implementující HTTP protokol. K dispozici je pod licencí MIT License [66].

7.2.2 Knihovny použité ve firmware

Ve firmware samotném je pak použita knihovna espmqtt pro podporu MQTT protokolu. Pro použití v tomto projektu byla upravena Rudolfem Gavlasem. Knihovna je licencována pod Apache 2.0 [67].

7.3 Programování mikrokontroléru ESP32

Po resetu mikrokontroléru bootloader vyčte stav pinu IO0. Podle logické úrovně na pinu se buď přepne do programovacího módu nebo začne vykonávat uživatelský kód.

V programovacím módu bootloader naslouchá na rozhraní UART0. Programátor, jenž je k tomuto rozhraní připojen, pak pošle nový spustitelný soubor. Ten je bootloaderem zapsán do non-volatile paměti. Po resetu je pak nový program připraven ke spuštění.

7.4 Struktura firmware

Na obrázku 56 je zjednodušené blokové schéma firmware. Prvním krokem je načtení konfigurace z paměti. Konfigurace obsahuje zejména sériové číslo senzoru, WiFi SSID a heslo (pokud je použita WiFi) a LoRa a MQTT přihlašovací údaje.

Dalším krokem je přepnutí WiFi módu na dočasné AP, pokud bylo uživatelem vyžádáno. Dočasný AP mód znamená, že platforma vytvoří WiFi síť, ke které se uživatel může připojit a ve webovém rozhraní zařízení nakonfigurovat. Dočasný AP mód lze dosáhnout tak, že uživatel přiloží magnet na pravý horní roh krabičky (kde je lokalizován mikrokontrolér). Po krátkém okamžiku senzor pomocí LED indikuje, že registruje uživatele požadavek. Po odstranění magnetu se senzor restartuje a přepne do dočasnýho AP módu. Po ukončení konfigurace se pak opět restartuje do normálního módu, a připojí se k WiFi, pokud je nakonfigurována.

Dalším krokem firmware je inicializace časových rutin (zejména hlídání uptime platformy). Poté je provedena inicializace senzorů. Po ní již následuje start vlákna, které

vykonává pravidelné čtení ze senzorů (meas task). Pro senzor BME680 je použito samostatné vlákno.

Firmware poté vyhodnotí zda má vytvořit AP či se připojit k existující WiFi. Pokud byla nastavena dočasná AP nebo zařízení nemá nakonfigurovanou žádnou WiFi k připojení, vytvoří novou síť. Pokud v konfiguraci existují údaje pro připojení k existující WiFi síti, zařízení se k ní připojí. Ať už je použit AP nebo klient mód, je nastartováno vlákno pro http a https (zabezpečený) server.

Pokud je k dispozici připojení k Internetu, jsou v tomto kroku také vykonány všechny rutiny které připojení vyžadují. Jmenovitě jsou to synchronizace času pomocí NTP a start vlákna pro posílání dat pomocí MQTT, pokud je nakonfigurováno.

V dalším kroku je spuštěno vlákno obsluhující rutiny, které mají být spuštěny až ve chvíli, kdy jsou všechny senzory připraveny a dávají platné data. To je zejména ovládání barvy LED podle stavu ovzduší a případné rutiny pro ovládání vzduchotechniky.

Poté firmware spustí vlákno pro obsluhu LoRa modulu, pokud je k dispozici konfigurace LoRa. Pak hlavní vlákno firmware vstupuje do nekonečné smyčky. V té periodicky dochází k vyčítání výstupu Hallovy sondy integrované v mikrokontroléru, která měří intenzitu magnetického pole. V případě že tato intenzita překročí definovanou hodnotu, je to detekováno jako požadavek na dočasný AP mód.

7.5 Webové rozhraní

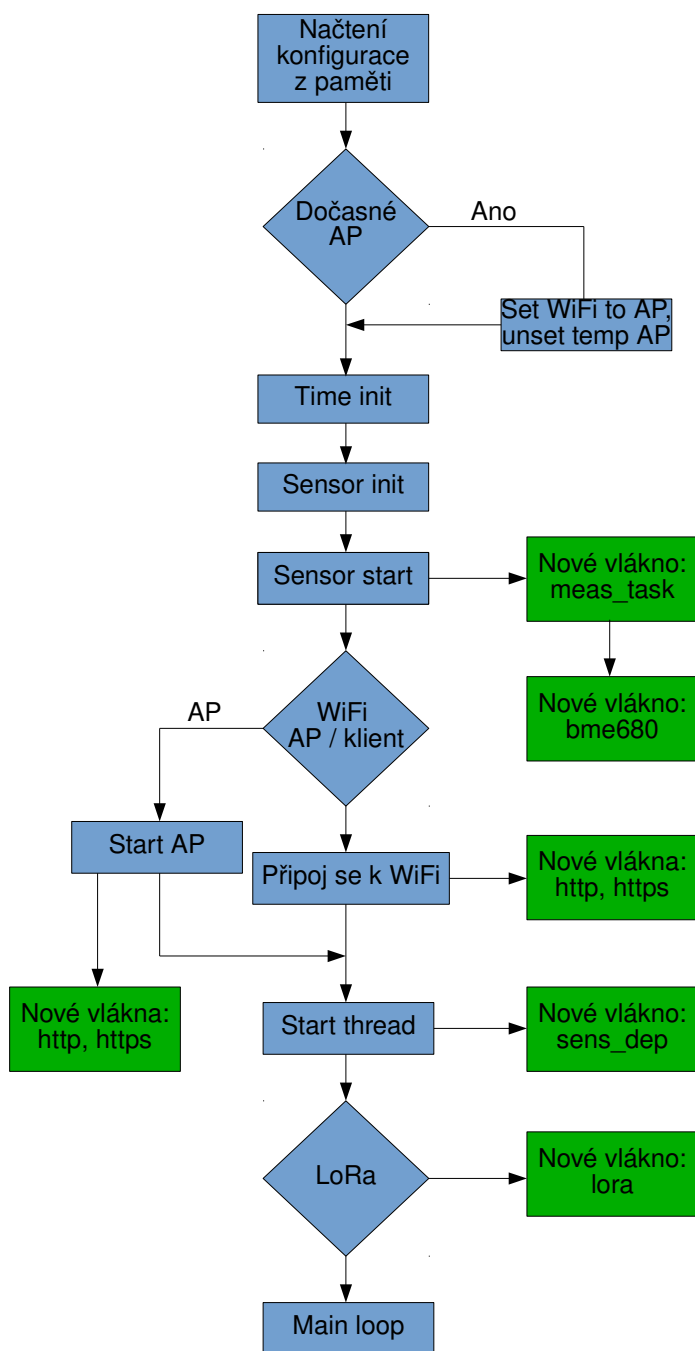
V této sekci je stručně probráno webové rozhraní, jenž slouží jak pro zobrazení aktuálních dat, tak i pro konfiguraci zařízení. Jako základ pro design rozhraní byla použita W3Schools CSS šablona. Tyto šablony jsou volně k použití [68].

7.5.1 Uživatelské rozhraní

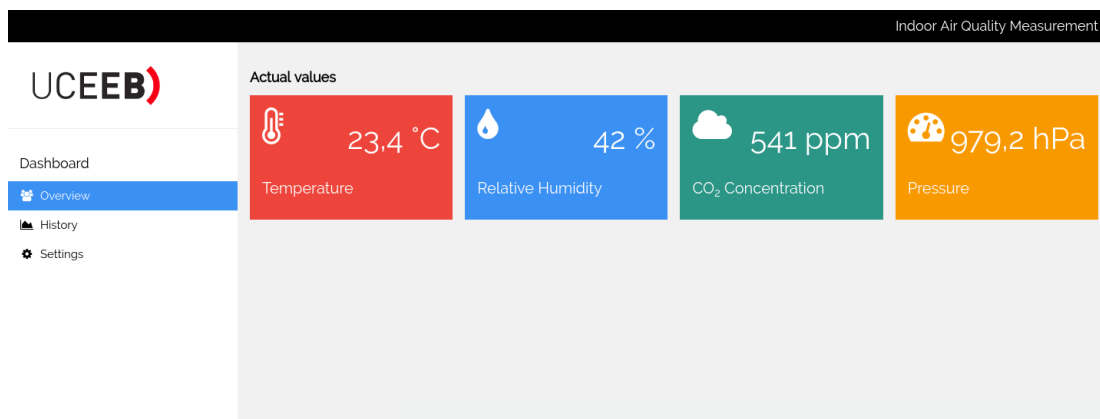
Screenshot webového rozhraní senzorové platformy je na obrázku 57. Web je díky šabloně optimalizován i pro použití na smartphonech a tabletech. Data se obnovují v reálném čase s periodou několika sekund.

7.5.2 Administrátorské rozhraní

Administrátorské rozhraní je přístupné z uživatelského pomocí odkazu *Settings* v levém panelu. Přístup do administrátorské sekce je chráněn heslem. Přenos hesla i veškerá další komunikace je šifrována pomocí TLS (protokol https). Rozhraní je na obrázku 58.



Obrázek 56 Blokové schéma firmware



Obrázek 57 Uživatelské rozhraní senzorové platformy

The screenshot displays the UCEEB Indoor Air Quality Measurement administrative interface. On the left, there is a navigation menu with the following items: Dashboard, Overview, History, and Settings (highlighted). The main content area contains a form for configuring the sensor platform with the following fields:

- Admin username: admin
- New password: Leave empty if not changed
- Sensor name: [Redacted]
- Sensor description (location): [Redacted]
- WIFI SSID: [Redacted]
- WIFI password: [Redacted]
- MQTT server: [Redacted]
- MQTT username: [Redacted]
- MQTT password: [Redacted]
- MQTT topic: [Redacted]

Obrázek 58 Administrátorské rozhraní senzorové platformy

8 Ověření funkčnosti senzoru

V této kapitole je vyhodnocena funkčnost senzoru. Je provedeno srovnání s referenčním senzorem a vyhodnocena funkce bezdrátových rozhraní v praktickém nasazení senzorové platformy. Jsou vyhodnoceny nedostatky senzorové platformy a jsou doporučena opatření pro případnou příští verzi.

8.1 Srovnání s referenčním senzorem

8.1.1 Referenční senzor Graywolf

Referenční měření bylo provedeno kalibrovaným senzorem Graywolf AdvancedSense Pro (obrázek 59). Použita byla měřící hlavice měřící teplotu, relativní vlhkost, oxid uhličitý, TVOC, oxid uhelnatý a ozon.

8.1.2 Metodika měření

Referenční senzor a dvě senzorické platformy byly umístěny do kanceláře pro šest osob. V místnosti je denní provoz, dá se tedy očekávat že data budou dynamická. Místnost disponuje vzduchotechnikou. Doba měření byla pět dní.

Referenční senzor disponuje vlastní pamětí, data se ukládají přímo na něm a jsou zpětně vyčtena pomocí USB rozhraní. Formát dat je CSV. Jako problém se ukázal fakt, že zařízení používá v datovém souboru k oddělení sloupců čárku. Zároveň však



Obrázek 59 Senzor Graywolf AdvancedSense Pro bez měřící hlavice. Zdroj: wolfsense.com

pro desetinná čísla také používá čárku. Data tedy bylo nutné předzpracovat, což byl provedeno pomocí skriptu v Pythonu.

Obě senzorické platformy byly připojeny k lokální WiFi síti. Data z nich byla vyčítána v reálném čase pomocí MQTT. Platforma se připojí na MQTT broker, což je serverová aplikace, která slouží jako centrální bod pro komunikaci. Každé zařízení, jenž chce data přijímat, se také musí připojit na MQTT broker. Komunikace probíhá šifrovaně a přístup k datům je chráněn heslem.

Pro ukládání a zobrazení dat pak posloužila aplikace, jež je pro tyto účely interně na UCEEB (Univerzitním centru energeticky efektivních budov) běžně používána. Jejím autorem je Rudolf Gavlas. Z webového rozhraní této aplikace pak byla data stažena ve formátu CSV.

Pro přeformátování, úpravu dat a jejich vizualizaci byl použit skript napsaný v Pythonu. Použity byly knihovny numpy a matplotlib.

Srovnávané veličiny jsou teplota, vlhkost a oxid uhličitý. VOC je zde srovnáno pouze ilustrativně, neboť výstup senzoru BME680 nelze na ppm snadno přepočítat. Senzor dává výstup buď v ohmech (přímé měření odporu snímače) nebo v IAQ indexu. To je bezrozměrná veličina vyjadřující kvalitu vzduchu.

Měření prachu bylo provedeno, nejsou však k dispozici referenční data.

8.1.3 Naměřená data

V této sekci jsou zobrazeny naměřená data.

Teplota

Jedním z důvodů vypracování této platformy byl samoohřev předcházející verze Ing. Skřivánka. Srovnání s referenčním senzorem v dlouhodobého hlediska je tedy důležitým bodem. Výsledný graf je na obrázku 60. Oproti referenčnímu senzoru obě zařízení vykazují vyšší teplotu. První zařízení vykazuje rozdíl 0,5 °C, druhé v maximu až 1 °C. Samoohřev zařízení se tedy zřejmě nepovedlo kompletně eliminovat, ale podstatně snížit z původních 3 °C na akceptovatelný 1 °C.

Relativní vlhkost

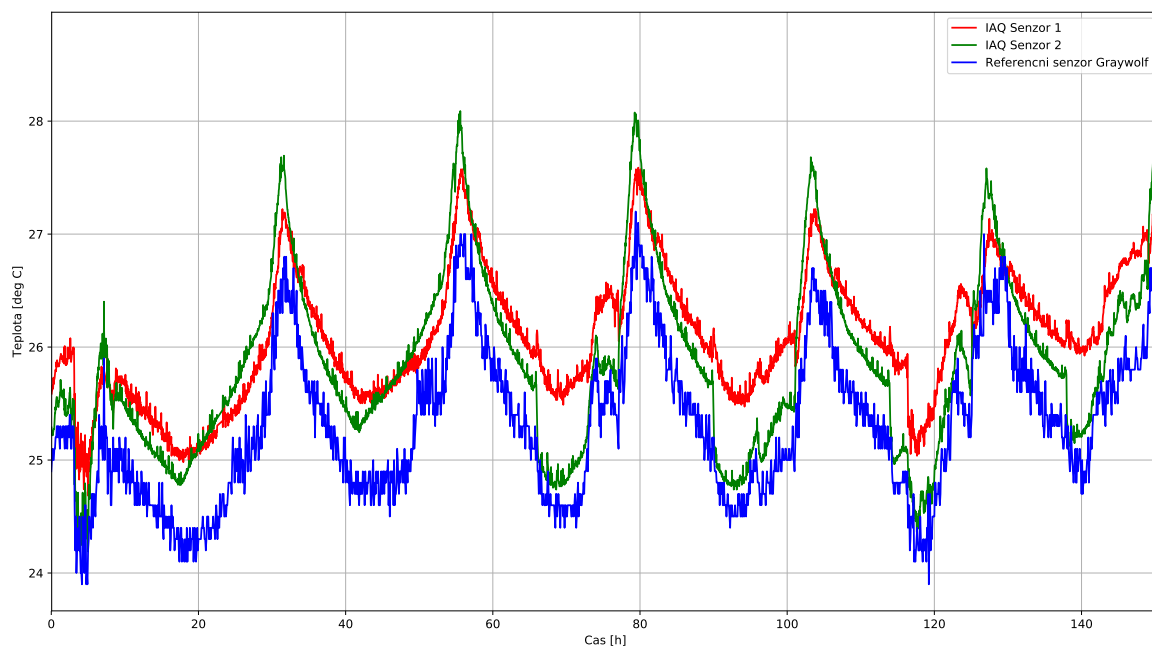
Graf relativní vlhkosti je na obrázku 61. Rozdíl oproti referenčnímu senzoru je pod jedno procento.

Koncentrace oxidu uhličitého

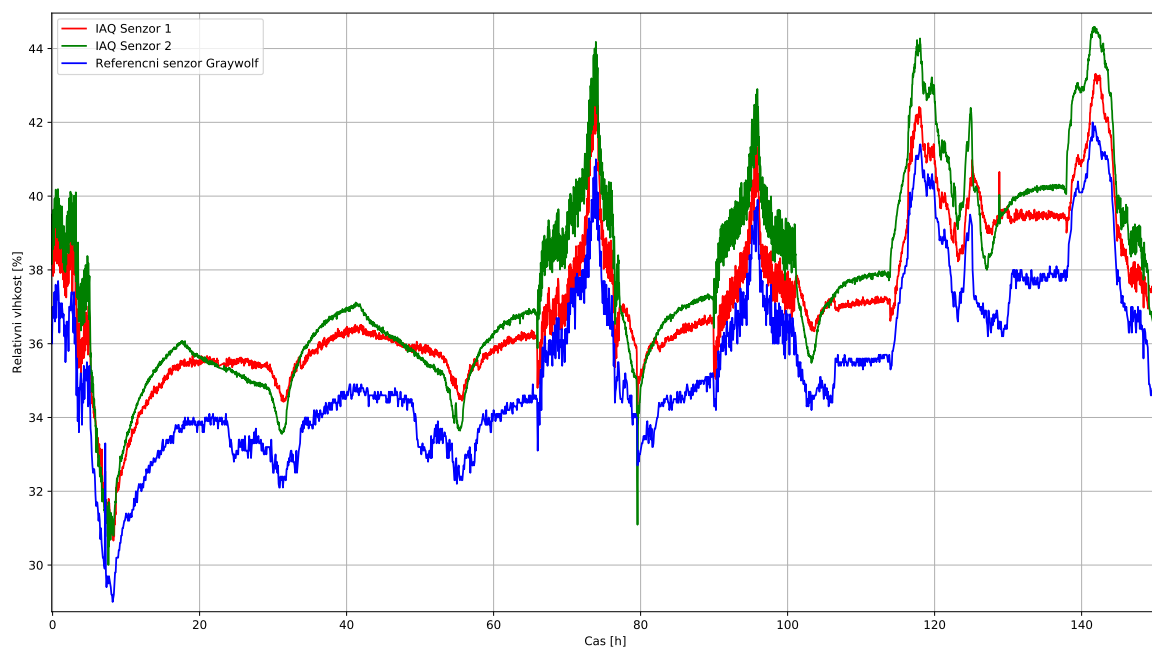
Na obrázku 62 je graf koncentrace oxidu uhličitého. Senzorová platforma vykazuje dobrou shodu s referenčním senzorem, rozdíl je v horším případě okolo 50 ppm. Extrémně krátké píky o vysoké amplitudě jsou způsobeny výdechem člověka přímo na zařízení.

Atmosférický tlak

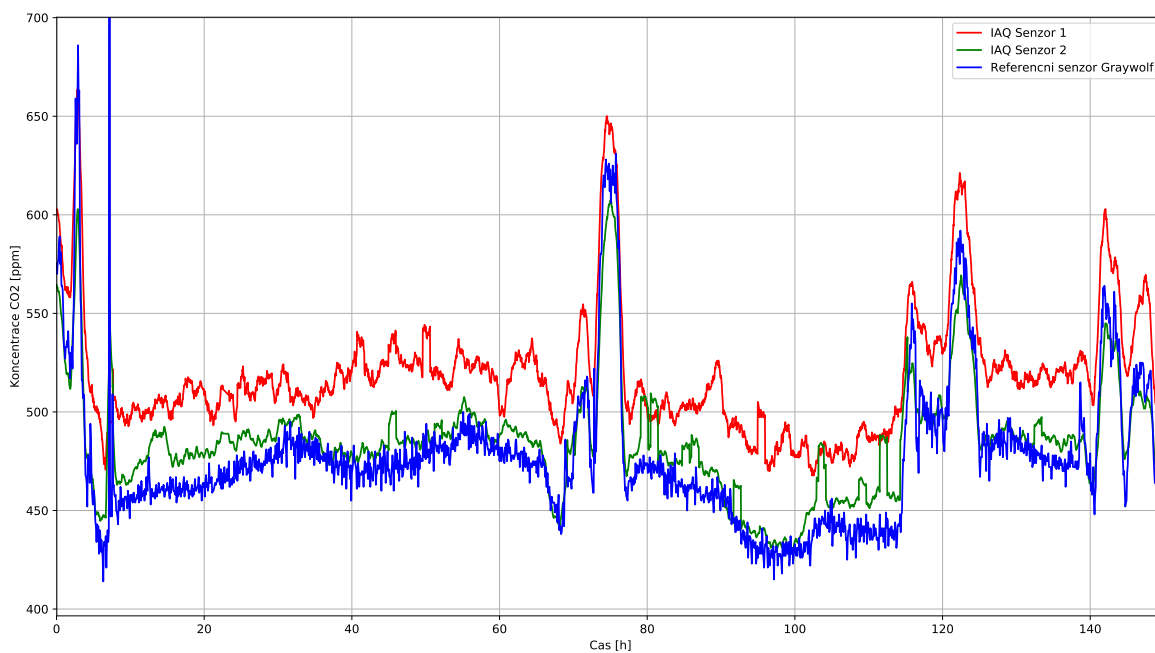
Srovnání tlaku je vidět na grafu 63. Zde překvapivě referenční senzor vykazuje oproti senzorické platformě znatelně větší (hrubější) diskretizační krok. Zároveň obě senzorické platformy vykazují velmi dobrou shodu naměřených hodnot.



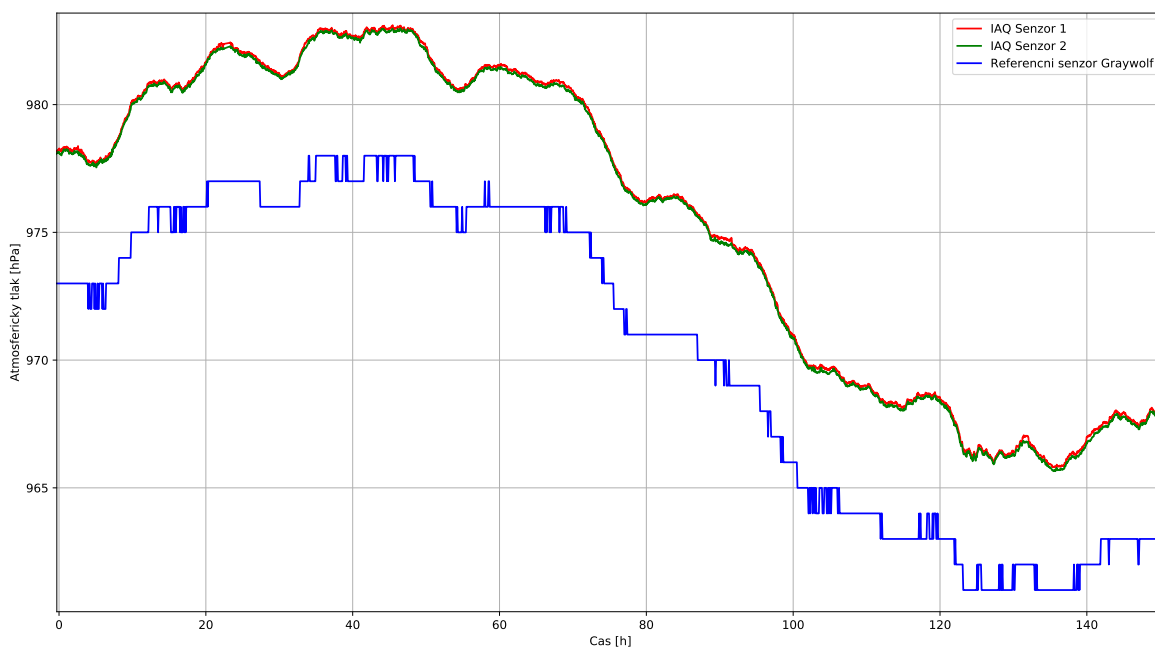
Obrázek 60 Naměřená data: teplota



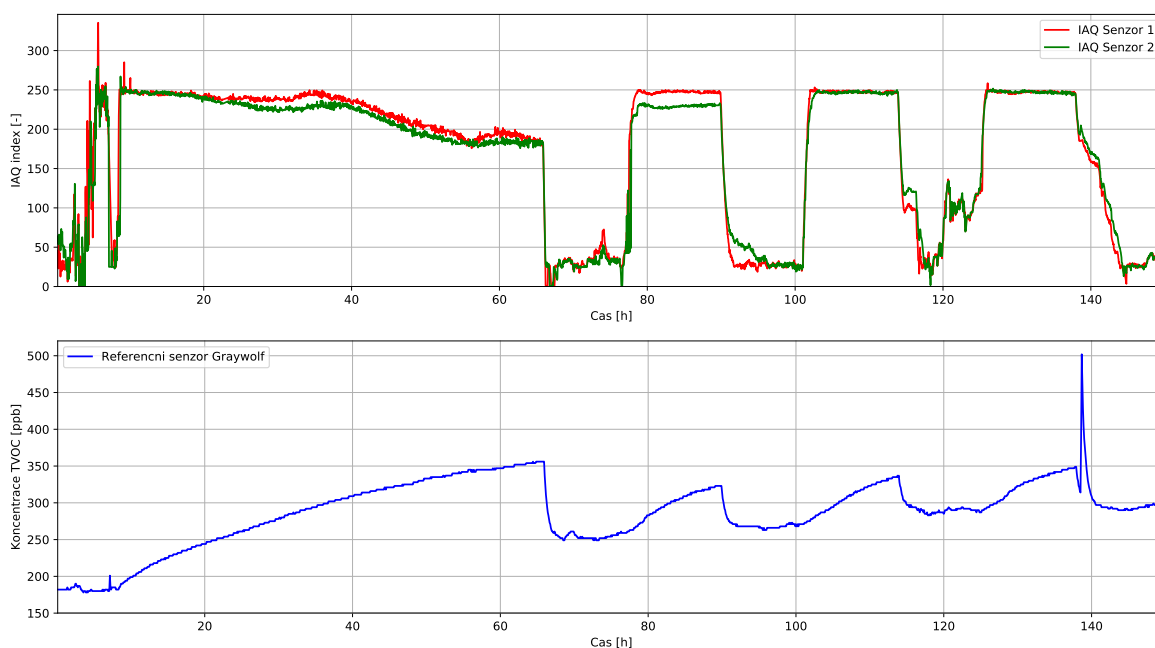
Obrázek 61 Naměřená data: relativní vlhkost



Obrázek 62 Naměřená data: oxid uhličitý



Obrázek 63 Naměřená data: tlak



Obrázek 64 Naměřená data: VOC

Těkavé organické látky

Referenční senzor Graywolf má úhrnný výstup TVOC v ppb. Oproti tomu senzor BME680, jenž je použit na sensorové platformě, nabízí jako výstup buď odpor snímacího prvku (v ohmech) nebo IAQ index (bezrozměrná veličina). Nelze zde tedy provést přímé porovnání.

Výpočet IAQ indexu z výstupu senzoru BME680 zajišťuje knihovna BSEC od firmy Bosch Sensortec. Tuto knihovnu je nutné integrovat do kódu firmware. Část knihovny je však zavřená, způsob přepočtu tedy není veřejně znám. Výsledný index však koreluje s hodnotou TVOC z referenčního senzoru.

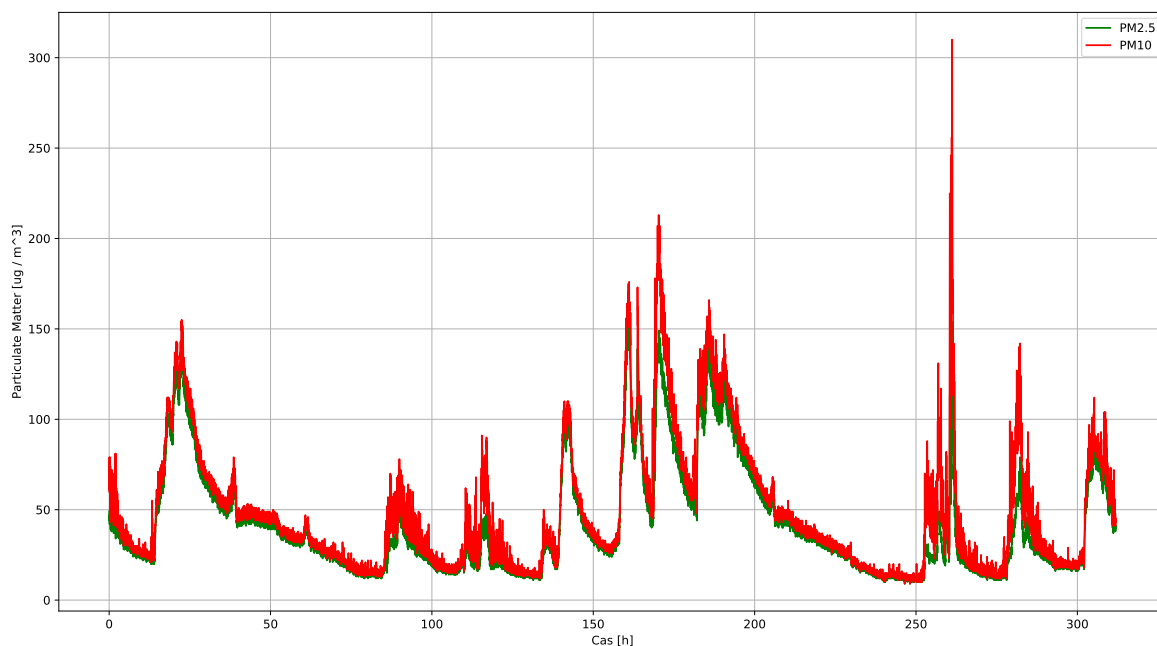
Knihovna provádí na pozadí autokalibraci. Způsob jejího provádění není autorovi znám. Z chaotického výstupního signálu na začátku grafu však lze usuzovat, že platná data knihovna poskytuje až po nějaké době.

Prachové částice

Na obrázku 65 je výsledek dlouhodobého měření senzoru SDS011. Měření probíhalo na jiném místě než zbytek měření. Měřeno bylo přímo v laboratoři vývoje elektroniky. Referenční data nejsou k dispozici. Vidíme však, že koncentrace prachu je periodickou funkcí, zřejmě korelující s cykly vzduchotechniky.

8.2 Praktické nasazení

Zařízení bylo testováno nejprve na UCEEB, poté v rámci projektu měření kvality vnitřního vzduchu na Kladně a v Praze. Měření proběhlo na 17 základních školách v Kladně (celkem 51 měřících stanovišť) a v Praze na městském úřadu Praha 2 (6 kusů senzoru).



Obrázek 65 Naměřená data: prachové částice

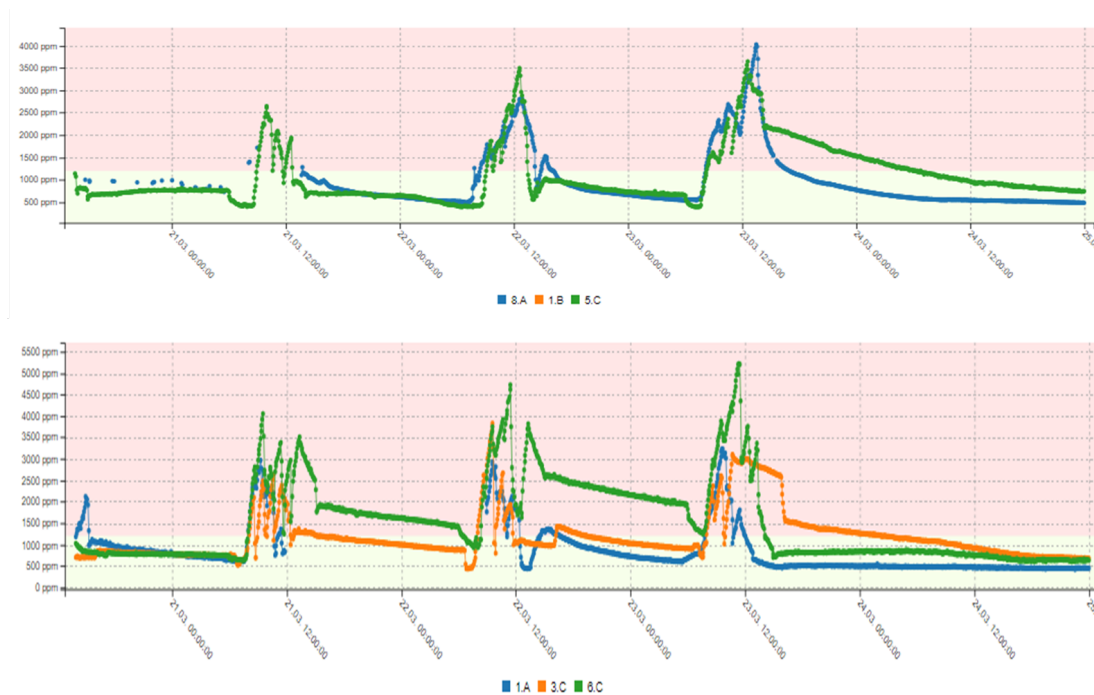
Při praktickém nasazení se projevilo několik problémů, např. nedostatečné pokrytí WiFi ve školách, nevhodně nastavená síť (chybně či velmi přísně). Na některých místech bylo nutné využít vlastní LTE WiFi router. Jako lepší řešení se v takových případech jeví použití LoRa konektivity. V zástavbě je však nutné mít gateway poměrně blízko, tím spíše, pokud se senzor nachází uvnitř budovy. Praktické nasazení také ukázalo na některé nedostatky ve firmwaru, které bylo nutné upravit. Například použití magnetu původně uvádělo senzor do továrního nastavení, což mnohdy přidělovalo práci. Pouhé přepnutí do AP módu se jeví jako lepší řešení.

Přes prvotní překážky se nakonec nasazení senzoru podařilo. Úspěšně byla otestována i verze pro řízení HVAC jednotky. Na praktickém nasazení sensorové platformy se velkou mírou podílel Ing. Vít Janovský. Graf z měření na škole je na obrázku 66.

8.3 Doporučení pro další vývoj

Další verzi senzoru by bylo vhodné navrhnout na čtyřvrstvé PCB. Na současné verzi bylo nutné udělat příliš mnoho kompromisů z hlediska EMC. Dále se domnívám, že by bylo vhodné určit primární okruh zákazníků, na něž je sensorová platforma cílena, a zeštíhlit návrh. Například podpora CIB sběrnice poměrně komplikuje návrh a zvětšuje velikost platformy, neboť footprint CIB modulu je poměrně velký. Zařízení již obsahuje RS-485 / ModBus, který je podporován daleko větším množstvím výrobců PLC, a přítomnost CIB modulu je zde tedy jistým způsobem redundantní.

Domnívám se, že vhodnější strategií vývoje by bylo provést rychle návrh poměrně jednoduchého zařízení, které splňuje zadané základní parametry. Snaha vytvořit něco, co “umí všechno”, přináší velké množství komplikací. Složitost zařízení roste velmi rychle s množstvím komponent, neboť každá další funkcionality vyžaduje nejen návrh hardware,



Obrázek 66 Naměřená data z praktického nasazení

ale také návrh firmware a následné testování.

Dále by bylo vhodné hlouběji prozkoumat možnosti BSEC knihovny pro senzor BME680, a případně zvážit použití jiného senzoru pro TVOC. Výstup ve formě IAQ indexu sice koresponduje se stavem ovzduší, naměřená data však nejsou uspokojivá.

9 Závěr

V rámci diplomové práce byla navržena platforma pro monitoring kvality vnitřního prostředí v interiéru budov. Z hlediska funkcionality se podařilo navrhnout platformu, která na trhu z pohledu měřených veličin a možnosti výběru komunikačních rozhraní nemá konkurenci. Zařízení je flexibilní pro použití v různých režimech, kdy může pracovat samostatně, jako součást centrálního systému měření a regulace nebo jako přímý řídicí prvek vzduchotechnických jednotek pro lokální větrání.

Zařízení bylo navrženo dle zadání diplomové práce a bylo testováno nasazením v reálných aplikacích. Právě díky reálnému nasazení se podařilo odhalit mnoho problémů, z nichž většina je již adresována v nových verzích firmware.

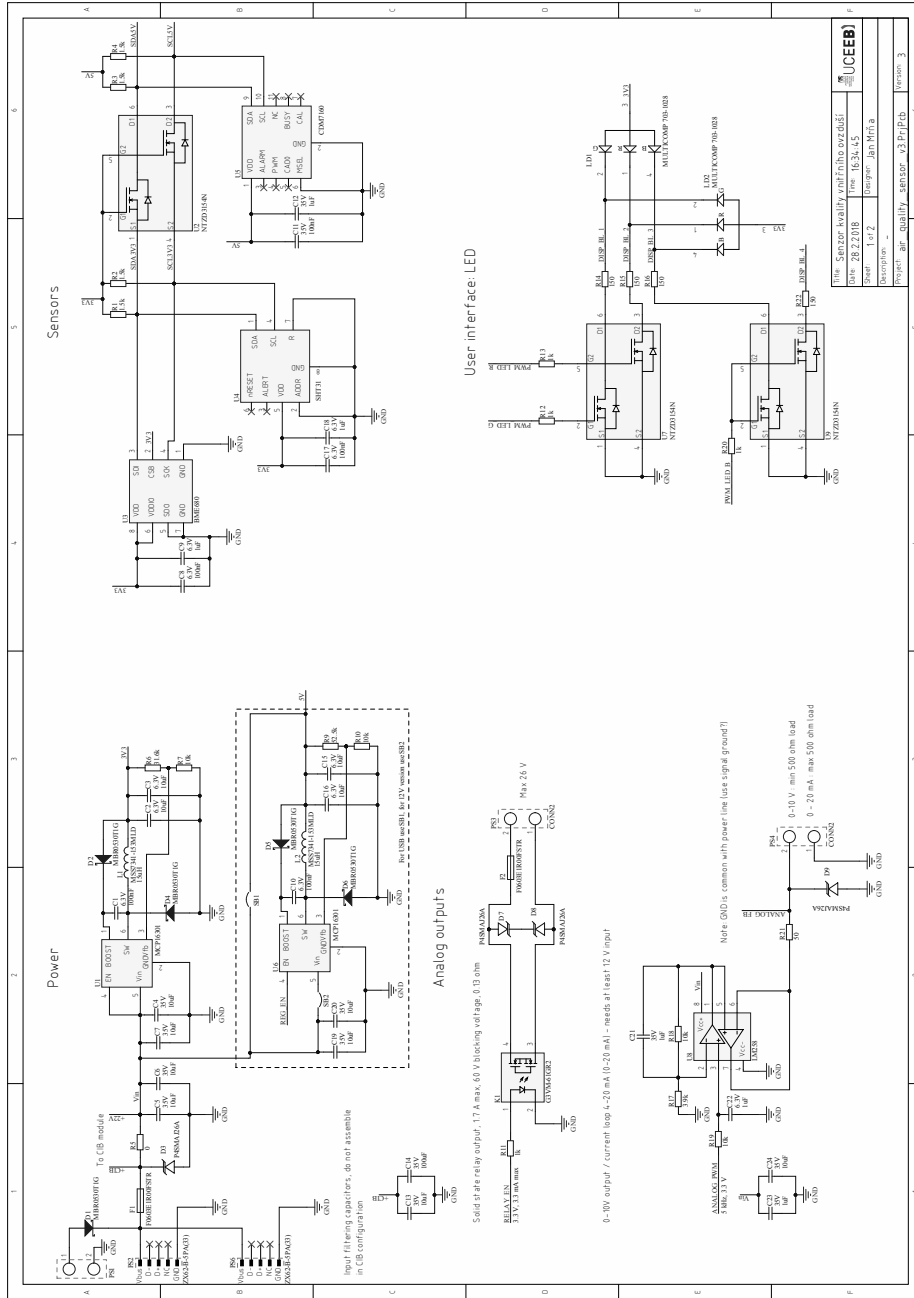
Stav firmware se již blíží produkční podobě. Funkčnost zařízení splňuje očekávání, byť se plně nepovedlo eliminovat samoohřev. Byla otestována komunikace a přenos dat jak přes WiFi, tak přes LoRa rozhraní. Další rozhraní a některé funkce se nepodařilo plně nebo vůbec testovat i z důvodu chybějící poptávky po dané aplikaci. Pokročilá funkcionalita, tedy např. IQRF, displej, CIB rozhraní, nebyla otestována. Z hlediska základních funkcí však zařízení pracuje uspokojivě a je připraveno na nasazení ve větším počtu.

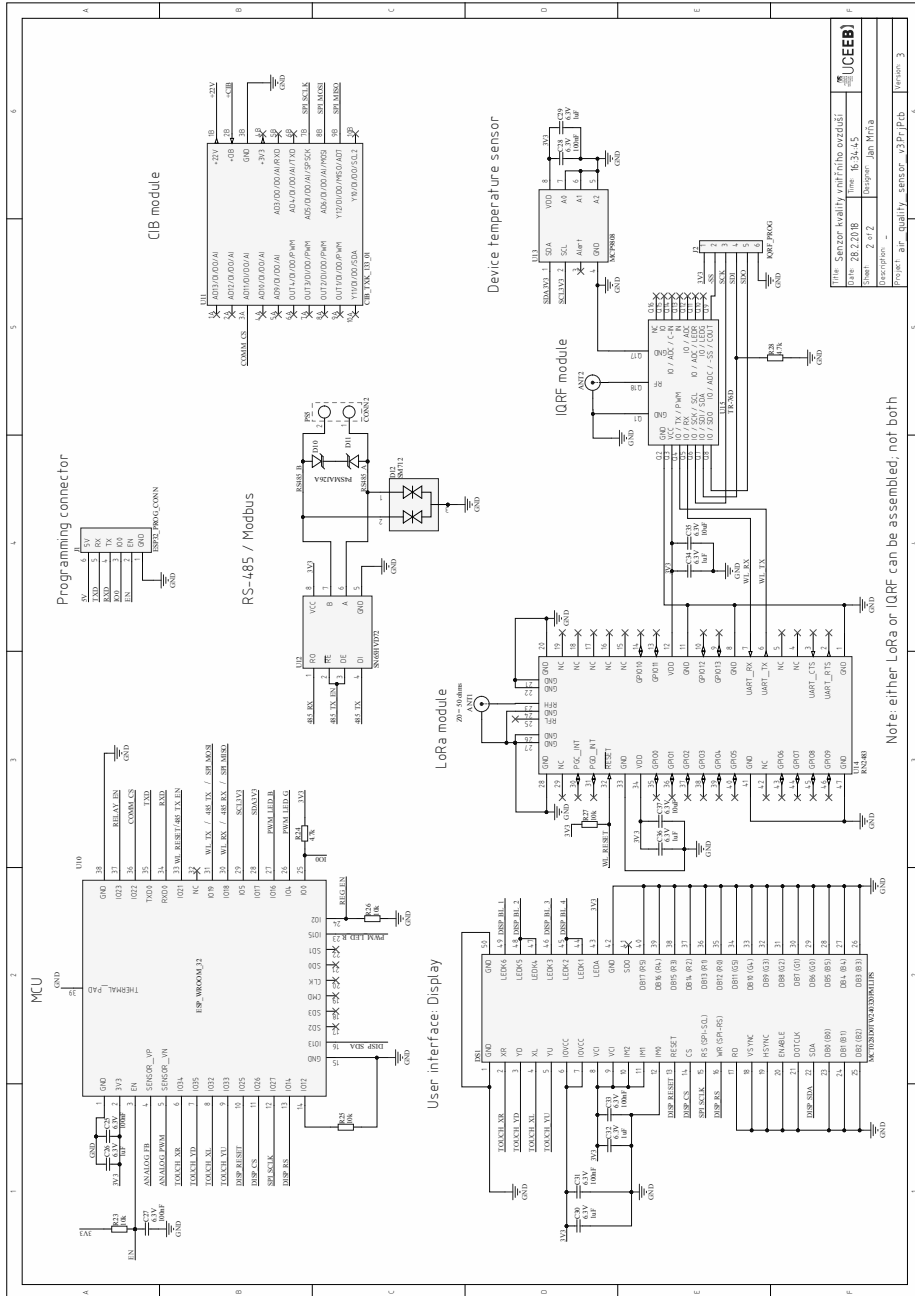
Zároveň se prokázal obrovský zájem trhu o takovou senzorovou platformu a proto se počítá s dalším vývojem a uvedením na trh.

Navržené řešení splňuje zadání diplomové práce a práce samotná poskytuje podkladovou dokumentaci pro další vývoj.

Příloha A

Kompletní schéma senzorné platformy





Literatura

- [1] European Environment Agency. *Indoor Air Quality*. URL: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2013/articles/indoor-air-quality> (cit. 06.04.2018).
- [2] Jan Včelák et al. *Platforma pro monitoring vnitřního prostředí*. URL: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/15755-platforma-pro-monitoring-vnitriho-prostredi> (cit. 09.04.2018).
- [3] *Vyhláška č. 410/2005 Sb. Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*. Vláda ČR, 2005.
- [4] Zuzana Mathausarová. *Mikroklimatické podmínky vnitřního prostředí pracovišť*. URL: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/mikroklimaticke-podminky-vnitriho-prostredi-pracovist> (cit. 06.04.2018).
- [5] *Vyhláška o technických požadavcích na budovy č. 268/2009 Sb.* Ministerstvo pro místní rozvoj, 2009.
- [6] *Norma ČSN EN 15251*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] *Nariadení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění pozdějších předpisů*. Vláda ČR, 2007.
- [8] *Grafická ročenka 2015*. Český hydrometeorologický ústav, 2015.
- [9] Alza. *Elgato Eve Room*. URL: <https://www.alza.cz/elgato-eve-room-d3855710.htm> (cit. 22.05.2018).
- [10] *AXIS360-CO2 LORA SENSOR*. URL: <https://www.axis360-sensors.com/product/axis360-c02> (cit. 22.05.2018).
- [11] *Protronix New Line II senzor*. URL: <https://www.careforair.eu/cidla-regulatory/kombinovana-cidla/> (cit. 22.05.2018).
- [12] Sensirion. *SHT31 Datasheet*. 2017.
- [13] Bartosz Szulczynski a Jacek Gebicki. "Currently Commercially Available Chemical Sensors Employed for Detection of Volatile Organic Compounds in Outdoor and Indoor Air". In: *MDPI Environments* 6/3/2017 (2017).
- [14] Figaro. *TGS2602 Datasheet*. 2017.
- [15] P. E. Martin a E. F. Barker. "The Infrared Absorption Spectrum of Carbon Dioxide". In: *Phys. Rev.* 41, 291 (1932).
- [16] Ghenadii Korotcenkov. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications*. Springer, 2013. ISBN: 9781461471653.
- [17] RAE Systems. *Technical Note TN-169: THEORY AND OPERATION OF NDIR SENSORS*. URL: http://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-169_Theory-and-Operation-of-NDIR-Sensors_04-02.pdf (cit. 10.04.2018).

- [18] Richard Pogge. *Lecture 29: The Earth's Atmosphere*. URL: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit5/atmos.html> (cit. 10.04.2018).
- [19] Figaro. *CDM7160 Datasheet*. 2017.
- [20] Sensirion. *SCD30 Preliminary Datasheet*. 2018.
- [21] *Autokalibrační funkce čidel CO₂*. Aplikační poznámka. Protronix. URL: <https://www.careforair.eu/wp-content/uploads/2016/06/an-CO2-Autokalibracni-funkce-cidel-CO2-cz-V2-142113.pdf.pdf> (cit. 01.05.2018).
- [22] Figaro. *TGS4161 Datasheet*. 2017.
- [23] Sensirion. *SGP30 Datasheet*. 2018.
- [24] Bosch Sensortec. *BME680 Datasheet*. 2018.
- [25] Queensland Government. *Tapered element oscillating microbalance*. URL: <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air-pollution/oscillating-microbalance> (cit. 21.04.2018).
- [26] *Mitsubishi Electric Develops High-precision Air-quality Sensor for PM_{2.5}*. Press release 2992. Mitsubishi Electric, 2016. URL: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2016/0208-a.html>.
- [27] Sharp. *GP2Y1010AU0F Datasheet*. 2007.
- [28] Sensirion. *Particulate Matter Sensor (Upcoming Technology)*. URL: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25/> (cit. 21.04.2018).
- [29] *Web AQICN, organizace zabývající se měřením kvality vzduchu*. URL: <http://aqicn.org/sensor/sds011/> (cit. 23.05.2018).
- [30] AQICN. *Sensing the Air Quality: Research on Air Quality Sensors*. URL: <http://aqicn.org/sensor/> (cit. 21.04.2018).
- [31] NOVA Fitness. *SDS011 Datasheet*. 2017.
- [32] Espressif. *ESP32 Datasheet*. 2018.
- [33] Espressif. *ESP32 Hardware Design Guidelines*. 2017.
- [34] *Semtech Acquires Wireless Long Range IP Provider Cycleo*. Press release. Semtech Corporation, 2012. URL: <https://investors.semtech.com/news-releases/news-release-details/semtech-acquires-wireless-long-range-ip-provider-cycleo?ReleaseID=655335>.
- [35] Ramon Sanchez-Iborra et al. "Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions". In: *Sensors* (2018). URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/772> (cit. 23.04.2018).
- [36] Matt Knight. *Reversing LoRa*. Videopresentation. DEF CON 24, 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KEjlkZA2o1E>.
- [37] N. Sornin a A. Yegin. *LoRaWAN 1.1 Specification*. LoRa Alliance, 2017. URL: <https://loro-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11> (cit. 23.04.2018).
- [38] České Radiokomunikace. *ČRA Služby IoT*. URL: <https://cra.cz/sluzby-iot> (cit. 28.04.2018).
- [39] *TheThingsNetwork*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/> (cit. 29.04.2018).
- [40] Microchip. *RN2483 Command Reference*. 2017.

LITERATURA

- [41] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. Český telekomunikační úřad, 2016.
- [42] *ERC Recommendation 70-03 Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. CEPT ECC (Electronic Communications Committee of European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, 1997.
- [43] *TTN Duty Cycle for LoRaWAN devices*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html> (cit. 29.04.2018).
- [44] Microchip. *RN2483 Datasheet*. 2017.
- [45] Microchip. *LoRaWAN stack*. URL: <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node> (cit. 01.05.2018).
- [46] MICRORISC. *IQRF RF Specification*. URL: <https://iqrf.org/technology/rf> (cit. 23.04.2018).
- [47] MICRORISC. *TR-76D Datasheet*. 2017.
- [48] *AN10675: Interfacing 4-wire and 5-wire resistive touchscreens to the LPC247x*. Aplikační poznámka. NXP. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10675.pdf> (cit. 01.05.2018).
- [49] ON Semiconductor. *MBR0530T1G Datasheet*. 2017.
- [50] Diotec Semiconductor. *P4SMAJ26A Datasheet*. 2017.
- [51] Microchip Technology. *MCP16301 Datasheet*. 2017.
- [52] AVX. *F0603E1R00FSTR Datasheet*. 2017.
- [53] Figaro. *CDM7160 Communication Specifications*. 2017.
- [54] *AN10441: Level-shifting techniques in I2C-bus design*. Aplikační poznámka. NXP. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10441.pdf> (cit. 01.05.2018).
- [55] STMicroelectronics. *LM258 Datasheet*. 2017.
- [56] *IEC 60063:1963, Preferred number series for resistors and capacitors*. International Standard. IEC.
- [57] Paul Falstad a Iain Sharp. *Falstad Circuit Simulator*. URL: <http://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html> (cit. 17.05.2018).
- [58] Multicomp. *RGB LED 3.2mm x 2.8mm 0.06W Datasheet*. 2017.
- [59] MIDAS. *MCT028D0TW240320PMLIPS Datasheet*. 2017.
- [60] Espressif. *Licence ESP-IDF*. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf/blob/master/LICENSE> (cit. 20.05.2018).
- [61] Linus Torvalds a Junio Hamano. *git webpage*. URL: <https://git-scm.com/> (cit. 20.05.2018).
- [62] Microsoft. *Visual Studio Code*. URL: <https://code.visualstudio.com/> (cit. 20.05.2018).
- [63] *Licence FreeRTOS*. URL: <https://www.freertos.org/a00114.html> (cit. 20.05.2018).
- [64] *Licence libsodium*. URL: <https://github.com/jedisct1/libsodium/blob/master/LICENSE> (cit. 20.05.2018).

- [65] *Licence mbedTLS*. URL: <https://github.com/ARMmbed/mbedtls/blob/development/LICENSE> (cit. 20.05.2018).
- [66] *Licence nghttp2*. URL: <https://github.com/nghttp2/nghttp2/blob/master/COPYING> (cit. 20.05.2018).
- [67] *Licence espmqtt*. URL: <https://github.com/tuanpmt/espmqtt/blob/master/LICENSE> (cit. 20.05.2018).
- [68] *Webové šablony W3Schools*. URL: https://www.w3schools.com/w3css/w3css_templates.asp (cit. 23.05.2018).