



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

IOT MONITORING OVZDUŠÍ

IOT AIR MONITORING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kousal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2022



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Kousal

ID: 221063

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

IoT monitoring ovzduší

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je sestavit systém, který bude schopen měřit kvalitativní parametry ovzduší, bezdrátově odesílat a zpracovávat na některém z dostupných serverů pro IoT, např. ThingSpeak, ubidots, Cayenne, aj. Vytvořené zařízení bude použito pro měření v reálných prostředích jako je domácnost, škola, venkovní prostředí a povedou ke sledování míry znečištění životního prostředí. Dílčím cílem je ucelený návrh hardwarové a softwarové platformy, která bude dostupná přes internet všem zájemcům o neprofesionální měření a umožní tak vytvoření rozsáhlé monitorovací sítě.

Prostudujte dostupné koncepce využívající senzory plynů, prachových částic a doplňte je o měření jiných veličin jako je úroveň hluku, světelný smog, UV záření apod. Prostudujte možnosti řídícího prvku měřící jednotky např. AVR, Raspberry Pi, STM32, ESP, aj. a zvolte ideální variantu. Prostudujte vhodné komunikační rozhraní pro přenos dat na server. Vyberte veškeré komponenty, navrhněte blokové schéma zařízení, sestavte obvodové zapojení, DPS a realizujte jej. Při návrhu dbejte na nízkou spotřebu finálního zařízení.

Zařízení zkompletujte, oživte, naprogramujte obslužné firmwary a zprovozněte sběr dat. Na serveru provádějte výpočty základních statistik, jako týdenní přehled hodnot, min./max., střední hodnota, filtrování chybných dat, aktuální rozptylové podmínky, aj. Zveřejněte veškeré podklady pro výrobu zařízení i měřená data.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Air Pollution Detector. Instructables circuits [online]. Autodesk, 2018 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Air-Pollution-Detector/>

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato semestrální práce se zabývá vytvořením zařízení pro měření kvalitativních parametrů ovzduší a které je následně bezdrátově přenáší na server, kde se naměřená data zpracovávají a zobrazují uživateli. Cílem je vytvořit zařízení s co nejnižším odběrem pro možnost provozu na akumulátor.

KLÍČOVÁ SLOVA

IoT, ESP32, senzory, senzor prachových částic, kvalita vzduchu, LoRa, senzor plynů, teplota, vlhkost, intenzita osvětlení, UV záření

ABSTRACT

The purpose of this semestral work is to make a device that can measure air quality parameters and send them wirelessly to the server, where that measured data are processed and then shown to the user. The aim is to create a device with the lowest possible power consumption for the possibility of battery operation.

KEYWORDS

IoT, ESP32, sensors, dust particles sensor, air quality, LoRa, gas sensor, temperature, humidity, light intensity, UV light

KOUSAL, Martin. *IoT monitoring ovzduší*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2022, 65 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Martin Kousal

VUT ID autora: 221063

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2021/22

Téma závěrečné práce: IoT monitoring ovzduší

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Tomáši Frýzovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Měření koncentrace prachových částic	12
1.2 Měření oxidu uhličitého	13
1.2.1 Optický senzor	13
1.2.2 Elektrochemický senzor	14
1.2.3 Polovodičový senzor	14
1.3 Měření intenzity osvětlení	14
1.3.1 Fotodiody	14
1.3.2 Fototranzistory	15
1.4 Měření UV záření	15
1.4.1 UVA záření	15
1.4.2 UVB záření	15
1.4.3 UVC záření	15
1.5 Měření teploty	16
1.5.1 Kovové senzory	16
1.5.2 Termočlánky	17
1.5.3 Polovodičové senzory	17
1.6 Měření vzdušné vlhkosti	17
1.7 Měření atmosférického tlaku	18
1.7.1 Piezoelektrické senzory	18
1.7.2 MEMS senzory	18
1.8 IoT sítě	19
1.8.1 LoRa	19
1.8.2 LoRaWAN	20
1.8.3 Sigfox	21
1.8.4 NB-IoT	22
1.8.5 WiFi	22
2 Návrh zařízení	23
2.1 Výběr senzorů	23
2.1.1 Senzor koncentrace prachových částic	23
2.1.2 Senzor oxidu uhličitého	24
2.1.3 Senzor UV záření	25
2.1.4 Senzor teploty	25
2.1.5 Senzor intenzity osvětlení	26

2.1.6	Senzor atmosférického tlaku	27
2.1.7	Senzor měření vlhkosti	28
2.2	Výběr řídícího mikrokontroléru	28
2.2.1	Analogově digitální převodník	30
2.3	Přenos dat na server	31
2.3.1	Výběr LoRa modulu	32
2.4	Napájení zařízení	32
2.4.1	Výběr step-up měniče	33
2.4.2	Výběr lineárního stabilizátoru pro 3,3 V	34
2.4.3	Výběr lineárního stabilizátoru pro 1,8 V	35
2.5	Výsledné zapojení zařízení	36
2.6	Nabíjení zařízení	37
3	Návrh desek plošných spojů	40
3.1	Návrh desky plošných spojů nabíječky	40
3.2	Návrh desky plošných spojů hlavní desky	40
4	Software pro zařízení	43
4.1	Server pro zpracování naměřených dat	43
4.2	Základní funkce zařízení	44
4.3	Firmware mikrokontroleru	44
4.3.1	Obsluha senzorů	45
4.3.2	Připojení k WiFi	46
4.3.3	Připojení k LoRaWAN	47
4.4	Přijetí dat a jejich zpracování	49
4.4.1	Konfigurace Node-RED	50
4.4.2	Grafické uživatelské rozhraní	50
Závěr		52
Literatura		53
Seznam příloh		59
A Schéma zapojení zařízení		60
B Foto realizované desky plošných spojů		64

Seznam obrázků

1	Blokový diagram výsledné funkce zařízení	11
1.1	Blokové schéma senzoru prachových částic PM1003.	13
1.2	Rozdělení záření podle vlnové délky.	16
1.3	MEMS kapacitní senzor tlaku.	19
1.4	Ukázka průběhu rozprostřeného spektra v čase.	20
1.5	Typické zapojení LoRaWAN sítě.	21
2.1	Senzor pro měření koncentrace prachových částic PMS5003.	24
2.2	Senzor pro měření intenzity UV záření ML8511. [1]	25
2.3	Senzor pro měření teploty SHT40.	26
2.4	Senzor pro měření intenzity osvětlení VEML7700.	27
2.5	Blokový diagram mikrokontroleru ESP32.	30
2.6	LoRa modul RFM95W.	32
2.7	Typické zapojení step-up měniče AP1603 pro výstupní napětí 5 V. [2]	34
2.8	Schéma zapojení step-up měniče.	34
2.9	Schéma zapojení lineárního stabilizátoru s výstupem 3,3 V.	35
2.10	Zapojení lineárního stabilizátoru s výstupem 1,8 V.	35
2.11	Celkové blokové schéma navrhovaného zařízení.	36
2.12	Zapojení nabíjecího obvodu LT3652 podle doporučení výrobce. [3] . .	37
2.13	Výsledné zapojení nabíječky LiFePO4 baterie za použití obvodu LT3652.	39
3.1	Deska plošných spojů pro nabíječku.	41
3.2	Pohled na 3D model hlavní řídící desky.	42
3.3	Pohled na 3D model desky se světelnými senzory.	42
4.1	Základní funkce softwaru pro mikrokontroler.	45
4.2	Vytvořená aplikace v konzoli The Things Network.	47
4.3	Formulář pro registraci koncového zařízení do sítě The Things Network.	48
4.4	Konfigurace toku dat v prostředí Node-RED.	51
4.5	Ukázka zobrazení naměřených dat pomocí aplikace Grafana.	51
B.1	Foto realizované desky osazené z výroby.	64
B.2	Foto realizované desky včetně doosazení součástek a přidání modulů se senzory.	65

Seznam tabulek

2.1	Porovnání vybraných parametrů senzorů koncentrace prachových částic.	23
2.2	Srovnání parametrů vybraných senzorů teploty.	26
2.3	Srovnání parametrů vybraných senzorů intenzity osvětlení.	27
2.4	Srovnání parametrů vybraných senzorů atmosférického tlaku.	28
2.5	Srovnání parametrů vybraných mikrokontrolerů.	29

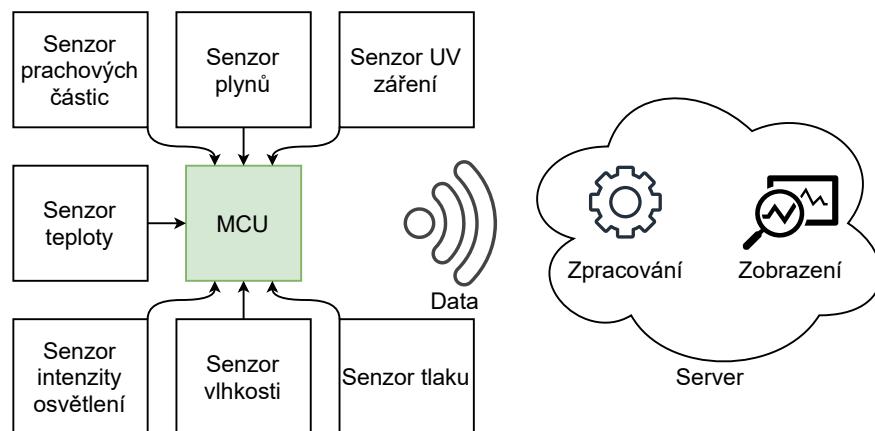
Úvod

V dnešní době jsou sítě IoT téměř na každém kroku. Proto se snaží i velcí výrobci domácí elektroniky implementovat tuto konektivitu do svých zařízení. Většinou se jedná o uzavřený ekosystém senzorů, které spolu komunikují pomocí sítě využívající bezlicenční pásma a přenáší data na server, kde se dále zpracovávají a vyhodnocují. Lze je tedy dnes najít v mnoha rodinách, kde se mohou zapojit do chytré domácnosti, či mnohem častěji v průmyslu při automatizaci výrobních procesů.

V komerčním prostředí nejsou zatím dostupná žádná zařízení, která by umožňovala monitorovat kvalitu ovzduší v domácích podmínkách. Lze nalézt mnoho profesionálních zařízení, které jsou určeny na měření jedné konkrétní veličiny (např. koncentrace prachových částic), avšak takové zařízení stojí tisíce korun. Cílem této práce je navrhnout, oživit a naprogramovat zařízení, které umožní monitorovat a vyhodnocovat základní veličiny o kvalitě ovzduší.

Základní myšlenkou IoT sítí a zařízení do nich připojených je velice nízká spotřeba, díky čemuž dokáží vydržet v provozu na baterie i několik let. Nízké spotřeby je dosaženo nejen vybranými senzory a řídícím mikroprocesorem, ale hlavně díky nízkým nárokům na počet přenesených dat a vysílací výkon. Celé zařízení tedy bude navrhováno s ohledem na výslednou spotřebu při zachování uspokojivé přesnosti měření a také ceně použitých komponent.

Výsledky měření budou přenášeny do databáze, odkud se mohou používat pro vykreslování do grafů či pro následné zpracování ve formě rychlých přehledů (např. průměrné denní hodnoty). Tyto výsledky budou předávány uživateli skrze webovou službu, takže si je bude moci zobrazit v podstatě na jakémkoli zařízení, které je připojeno k internetu. Blokové schéma popisující fungování zařízení lze vidět na obrázku 1.



Obr. 1: Blokový diagram výsledné funkce zařízení.

1 Teoretická část

Teoretická část práce bude zaměřena na obecné principy, na kterých pracují nejčastější senzory pro monitoring ovzduší. Převážná část z použitých senzorů využívá nepřímý způsob měření námi požadovaných veličin, kde se většinou změna dané veličiny projeví na senzoru změnou odporu a tím i proudu jím protékajícím.

1.1 Měření koncentrace prachových částic

Prachové částice je možné rozdělit do několika kategorií podle jejich velikosti. Často se lze setkat s pojmem např. PM2.5, což je zkratka z anglického particulate matter (pevné částice) a číslo, které udává maximální velikost těchto částic v μm . Nejčastěji se měří částice do velikosti 10 μm , 2,5 μm a 1 μm . Částice o velikosti 10 μm nejsou pro lidský organismus příliš škodlivé, lidské tělo jich většinu dokáže zachytit již při vstupu do dýchacích cest. Problém nastává při vyšší koncentraci částic menších než 2,5 μm . Zde již tělo nemá přirozenou obranu a dostávají se tak přímo do plic. Částice menší než 0,5 μm jsou schopny proniknout až do krevního řečiště.

Nejčastěji se v praxi měří koncentrace částic o velikosti 10 μm a 2,5 μm . Všechna zařízení pro měření těchto částic fungují na principu pohlcování či odrážení světelného paprsku. Pro měření je tedy potřeba zdroj světla a detektor světelného paprsku. Jako zdroj se používají LED nebo stále častěji laser. Princip měření tedy spočívá v osvícení vzorku vzduchu daným paprskem světla, který se o prachové částice ve vzorku rozptýlí nebo pohltí. Množství dopadeného světla je tedy nepřímo úměrné koncentraci prachových částic v daném vzorku. V principu jsme schopni měřit tak malé částice, jak přesný zdroj světla (šířka paprsku) jsme schopni vyrobit a také jej potom detektovat.

Dříve používané LED mají nevýhodu v tom, že vyzařují široký paprsek světla, který nejsme schopni jednoduše soustředit do jednoho bodu. Lze využít optickou soustavu pro zaostření takového paprsku světla, ovšem v daném prašném prostředí by docházelo k častému opotřebení a zaprášení čoček, které by poté ztrácely své vlastnosti a měření by bylo nemožné. Z těchto důvodů je v dnešní době více používanější laser, jelikož jsme schopni vytvořit paprsek o dané vlnové délce, výkonové hustotě a velikosti.

Poslední součástí těchto detektorů je mechanismus, kterým se do senzoru dostává čerstvý vzorek vzduchu. Nejjednodušší je využití malého ventilátoru, který bude do prostoru senzoru vhánět čerstvý vzduch z okolí. Nevýhodou takového řešení je hlučnost senzoru a také možnost zanášení senzoru nečistotami z okolí. Proto se objevují i senzory, které mají tento ventilátor nahrazený topným elementem (nejčastěji výkonový rezistor), kterým protéká proud a ohřívá vzduch okolo, viz obrázek 1.1. Ten



Obr. 1.1: Blokové schéma senzoru prachových částic PM1003 [6].

pak díky rozdílné hustotě teplého a studeného vzduchu začne stoupat vzhůru a unáší s sebou prachové částice do měřeného prostoru. Zde je ovšem třeba dávat pozor na konstrukci takového senzoru a na výrobcem předepsané požadavky na montáž, jelikož jej nelze umístit téměř libovolně v prostoru, jako tomu může být u senzoru s ventilátorem. [4][5]

1.2 Měření oxidu uhličitého

Oxid uhličitý (CO_2) je plyn běžně se vyskytující v zemské atmosféře a jeho koncentrace kolísá na základě hned několika faktorů. Lokální hodnoty může ovlivňovat například výskyt mnoha živočichů či lidí na jednom místě. V globálním měřítku má ale na svědomí tzv. globální oteplování, jelikož jeho koncentrace v atmosféře díky lidské činnosti rok od roku stále roste. Sám o sobě v malém množství není pro lidi nebezpečný, ale se zvyšující se koncentrací má za následek zpočátku bolesti hlavy, přecházející v utlumení nervových soustav a zhoršeného dýchání až po koncentraci 20 %, kdy může způsobit i smrt. [7]

1.2.1 Optický senzor

Oxid uhličitý lze měřit více způsoby. Nejpřesnější možností je optický senzor využívající infračervené světlo. Tento typ senzoru je založen na základě měření rozdílu intenzity infračerveného záření o dané vlnové délce. Přiváděný plyn je osvětlován infračerveným zářením, které je přítomnými molekulami oxidu pohlcováno a poté je přes reflexní vrstvu odraženo zpět do snímače, kde je umístěn pyrodetektor, který

převádí intenzitu tohoto světla na elektrický signál. Se vzrůstající koncentrací klesá intenzita světla dopadajícího na povrch pyrodetektoru. Tento princip měření je nej- přesnější, podává stabilní výsledky a má dlouhou životnost. Bohužel je velice drahý, a tak jej není možné použít v domácích zařízeních. [7]

1.2.2 Elektrochemický senzor

Tento druh senzoru pracuje na principu měření proudu vznikajícího reakcí sledovaného plynu s elektrolytem, který je obsažen uvnitř senzoru. Při konstrukci takového senzoru je třeba zvolit elektrody a elektrolyt tak, aby na jedné z elektrod docházelo k chemické reakci, která vyvolá změnu proudu. Tato změna je následně zesílena do měřitelné podoby, a odpovídá koncentraci oxidu uhličitého. Bohužel díky nutnosti chemické reakce několika přítomných látek není tento druh senzoru možné zkonztruovat pro dlouhou životnost. Spolu s tímto neduhem je zde také časová nestálost podávaných výsledků kvůli ubývání elektrolytu a opotřebení měřících elektrod. Životnost takového senzoru je tedy maximálně v řádu několika málo roků. [7]

1.2.3 Polovodičový senzor

Poslední a zároveň nejlevnější možností měření koncentrace oxidu uhličitého je použití polovodičových senzorů. Polovodičový přechod u těchto senzorů je vyroben tak, aby se při přítomnosti sledovaného plynu změnila jeho vodivost. Na základě této změny jsme poté schopni změřit napětí a proud na přechodu, čímž můžeme určit koncentraci CO_2 . Nevýhodou těchto systémů je jejich relativní nepřesnost a hlavně nelineární průběh měřeného signálu. Jsou ovšem díky své ceně snadno použitelné a dostupné v komerčně prodávaných detektorech do domácností a pro laická měření. Pro exaktní měření je ovšem nutná jejich častější kalibrace vůči známé koncentraci měřeného plynu. [7]

1.3 Měření intenzity osvětlení

Intenzita osvětlení se měří na základě fotoefektu. To znamená, že při dopadu elektromagnetického záření na látku dojde k uvolnění elektronů z této látky a naopak k pohlcení fotonů. Nejčastěji se pro tento jev používají polovodiče.

1.3.1 Fotodiody

Prvním z používaných typů senzorů jsou fotodiody. U nich se využívá vnitřního fotoelektrického jevu, který je pro polovodiče typický. Dopadem fotonů na PN přechod fotodiody dochází ke zvyšování procházejícího proudu diodou. Tento proud

jsme schopni následně měřit a vyhodnocovat. Fotodiody mají výhodu v jejich rychlé odezvě na skokovou změnu a citlivosti.

1.3.2 Fototranzistory

Dalším často používaným prvkem pro měření intenzity osvětlení jsou fototranzistory. Zde se využívá nejčastěji bipolární tranzistor NPN, který má volnou bázi. Při výrobě jsou konstruovány tak, aby fotony dopadly do oblasti báze a způsobily tak zvýšení protékajícího proudu tranzistorem. Díky tomu, že se díky fotonům řídí proud do báze tranzistoru, tak je tranzistor na světlo více citlivější než fotodioda. Nevýhodou fototranzistoru je shora omezené spektrum detekovaného světla a jeho pomalá reakce.

1.4 Měření UV záření

Měření UV (ultrafialové) záření probíhá v principu úplně stejně, jako měření intenzity osvětlení. Jediným podstatným rozdílem je vlnová délka záření, na které jsou dané senzitivní součástky nejvíce citlivé, viz obrázek 1.2.

1.4.1 UVA záření

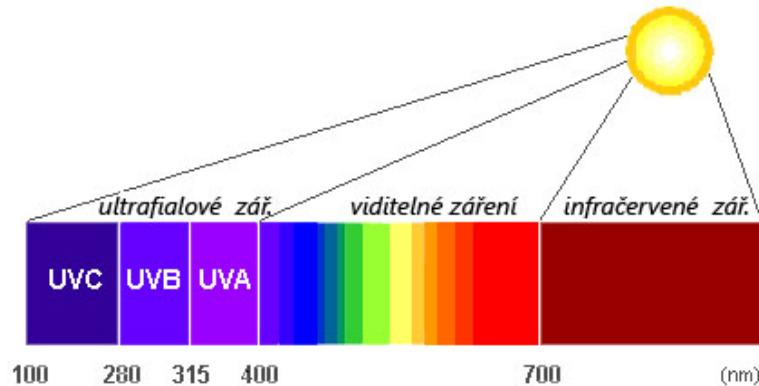
UVA záření je nejčastěji se vyskytující záření, které má rozsah vlnových délek mezi $315\text{ }\mu\text{m}$ do $400\text{ }\mu\text{m}$. Toto záření je zcela běžné přítomné všude kolem nás, jelikož dokáže projít zemskou atmosférou. Při běžném kontaktu s tímto zářením nám nehrozí žádné zdravotní problémy, ale nedoporučuje se trvalejší vystavení tomuto záření. Běžně se také využívá při procesech luminiscence či různých světelných efektech. Lidské oko jako takové jej není schopné vnímat, narozdíl od některých zvířat.

1.4.2 UVB záření

Dalším z UV záření, se kterým se můžeme setkat, je UVB záření s vlnovou délkou od $280\text{ }\mu\text{m}$ do $315\text{ }\mu\text{m}$. Toto záření je pro živé organismy zhoubné, jelikož dokáže rozkládat bílkoviny. Při dopadu do lidského oka dokáže způsobit oslepnutí, neblahý efekt má též na rostliny, u kterých ovlivňuje fotosyntézu, a také způsobuje jejich úhyn.

1.4.3 UVC záření

Posledním z těchto záření je UVC záření, které je, se svou vlnovou délkou menší než $280\text{ }\mu\text{m}$, nejtvrdším z těchto záření. Při kontaktu s kyslíkem začíná vznikat ozon



Obr. 1.2: Rozdělení záření podle vlnové délky [9].

a je silně karcinogenní pro všechny živé organismy. Díky své krátké vlnové délce dokáže proniknout relativně hluboko do všech organických materiálu a je tak velice nebezpečné. [8]

1.5 Měření teploty

Teplota je základní veličinou, která se dá ve spojitosti s ovzduším měřit. Pro tento účel se často používají materiály, které spolu s měnící se teplotou mění svůj odpor. Dvě nejčastější skupiny těchto materiálů jsou kovy a polovodiče. Kovy mají většinou kladný teplotní koeficient odporu, což znamená, že se vzrůstající teplotou roste i jejich odpor. Naopak druhou často používanou skupinou materiálů jsou polovodiče, které mají negativní teplotní koeficient, a tak jejich odpor s rostoucí teplotou klesá.

1.5.1 Kovové senzory

Pro potřeby obecného měření lze využít odporové senzory vyrobené z kovů. Vyznačují se poměrně vyrovnanou charakteristikou a také vysokým teplotním rozsahem. Tyto senzory se dále dělí na NTC (Negative Temperature Coefficient) a PTC (Positive Temperature Coefficient), podle toho, jestli mají negativní teplotní koeficient, nebo pozitivní. Například platinové teplotní čidlo je možné použít pro velký rozsah teplot, přibližně od -200°C do 800°C . Mezi jejich hlavní výhody patří již zmíněná linearita a odolnost při vysokých teplotách. Nevýhodami jsou nutnost přesného zpracování signálu díky menší citlivosti a také jejich tepelná kapacita, díky které nejsou schopny rychle reagovat na změnu teploty.

1.5.2 Termočlánky

Další z možností měření, založené na kovech, jsou termočlánky. Ty pracují na základě Seebeckova jevu, kde při spojení dvou různých kovů dochází při změně teploty k vygenerování malého napětí, které jsme schopni po zesílení dále měřit. Jejich velkou výhodou jsou malé rozměry a odolnost i při relativně vysokých teplotách (tisíce °C). Jsou tedy vhodné do aplikací, kde je potřeba velký rozsah teplot a zároveň jsme limitováni maximálními rozměry.

1.5.3 Polovodičové senzory

Polovodiče obecně jsou závislé na teplotě, takže je lze použít pro měření teploty. Jejich charakteristika ovšem většinou není lineární a závisí na Shockleyho rovnici:

$$I_A = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_A}{n \cdot \frac{k \cdot T}{q}}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

kde I_A je proud procházející polovodičem, I_S je saturační proud, q je elementární náboj elektronu, U_A je difúzní napětí, n je emisní koeficient, k je Boltzmannova konstanta a T je teplota přechodu polovodiče.

Nejvíce lineární, a zároveň časově stálou závislost na teplotě, má varikap. Pro orientační měření (např. sepnutí aktivního chlazení) lze použít i diodu či tranzistor, který se umístí na společný chladič s výkonovými prvky a následně lze díky změně proudu jimi procházejícím řídit následnou logiku.

Díky stále dokonalejším výrobním procesům pro integrované obvody lze integrovat teplotní senzory přímo na čip. Přímo na tomto čipu tak může být nejen teplotní senzor, ale i např. operační zesilovač či řídící čip pro digitální komunikační rozhraní. [10] [11]

1.6 Měření vzdušné vlhkosti

Vzdušná vlhkost je přítomná všude okolo nás, a je definována jako množství nasycení vzduchu vodními parami. Sledovat tuto veličinu je důležité jednak pro člověka, ale i kvůli elektronice a jiným strojům. Uvažujeme-li teplotu 0 °C a malou vlhkost, bude to pro nás mnohem příjemnější, než stejná teplota a vlhkost téměř 100 %. Pro elektroniku a stroje je poté vlhkost důležitá kvůli jejímu správnému fungování, případně můžou při vysoké vlhkosti začít vodní páry kondenzovat a způsobit zkrat či při dlouhodobém působení výrazně urychlit oxidaci materiálů.

Její měření se většinou realizuje pomocí součástek založených na principu kondenzátorů. Taková součástka má dvě pevné elektrody, na kterých jsme schopni měřit napětí a také dielektrikum, které je realizováno pomocí materiálu, který je schopen

absorbovat molekuly vody. Tímto způsobem jsme tedy schopni ovlivnit výslednou kapacitu daného kondenzátoru. Při nasycení dielektrika vodními parami se změní kapacita, což jsme schopni změřit a vyhodnocovat. Toto nasycení je poté úměrné vodním parám obsaženým v měřeném prostředí. Běžně se jako dielektrikum používají plasty či polymery s dielektrickou konstantou 2 až 15. [12]

1.7 Měření atmosférického tlaku

Pro měření atmosférického tlaku se nejčastěji používá měřidel založených na principu vytlačování kapaliny do předem známého prostoru se stupnicí vlivem působící síly. Měřidla založena na těchto principech jsou v meteorologii stále hojně používána díky jejich jednoduchosti a velmi vysoké přesnosti. Ovšem takováto měřidla se hodí jen pro ruční odečítání, jelikož je nelze nijak zautomatizovat.

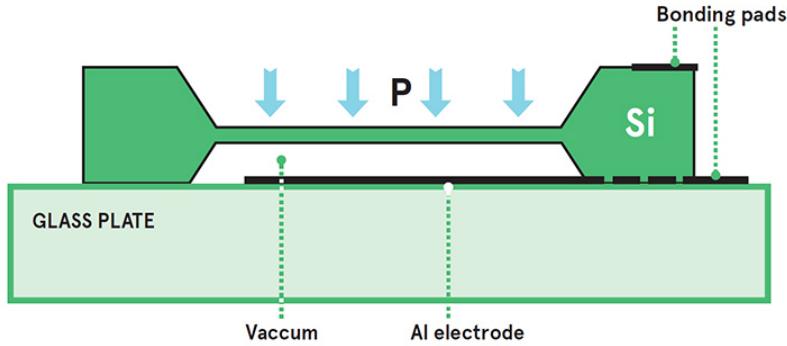
1.7.1 Piezoelektrické senzory

Jednou z možností, jak vyrobit elektronický senzor na měření tlaku, je využít piezoelektrického jevu. Tento jev se vyskytuje nejčastěji v krystalech křemíku, kde při působení síly (v tomto případě atmosférického tlaku) je díky mírné deformaci krystalu vygenerováno velice malé napětí, které úměrné aplikované síle. Toto napětí jsme schopni po adekvátním zesílení jednoduše změřit a pokud známe strukturu použitého krystalu, tak i zpětně přepočítat na původní působící tlak.

1.7.2 MEMS senzory

V dnešní době jsou velice rozšířené tzv. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) senzory. Jsou založeny na principu spojení mikro-mechanického principu s elektrickým principem. Nejčastěji je pro měření tlaku při tomto principu využíváno vlastnosti kondenzátorů či piezoelektrického efektu.

Při využití principu kondenzátoru je jedna z elektrod pevně spojená s pouzdrem, a následně je druhá elektroda upevněna nad tuto první, tím vznikne kondenzátor, jak je vidět na obrázku 1.3. Druhá elektroda je mechanicky vyrobena tak, aby měla přístup k okolnímu prostoru a mohlo na ni tudíž působit okolní atmosférický tlak. Díky jeho působení se začne prohýbat a přibližovat druhé elektrodě, čímž se mění celková kapacita tohoto kondenzátoru a tu jsme schopni následně měřit a na jejím základě určit působící atmosférický tlak. [13]



Obr. 1.3: MEMS kapacitní senzor tlaku [14].

1.8 IoT sítě

IoT (Internet of Things) sítě jsou uzpůsobeny pro přenos relativně krátkých datových zpráv na velmi velké vzdálenosti a to vše při zachování nízké spotřeby. Dosah je většinou určen podle nosného kmitočtu, na kterém přenos funguje, podle dostupné šířky pásmo pro náš přenos a také vhodně zvolenou modulací. Tyto sítě se většinou nazývají jedním sdruženým pojmem LPWAN (Low Power Wide Area Network). Do této kategorie se řadí především technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT. První dvě zmíněné pracují v bezlicenčním pásmu, kdežto poslední využívá licenční pásmo. Bezlicenční pásmo jsou u nás regulovány ČTÚ¹ a jejich omezení zpravidla spočívá v maximálním vyzářeném výkonu a také klíčovacím poměru. Ten určuje, jaké maximální procento daného času smíme použít pro vysílání. V následujících částech práce se budu věnovat těmto třem sítím podrobněji.

1.8.1 LoRa

LoRa (Long Range) je fyzická vrstva, kterou využívá síť LoRaWAN a jak již bylo zmíněno, je určena v Evropě převážně pro provoz v bezlicenčním ISM pásmu 868 MHz (dnes je možný přenos i v pásmu 2,4 GHz). Tato vrstva samotná je využitelná pro komunikaci mezi dvěma zařízeními bez existence jakékoli sítě. Mnohem častěji ale narazíme na zapojení všech komunikujících zařízení do jednotné sítě, která všechna zařízení sdružuje a umožňuje tak pokrytí mnohem většího území. LoRa využívá CSS modulaci (Chirp Spread Spectrum), která umožňuje zvýšení dosahu oproti například FSK modulaci. Využívá se rozptrostřeného pásmo pro šíření signálu, což jej činí odolným proti rušení. Protože je využito těchto rozprostřených frekvencí, tak je signál i odolný vůči vícecestnému šíření. Na obrázku 1.4 je vidět příklad průběhu amplitudy rozloženého spektra v závislosti na čase.

¹Český telekomunikační úřad <https://www.ctu.cz/>



Obr. 1.4: Ukázka průběhu rozprostřeného spektra v čase.

1.8.2 LoRaWAN

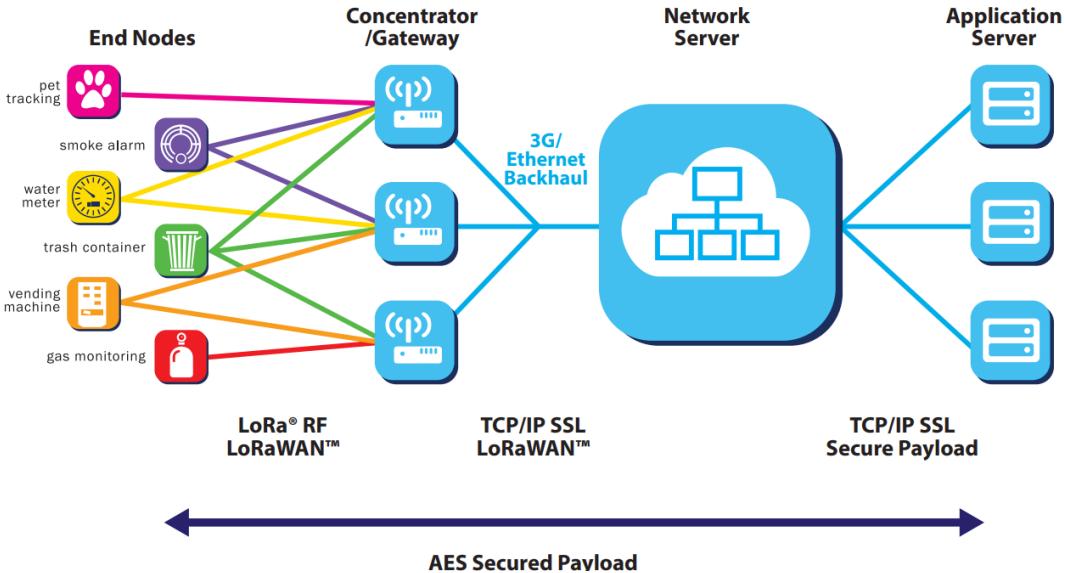
LoRaWAN definuje princip komunikační sítě a také použitý protokol, pro svou komunikaci využívá již výše zmíněnou fyzickou vrstvu LoRa. Nejčastěji se využívá zapojení sítě do hvězdy, což umožňuje jednoduše škálovat dostupnost sítě. Pro fungování sítě je potřeba server, který bude zpracovávat všechny příchozí zprávy a následně na ně reagovat, dále jsou třeba jednotlivé tzv. gateway, což jsou zařízení, na které se připojují koncoví klienti (naše IoT zařízení). Na obrázku 1.5 je vidět příklad zapojení takovéto sítě. Je patrné, že koncová zařízení nemají pevně přiřazenou gateway na kterou se mají připojit, ale vysílají signál, který následně může přijmout libovolný počet těchto bran. Server, který tyto přijaté zprávy zpracovává, tak musí filtrovat případné duplicitně přijaté zprávy. Tím, že zařízení vysílá zprávu "do neznáma" a nemusí řešit přihlašování k přístupovému bodu, případně do sítě, tak se tím zkracuje doba potřebná k vysílání a vede to k další úspore energie.

V dnešní době je čím dál tím víc nutné zajistit bezpečnost takto přenášených zpráv. U LoRaWAN je využit šifrovací algoritmus AES (Advanced Encryption Standard), kdy je po celou dobu přenosu zprávy od koncového zařízení až na aplikační server, který data zpracovává, jím zpráva zašifrována.

Pro připojení zařízení lze využít existující komerčně nabízené sítě od např. Českých Radiokomunikací² nebo open source sítě provozované komunitou, kde nejznámější je TTN (The Things Network)³. I v této komunitní síti však platí omezení, pokud chceme síť využívat zdarma. Jsme limitován na maximální vysílací čas 30 s

²<https://www.cra.cz/prijeni-k-iot-siti-lorawan>

³<https://www.thethingsnetwork.org/>



Obr. 1.5: Typické zapojení LoRaWAN sítě [16].

pro uplink a maximálně 10 zpráv na downlink pro jednu node (zařízení) na den [15]. Hlavní výhodou však je možnost přidat vlastní gateway a poskytovat tak připojení nejen pro sebe, ale i pro ostatní uživatele v okolí.

1.8.3 Sigfox

Síť Sigfox pochází z Francie a je docela podobná technologii LoRaWAN. Je opět určená pro malý přenos dat ze sledovaných zařízení skrze nelicencované frekvenční pásmo. Oproti LoRaWAN má ovšem nevýhody a to, že je třeba za přenos zpráv platit poskytovateli a provozovateli sítě. Síť totiž u nás spravuje jediný poskytovatel⁴, ke kterému se musíme zaregistrovat a on nám poté poskytne připojení a přenos zpráv skrze jeho síť. Výhoda tohoto řešení může být v mnohem větším pokrytí daného území a odpadnutí nutnosti řešit vlastní gateway či server na zpracování přijatých dat.

Přenos u nás probíhá v pásmu 868 MHz se šírkou spektra 192 kHz, kde každý kanál má přiřazenou šířku 100 Hz. Vysílání zpráv probíhá na třech kanálech s drobným časovým odstupem, čímž se zvyšuje šance na zachycení takto vyslané zprávy. Pokrytí na našem území je zajištěno ve spojení s operátorem T-Mobile, čímž dosáhli umístění gateway na strategická místa. Dle jejich webových stránek uvádí pokrytí území v květnu 2022 94 % rozlohy ČR. [17].

⁴SimpleCell Networks a.s. (<https://sigfox.cz/cs>)

1.8.4 NB-IoT

Síť NB-IoT (Narrowband Internet of Things) je LPWAN síť, kde její standardy definiuje partnerský projekt 3GPP [18]. I u tohoto typu sítě je opět snaha minimalizovat velikosti posílaných zpráv, mít co největší dosah a to vše za udržení minimálních energetických nároků. Díky tomu, že lze síť provozovat na již existující infrastruktuře LTE vysílačů, je zde možnost velmi rychlé implementace a její nasazení na velké oblasti, stačí totiž softwarová aktualizace vysílačů. U nás tuto síť provozuje mobilní operátor Vodafone právě v pásmu LTE. Síť NB-IoT využívá pouze 200 kHz pásma a tak může existovat vedle již existujících sítích pro mobilní telefony. V důsledku použití licencovaného pásma nejsme omezeni na vysílací čas a také je možné vysílat mírně vyšším výkonem, než v bezlicenčním pásmu ISM. Je však nutné mít podporovaný modul od operátora a vlastnit jeho SIM kartu pro připojení do sítě. Bohužel momentálně není možné získat tyto SIM karty pro nekomerční využití, nabízí je totiž jen firemním zákazníkům.

Do budoucna mají tyto sítě velký potenciál právě díky jejich rychlému nasazení a využití stávajících sítí. Jsou energeticky méně náročné než mobilní datové komunikace přes GSM či LTE avšak dosahují relativně velkých rychlostí až stovky kbit/s.

1.8.5 WiFi

Jednou z možných sítí pro připojení zařízení a přenášení dat na server je i WiFi síť. Nedá se zde mluvit o plnohodnotné síti pro IoT, jelikož není pro tyto účely primárně určená, ale v případě její dostupnosti je možnost ji využít. Zařízení se připojuje jako klient k přístupovému bodu a po úvodní komunikaci a přidělení IP adresy je možné se připojit na aplikační server a zasílat data.

Hlavní nevýhodou této sítě je vysoká energetická náročnost, právě díky výše zmíněné nutnosti získání IP adresy a velkému množství přenášených dat. Další z relativně velkých nevýhod je malý dosah při pokryvání. Využití této sítě pro IoT zařízení má smysl pouze v již pokryté oblasti jako jsou například budovy či domácnosti.

2 Návrh zařízení

Tato kapitola se zabývá návrhem hardwaru celého zařízení. Jedním z hlavních požadavků je nízká spotřeba, kterou je třeba zohlednit při vybírání použitých senzorů, řídícího mikroprocesoru, komunikačního modulu a ostatních obvodových komponent.

2.1 Výběr senzorů

Celé zařízení je schopno měřit koncentraci prachových částic, koncentraci oxidu uhličitého, intenzitu osvětlení, intenzitu UV záření, teplotu, atmosférický tlak a relativní vlhkost vzduchu. V následujících částech je popsán výběr z dostupných senzorů.

2.1.1 Senzor koncentrace prachových částic

Na trhu je dostupných hned několik senzorů na měření koncentrace prachových částic. Jak již bylo zmíněno v teoretickém úvodu, budu vybírat senzor, který tuto koncentraci určuje na základě osvícení daného vzorku vzduchu a následně měření odraženého světla. Nyní vyvstává otázka, jestli zvolit senzor, který bude vzorek vzduchu vhánět do měřícího prostoru nuceně pomocí ventilátoru nebo jen za využití stoupání teplého vzduchu nahoru. V tabulce 2.1 jsou uvedeny senzory, které jsou relativně cenově přijatelné a daly by se pro neprofesionální měření využít.

Tab. 2.1: Porovnání vybraných parametrů senzorů koncentrace prachových částic.

Název	Rozlišení	Přesnost	Proud	Čas čtení
PMS5003 [19]	$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$0 - 100 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 10 \mu\text{g}$ $100 - 500 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 10 \%$	100 mA	10 s
PM1003 [6]	$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$0 - 100 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 30 \mu\text{g}$ $100 - 500 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 30 \%$	90 mA	30 s
PM1006 [20]	neuvedeno	$0 - 100 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 20 \mu\text{g}$ $100 - 500 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 20 \%$	30 mA	8 s
GP2Y1010AU0F [21]	$0,5 \text{ V}/100 \mu\text{g m}^{-3}$	záleží na ADC	20 mA	1 s

Po pečlivém prostudování jednotlivých parametrů jsem zvolil senzor PMS5003 od firmy PLANTOWER. Důležitým aspektem při výběru byla také cena tohoto senzoru, v době vypracovávání této práce jej šlo pořídit za zhruba 350 Kč. Dalším důležitým parametrem byla spotřeba proudu v aktivním stavu. Na první pohled se může zdát, že oproti všem senzorům má spotřebu nejvyšší. Oproti PM1003 má však



Obr. 2.1: Senzor pro měření koncentrace prachových částic PMS5003 [19].

třetinový čas potřebný k získání měřených dat, takže spotřebovává sice vyšší proud, ale po kratší časový úsek. PM1006 má spotřebu proudu zhruba třetinovou, ale vzorek měřeného vzduchu se do měřícího prostoru dostává pomocí sálání a tak je nutné zajistit konstrukčně dostatečně a správně dimenzované průduchy a také konstantní polohu a hlavně náklon senzoru, což by mohlo být v praxi téměř nemožné, pokud má být zařízení používáno také ve volném prostranství. Poslední ze senzorů v tabulce 2.1 má zdánlivě nejlepší výsledky. Bohužel se jedná pouze o měřící modul samotný, který neobsahuje žádný ventilátor ani řídící logiku, je tedy třeba tyto věci zapojit a konstrukčně vyřešit. Nejjednodušší na obvodové zapojení, a i z hlediska parametrů přesnosti nejlepší, se tak jeví již zmíněný senzor PMS5003. Senzor potřebuje pro svou funkci napájení 5 V a komunikuje přes rozhraní UART.

2.1.2 Senzor oxidu uhličitého

U senzorů oxidu uhličitého je situace o něco složitější. Na trhu neexistuje mnoho možností, ze kterých by se dalo v rozumné cenové kategorii vybrat čidlo pro amatérské použití. Většina těchto čidel je založena na optickém principu a jejich cena začíná na jednotkách tisíc korun. Tato cena je pro neprofesionální měření neakceptovatelná. Jedním z mála senzorů dostupných pro amatérské účely jsou senzory od firmy Sensirion¹ a to konkrétně senzor SGP30. Tento senzor pracuje na elektrochemickém principu a umožňuje měřit ekvivalentní hodnotu CO₂ a také hodnotu TVOC

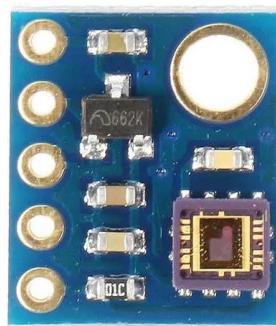
¹<https://sensirion.com/>

(Total Volatile Organic Compounds). Senzor potřebuje pro svou funkci napájení z 1,8 V a komunikuje s řídícím mikrokontrolerem skrze sběrnici I2C.

2.1.3 Senzor UV záření

Na poli relativně levných UV senzorů je výběr opět o něco horší. Existují v podstatě dvě varianty použitelné pro neprofesionální měření a to senzor VEML6075 od výrobce VISHAY a senzor ML8511 výrobce LAPIS Semiconductor. Bohužel první ze zmíněných senzorů se nedá rozumně sehnat, skladové zásoby jsou vyprodané a několik obchodů udává, že se již nevyrábí.

Volím tedy druhý zmíněný senzor ML8511. Tento senzor měří pouze intenzitu UV záření pomocí fotodiody, která je citlivá na UVA a UVB záření. Její největší citlivost je dle katalogového listu [22] na vlnovou délku 365 nm. Pro svou činnost potřebuje napájení 3,3 V a během měření je jeho maximální spotřeba 500 μ A. Pokud jej uvedeme pomocí pinu EN do režimu standby, tak může být spotřeba maximálně 1 μ A. Výstup senzoru je opět napěťový, takže musíme jeho výstup přivést na AD převodník. Rozsah těchto napětí je zhruba od 1 V do 3 V, což odpovídá rozsahu 0 až 15 mW cm^{-2} .



Obr. 2.2: Senzor pro měření intenzity UV záření ML8511. [1]

2.1.4 Senzor teploty

Na poli senzorů pro měření teploty existuje nepřeberné množství různých druhů od spousty výrobců. Pro první základní výběr vhodných senzorů je nutné si definovat alespoň základní parametry a požadavky na takovýto senzor. Vhodnými parametry jsou cena, rozsah měřených teplot (je třeba měřit i při teplotách nižších než 0 °C), spotřeba a přesnost. Srovnání potenciálně použitelných senzorů se nachází v tabulce 2.2. Cena uvedená v posledním sloupci je brána v jeden den z jednoho e-shopu², aby bylo možné objektivně porovnat výsledky mezi sebou.

²<https://www.laskarduino.cz/>



Obr. 2.3: Senzor pro měření teploty SHT40 [28].

Z tabulky 2.2 jsem nakonec pro svou práci vybral senzor SHT40 od výrobce SENSIRION. Bohužel není úplně nejlevnější, ale vybral jsem jej díky jeho nízké spotřebě $350\text{ }\mu\text{A}$ při měření a až $3,4\text{ }\mu\text{A}$ v nečinném stavu a také relativně vysoké přesnosti, která je až $0,2^\circ\text{C}$. Napájení senzoru je $3,3\text{ V}$. S mikroprocesorem senzor komunikuje pomocí sběrnice I^2C .

2.1.5 Senzor intenzity osvětlení

Na poli senzorů pro měření intenzity osvětlení existuje hned několik dostupných variant. Liší se převážně způsobem, jakým intenzitu měří a pak také rozsahem, pro které je možné jejich použití. Pro orientační měření lze využít i prostého fotorezistoru, který zapojíme společně s odporem do série a vytvoříme si tak napěťový dělič, na kterém budeme měřit pomocí AD převodníku analogové napětí. Tento typ měření je však silně závislý na použitém typu fotorezistoru a většinou nebývá moc přesné. Využití této metody je spíše pro účely orientačního měření a určení základních informací a to, jestli je tma či jestli je světlo.

Dalším z možných typů senzorů je využití fototranzistoru nebo fotodiody. Toto

Tab. 2.2: Srovnání parametrů vybraných senzorů teploty.

Název	Rozsah	Přesnost	Spotřeba	Cena
DS18B20 [23]	-55°C až 125°C	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	$1,5\text{ mA}$	68 Kč
LM75A [24]	-25°C až 100°C	$\pm 2^\circ\text{C}$	$280\text{ }\mu\text{A}$	25 Kč
SHT31 [25]	-40°C až 90°C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	$350\text{ }\mu\text{A}$	158 Kč
SHT35 [26]	-40°C až 90°C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$1,5\text{ mA}$	378 Kč
SHT40 [27]	-40°C až 125°C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$350\text{ }\mu\text{A}$	109 Kč

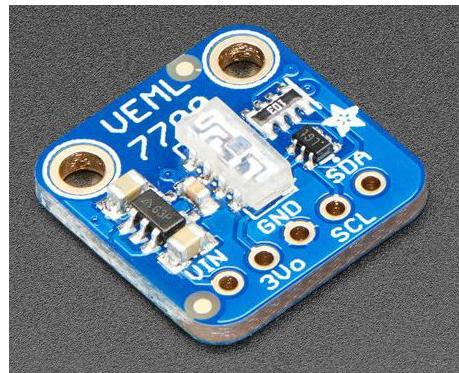
měření je přesnější než předchozí zmíněná metoda, ale vyžaduje znalost přechodové charakteristiky součástky a pro přesnější měření i kalibraci vůči známé referenční hodnotě intenzity osvětlení.

Mnohem vhodnějším typem senzorů pro toto konkrétní použití je tak integrovaný senzor, který obsahuje jednak samotnou na světlo citlivou vrstvu a druhak i řídící logiku, která nám poskytuje digitální výstup ze senzoru například ve formě sériové sběrnice. V tabulce 2.3 jsou uvedeny vybrané druhy integrovaných senzorů a jejich základní vlastnosti.

Tab. 2.3: Srovnání parametrů vybraných senzorů intenzity osvětlení.

Název	Rozsah	Spotřeba
GY-302 BH1750 [29]	0-65 535 lx	200 μ A
TSL2561 [30]	0-40 000 lx	0,6 mA
VEML7700 [31]	0-120 000 lx	50 μ A

Z těchto vybraných dostupných senzorů jsem zvolil poslední z tabulky VEML7700. Tento senzor má velmi nízkou spotřebu i při nejrychlejším cyklu čtení (100 ms) a největší rozsah možného měření. Při porovnání cen se nachází zhruba ve stejné cenové hladině jako druhý nejlepší z této tabulky GY-302 BH1750. S mikrokontrolerem senzor bude komunikovat pomocí sběrnice I²C a napájen bude z 3,3 V.



Obr. 2.4: Senzor pro měření intenzity osvětlení VEML7700 [32].

2.1.6 Senzor atmosférického tlaku

Posledním z potřebných senzorů je senzor pro měření atmosférického tlaku. Existuje několik senzorů, které integrují do jednoho pouzdra měření teploty, vlhkosti i atmosférického tlaku. Tyto senzory se však vyznačují nižší přesností. Jedním z takovýchto senzorů je například BME280 od výrobce Bosch, který je populární mezi kutily při

stavění amatérské domácí meteostanice. Bohužel poslední dobou není dostupný skladem v žádném z velkých obchodů a pokud se někde vyskytne, stojí několikanásobek jeho normální ceny a je tak pro tuto práci nepoužitelný.

Budu tedy porovnávat senzory, které měří pouze atmosférický tlak a jsou dostupné a mají relativně nízkou cenu.

Tab. 2.4: Srovnání parametrů vybraných senzorů atmosférického tlaku.

Název	Rozsah	Přesnost	Spotřeba
BMP180 [33]	300-1100 hPa	± 3 Pa	12 μ A
BMP280 [34]	300-1100 hPa	$\pm 1,3$ Pa	2,7 μ A
BMP388 [35]	300-1250 hPa	± 8 Pa	3,4 μ A
BME280 [36]	300-1100 hPa	± 2 Pa	7,1 μ A
ICP-10100 [37]	300-1150 hPa	$\pm 3,2$ Pa	10,4 μ A

Jak je uvedeno v tabulce 2.4, je vidět že většina senzorů atmosférického tlaku je od výrobce Bosch Sensortec. Vyskytuje se zde již zmínovaný BME280, který je ale moc drahý a momentálně nedostupný a při měření tlaku má jednu z vyšších spotřeb. Dalším ideálním adeptem by byl i senzor BMP280, který umožňuje měřit atmosférický tlak i teplotu. Bohužel ani tento senzor není příliš dostupný a dle oficiálních stránek výrobce již není doporučen pro nové návrhy.

Vybral jsem tedy senzor BMP388 od firmy Bosch Sensortec. Nepatří bohužel mezi nejlevnější, ale zato je dostupný v obchodech a poskytuje vzhledem ke své dostupnosti relativně dobré parametry samotného měření. Stejně jako dříve zmíněné senzory, i tento senzor umožňuje kromě atmosférického tlaku měřit i teplotu. Pro komunikaci s mikrokontrolerem lze použít sběrnici I²C nebo SPI, jelikož je většina vybraných senzorů na sběrnici I²C, použije stejnou sběrnici i pro tento senzor. Napájení je třeba přivést 3,3 V.

2.1.7 Senzor měření vlhkosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole o výběru senzoru pro měření teploty, vybraný senzor SHT40 umožňuje měřit i vzdušnou vlhkost. Rozsah měření je 0-100 % relativní vlhkosti s přesností $\pm 1,8$ %. Pro potřeby měření relativní vzdušné vlhkosti v této práci jsou tyto parametry s přehledem dostatečné.

2.2 Výběr řídícího mikrokontroléru

Mikrokontroler je hlavním řídícím prvkem celého zařízení. Při jeho výběru je nutné dbát na spousty mnohdy protichůdných parametrů. Jedním z hlavních a nejdůležitě-

tějších parametrů jsou požadavky na hardwarové periferie a celkově výbavu daného mikrokontroleru. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách této práce, je nutné všechny senzory připojit pomocí různých sběrnic či zajistit AD převodník pro připojení analogových výstupů ze senzorů. Také je třeba dbát na dostatečný počet vstupně-výstupních pinů.

V dnešní době má spousta mikrokontrolerů přímo v sobě integrovanou rádiovou část, takže jsou schopny se připojit např. na WiFi, komunikovat s ostatními zařízeními přes Bluetooth či posílat zprávy přes LoRa síť. Toto řešení zjednodušuje návrh výsledného zařízení a také dokáže snížit výrobní náklady, jelikož je vše obsaženo v jednom čipu a není třeba osazovat několik samostatných čipů. Zároveň snižuje pravděpodobnost chybného návrhu nebo eliminuje další možný zdroj poruch, jelikož každý další použitý čip na desce a spojení k němu je možným zdrojem problémů.

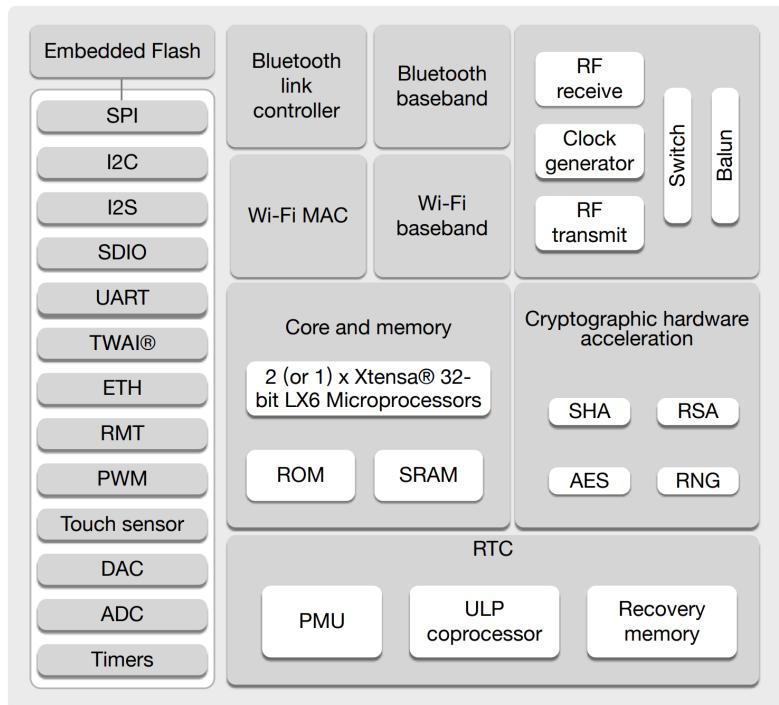
Pro výběr v této práci budu uvažovat výběr mikrokontrolerů od největších výrobců jako jsou STMicroelectronics, Atmel (dnes Microchip) nebo Espressif Systems. Existuje samozřejmě spousta dalších výrobců, ale tihle uvedení jsou jedni z největších, nejznámějších a nejdostupnějších. Porovnání ceny v tabulce 2.5 je provedeno v jeden den z jednoho obchodu³ pro možnost objektivního posouzení. Do tabulky pro srovnání jsem vybral pouze nejdůležitější parametry daných mikrokontrolerů jako jsou hardwarové periferie pro sběrnice, počet GPIO (vstupně-výstupních pinů), přítomnost WiFi rozhraní a cenu.

Tab. 2.5: Srovnání parametrů vybraných mikrokontrolerů.

Název	I ² C	SPI	GPIO	USART	WiFi	Cena
ATmega328P [38]	1	1	23	1	Ne	70 Kč
ESP32 WROOM [39]	2	4	34	3	Ano	80 Kč
ATSAM4LC2 [40]	2	1	27	3	Ne	90 Kč
STM8L162R8T6 [41]	1	2	54	3	Ne	110 Kč
STM32L051C8T6 [42]	2	2	37	2	Ne	180 Kč

Z výše uvedené tabulky 2.5 jsem nakonec vybral mikrokontroler ESP32 WROOM od výrobce Espressif Systems. Z hlediska ceny není nejlevnější, ale pokud se podíváme na parametry, které za tuto cenu nabízí, tak je to bezkonkurenční nabídka. Mikrokontroler samotný obsahuje kromě výše zmíněných parametrů i rádiovou část ve které je obsažena WiFi a Bluetooth, takže pro bezdrátové spojení není třeba použít žádný další modul. Mikrokontroler pracuje až na frekvenci 240 MHz a obsahuje dvě jádra, takže je možné velmi rychle paralelně zpracovávat data. Mikrokontroler samotný je navržen pro IoT aplikace, takže je dbáno na velmi nízkou spotřebu

³<https://www.tme.eu/cz/>



Obr. 2.5: Blokový diagram mikrokontroleru ESP32 [39].

při práci i v mnoha režimech spánku, které je možné aktivovat. Hlavní dvě jádra mikrokontroleru jsou doplněna o tzv. ULP (Ultra Low Power) koprocessor, který je možné aktivovat v režimu spánku a vykonávat tak velice jednoduché sekvence příkazů a ovládat například výstupní piny. Na obrázku 2.5 je vidět blokové schéma struktury mikroprocesoru ESP32 včetně všech jeho hardwarových periferií. Celý mikrokontroler je třeba napájet napětím 3,3 V a zdroj musí být schopen dodat alespoň 500 mA, tato hodnota je relativně vysoká, ale je to způsobeno potřebou vyššího příkonu při vysílání přes WiFi.

2.2.1 Analogově digitální převodník

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách o výběru senzorů, bude potřeba zajistit analogové vstupy na mikrokontroleru. Bohužel ESP32 nemá příliš přesný AD převodník a je třeba provádět poměrně náročnou kalibraci pro každý zakoupený čip zvláště, jak je zmíněno přímo v oficiální dokumentaci⁴. Nelze provádět ani kalibraci na jednom daném vzorku pro danou výrobní sérii.

Kvůli této výše uvedeným důvodům jsem se rozhodl pro tuto práci využít externí AD převodník, čímž by se měla zvýšit přesnost měření a zajistit reprodukovatelné výsledky při použití jiného mikrokontroleru. Hlavním požadavkem na výběr

⁴<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>

tohoto převodníku byla cena, dostupnost a spotřeba. Pro tuto práci je zapotřebí převodník, který bude moci být napájen z 3,3 V a bude mít alespoň 2 vstupní kanály. Těmto požadavkům nejlépe vyhověl AD převodník MCP3202 od firmy Microchip Technology Inc. [43]. Obsahuje dva kanály s rozlišením 12 bitů. Připojení k mikrokontroleru je provedeno přes sběrnici SPI a maximální spotřeba při čtení je zhruba 320 μ A.

2.3 Přenos dat na server

Pro přenos naměřených dat na server je k dispozici celá řada možností, jak to provést. Jelikož budou data zpracovávána na serveru, který je dostupný přes síť internet, je třeba zajistit, aby tam data byla poslána. Pro první pokusy bude nejjednoduší použití sítě WiFi, do které se lze se zařízením jednoduše připojit a poté se také připojit na aplikační server. Toto řešení je ovšem nevhodné pro použití kdekoliv mimo obydlené oblasti či oblasti, kde máme pokrytí svou vlastní WiFi, protože se nelze spoléhat na to, že v daném místě potřeby bude nějaká např. veřejná síť. Dalsí z nevýhod této technologie je její relativní energetická náročnost, jelikož je třeba vysílat na frekvenci 2,4 GHz a po připojení musí zařízení získat IP adresu, což nějakou dobu trvá a poté může teprve probíhat komunikace. Jelikož však síť internetu a její protokoly nejsou uzpůsobeny na redukci datového toku, je celý přenos výrazně delší než vyslání zprávy např. přes síť LoRaWAN, což má opět negativní dopad na spotřebu energie.

Z výše uvedených důvodů se hodí využití jiné sítě, která je pro tato IoT zařízení přizpůsobená, je méně energeticky náročná a umožňuje připojení zařízení na řadově větší vzdálenosti. Jako nejjednoduší se jeví použití sítě LoRa. Pro tuto síť existuje na trhu mnoho komunikačních modulů, které jsou i relativně cenově přijatelné. Síť jako taková není zatížena licenčními poplatky. Je zde však možnost využití již existující infrastruktury od nějaké firmy (u nás například České Radiokomunikace a.s.⁵), kde se poté platí poplatky za využívání připojení k jejich síti či případné další služby.

Pokud chceme připojit zařízení přes LoRaWAN, ale nechceme být zavázání poskytovateli služeb a platit poplatky, je možnost použít některou z dostupných sítí, které jsou zdarma. Většinou se zde vyskytují omezení např. v počtu přenesených zpráv za daný čas nebo počet připojených zařízení. Jednou z nejznámějších sítí je TTN (The Things Network⁶). Princip této sítě je postaven na infrastruktuře, kterou do sítě připojují samotní uživatelé a tato služba je koncentruje na jeden server. Uživatelé tak mají možnost připojovat svoje vlastní gateway a poté libovolně v dosahu

⁵<https://www.cra.cz/pripojeni-k-iot-siti-lorawan>

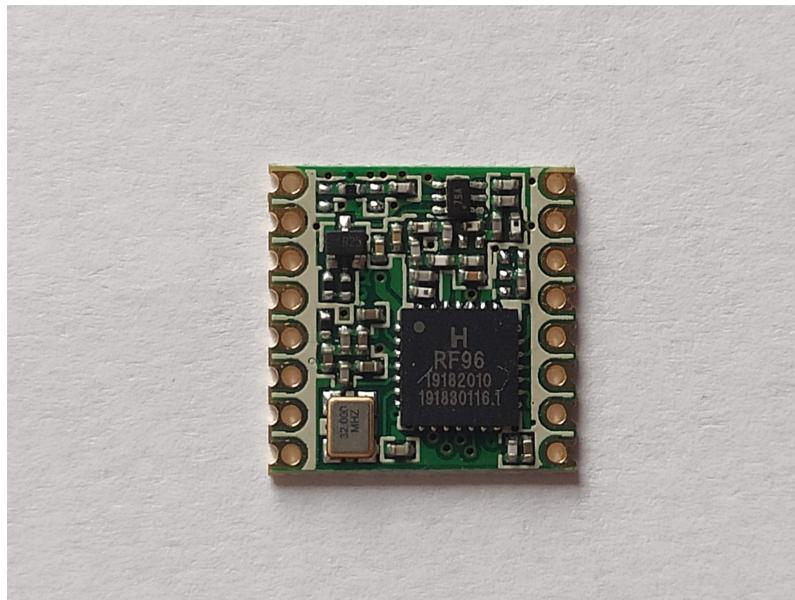
⁶<https://www.thethingsnetwork.org/>

jakékoli jiné gateway připojené do sítě přenášet data ze svých zařízení.

2.3.1 Výběr LoRa modulu

Pro výběr LoRa modulu bude nejdůležitějším parametrem cena a dostupnost. Na našem území je dle ČTÚ a její národní kmitočtové tabulky [44] povoleno provozovat LoRa zařízení v ISM pásmu 868 MHz. Toto je také třeba zohlednit při výběru vhodného modulu. Dalším z kritérií byla dostupnost kvalitní dokumentace a také jestli existují příklady k použití daného modulu.

Daným kritériím bezesporu vyhověl modul s označením RFM95W [45], založený na čipu RF96. Jak již bylo zmíněno, modul pracuje na frekvenci 868 MHz a nejvyšší možný výkon vysílače je 20 dBm. Modul pro své fungování potřebuje napájení 3,3 V a při běžném vysílání výkonem 7 dBm a dokonale přizpůsobené anténě na impedanci 50Ω je jeho spotřeba 20 mA. Pro připojení k mikrokontroleru je zapotřebí sběrnice SPI a alespoň 1 GPIO (ideálně s podporou přerušení), jelikož modul umožňuje při přijetí dat ze sítě změnit logickou hodnotu na tomto pinu a tím dát hlavnímu mikrokontroleru vědět, že má přijatá data přečíst a zpracovat.



Obr. 2.6: LoRa modul RFM95W.

2.4 Napájení zařízení

Celé zařízení ke své funkci potřebuje primárně napětí 3,3 V. Toto napětí bude bráno přímo z baterie LiFePO₄, která má při plném nabití 3,6 V. Vyšší napětí ničemu nevadí, jelikož všechny použité senzory a komponenty mají povolené napětí mezi

3 V až právě 3,6 V. Toto napětí tedy bude přivedeno do zařízení přes tranzistor jako ochrana proti přepólování baterie, spínací tranzistor pro sepnutí celého zařízení a pojistku. Tímto v podstatě přímým připojením mikrokontroleru a jednotlivých senzorů na baterii může být dosaženo výrazné úspory energie při režimu spánku. Lineární stabilizátory i spínané měniče pracují s jistou účinností, ta je ovšem většinou dána pro nějaký nominální proud, ale při minimálním proudovém odběru (režim spánku) se projevuje jejich samotná spotřeba, která může být několikanásobně vyšší než spotřeba mikrokontroleru v režimu spánku.

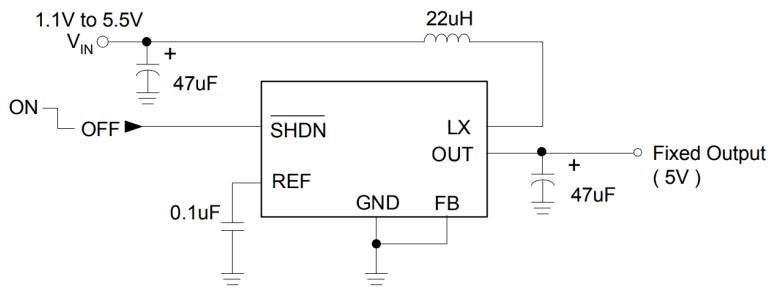
Jelikož je použit senzor prachových částic PMS5003, který potřebuje pro svou činnost napětí 5 V, je třeba použít zvyšujícího měniče (step-up). Dále je třeba zajistit stabilní napětí 3,3 V pro externí AD převodník, zde nelze použít napětí přímo z baterie, jelikož by kolísalo referenční napětí a bylo by tudíž nemožné cokoliv změřit. Dále je vhodné zajistit pro AD převodník napájecí napětí, které nebude zatíženo zvlněním či jinými neduhy danými spínaným měničem. Z tohoto důvodu bude pro jeho napájení použit lineární stabilizátor. Protože je však rozdíl mezi vstupním napětím (5 V) a potřebným výstupním napětím (3,3 V) nižší než 2 V, je třeba použít tzv. LDO (Low Dropout) lineární stabilizátor. Poslední z potřebných napěťových úrovní je 1,8 V. Toto napětí slouží pro napájení senzoru CO₂ a i zde bude nejvhodnější volbou LDO stabilizátor, jelikož senzor potřebuje pro svou funkci maximálně 48,8 mA.

2.4.1 Výběr step-up měniče

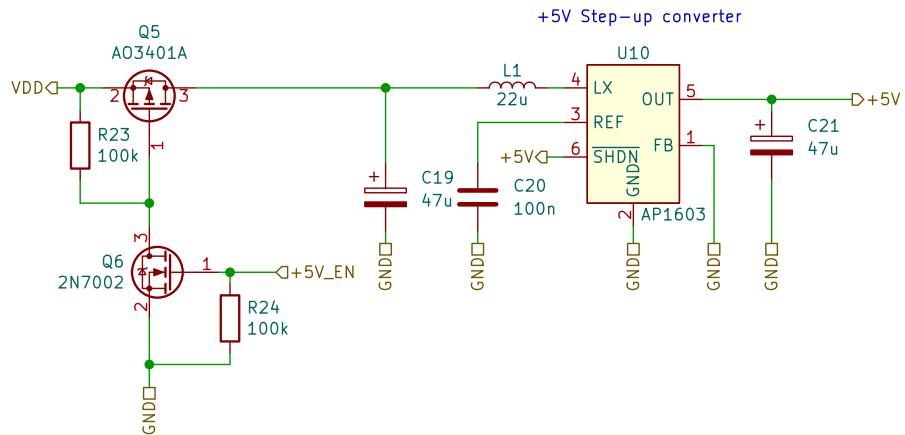
Step-up měničů existují na trhu stovky různých druhů od všemožných výrobců. Výběr je tedy nutné provést převážně na základě potřebných parametrů jako jsou vstupní napětí, výstupní napětí a potřebný dodávaný proud. Jelikož je celé zařízení koncipováno jako nízkopříkonové, je vhodné podívat se také na výrobcem udávaný proud potřebný pro provoz samotného měniče. nejdůležitějším parametrem je bohužel v dnešní době dostupnost daného měniče a také jeho cena.

Pro tuto práci byl vybrán step-up měnič AP1603 od výrobce Diodes Incorporated [2]. Měnič dokáže fungovat od napětí 0,9 V až do 5,5 V a poskytovat výstupní proud až 200 mA. Díky tomu, že měnič obsahuje spínací tranzistory přímo na čipu, tak není potřeba pro funkci příliš mnoho externích součástek. Na obrázku 2.7 je vidět zapojení pro výstupní napětí 5 V.

Při návrhu hodnot použitých součástek v zapojení step-up měniče budu vycházet z katalogového listu poskytnutého výrobcem [2]. Je potřeba připojit k měniči pouze vstupní a výstupní elektrolytické filtrační kondenzátory o hodnotě 47 µF, filtrační kondenzátor o hodnotě 100 nF na referenční pin měniče a dále spínací tlumivku velikosti 22 µH s dostatečným proudovým dimenzováním. U tohoto měniče není potřeba



Obr. 2.7: Typické zapojení step-up měniče AP1603 pro výstupní napětí 5 V. [2]



Obr. 2.8: Schéma zapojení step-up měniče.

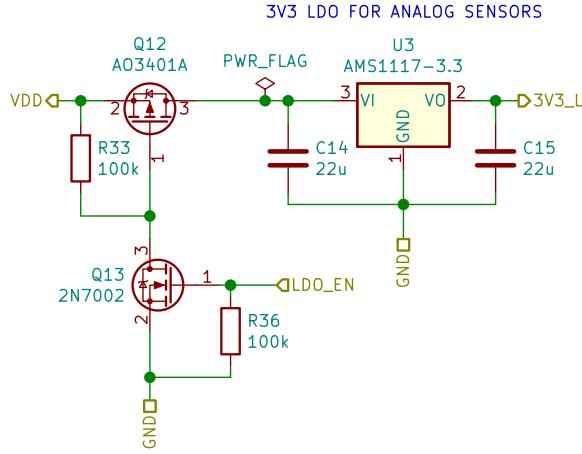
žádný napěťový dělič ve zpětné vazbě, jelikož výrobce uvažoval použití s výstupem 5 V, stačí tedy zpětnou vazbu připojit přímo na výstup měniče. Výsledné zapojení je vidět na obrázku 2.8.

2.4.2 Výběr lineárního stabilizátoru pro 3,3 V

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, pro napájení AD převodníku bude třeba vybrat lineární stabilizátor s malým úbytkem napětí, tzv. LDO. Bohužel nikde neexistuje přesná definice, co je LDO stabilizátor a co už ne, je třeba toto označení brát lehce s rezervou. V praxi se tak obvykle označují stabilizátory s úbytkem napětí zhruba do 2 V.

Jako vhodný pro toto zapojení byl vybrán stabilizátor od výrobce Advanced Monolithic Systems AMS1117 [46] ve variantě s pevně nastaveným výstupním napětím na 3,3 V. Stabilizátor jako takový nepotřebuje pro svou funkci kromě filtračních kondenzátorů na vstupu a výstupu žádné další externí součástky. Podle katalogového listu výrobce zaručuje rozptyl výstupního napětí maximálně $\pm 10 \text{ mV}$ a potlačení vstupního rušení o alespoň 60 dB, což je pro AD převodník žádaná vlastnost. Filtrační kondenzátory byly zvoleny podle doporučení výrobce 22 μF na vstupu i na

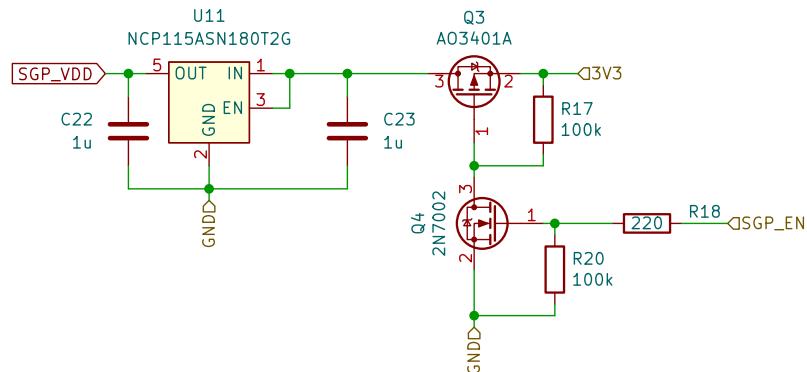
výstupu v keramickém provedení. Kvůli úspoře energie bude možnost vypínat tento stabilizátor a tím i následně AD převodník. Výsledné schéma zapojení lineárního stabilizátoru je vidět na obrázku 2.9.



Obr. 2.9: Schéma zapojení lineárního stabilizátoru s výstupem 3,3 V.

2.4.3 Výběr lineárního stabilizátoru pro 1,8 V

Posledním z napájecích zdrojů je lineární stabilizátor pro senzor SGP30 měřící CO₂ a TVOC. I zde bude třeba vybrat LDO stabilizátor, ideálně v malém pouzdře s minimem externích součástek. Vstupní napětí bude 3 V až 3,6 V z baterie a výstupní napětí musí být 1,8 V, stabilizátor musí být schopen dodat proud alespoň 50 mA. Jako nevhodnější, dostupný a zároveň levný byl vybrán stabilizátor NCP115 s fixním výstupem 1,8 V od firmy ON Semiconductor [47]. Tento stabilizátor vyžaduje přidání pouze filtračních kondenzátorů na vstup a výstup, ideálně keramické o hodnotě 1 μ F. Vstupní napětí může být až 5,5 V a výstupní proud 300 mA. Výsledné zapojení tohoto stabilizátoru včetně možnosti vypnutí je vidět na obrázku 2.10.

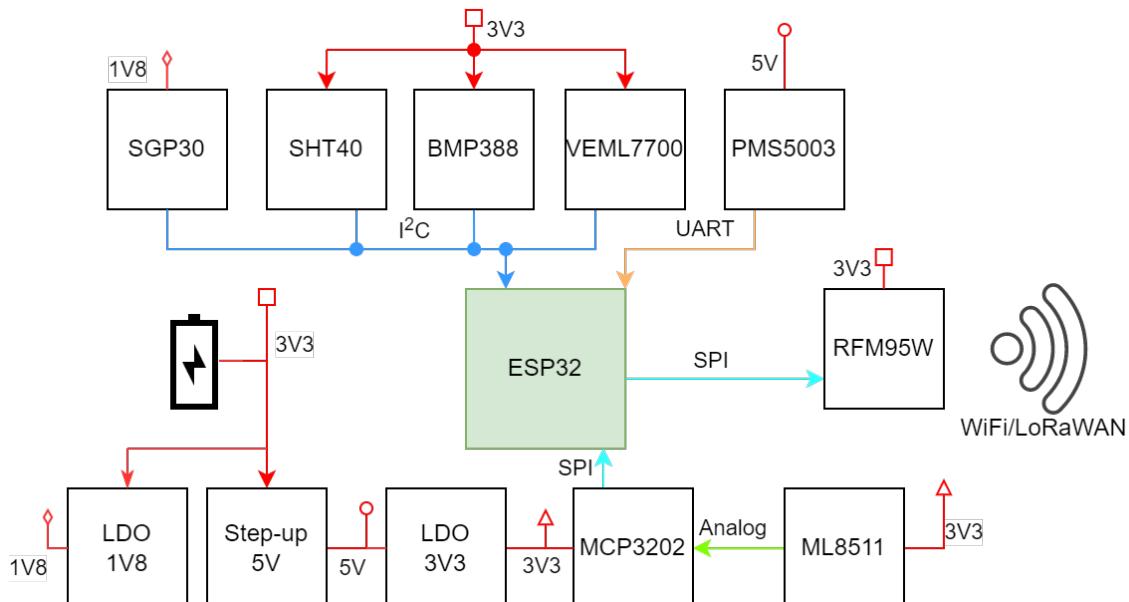


Obr. 2.10: Zapojení lineárního stabilizátoru s výstupem 1,8 V.

2.5 Výsledné zapojení zařízení

Na obrázku 2.11 můžeme vidět finální blokové schéma celého zařízení podle kterého bude třeba nakreslit schéma a následně navrhnut desku plošných spojů. Celé zařízení bude doplněno kromě zmíněných senzorů a potřebných zdrojů také o například ochranu proti přepólování napájení. Dále bude deska na vstupu obsahovat obvody pro možnost zapnutí a vypnutí celé elektroniky přes tlačítka a také možnost vypnout zařízení pomocí mikrokontroleru. Pro možnost snazšího ladění obvodu budou také doplněny vypínatelné LED pro kontrolu přítomnosti jednotlivých napájecích napětí a jedna LED s tlačítkem pro možnost libovolného použití ve výsledné aplikaci.

Jelikož je jedním z hlavních úkolů navrhnout zařízení s co nejmenší spotřebou, bude při návrhu potřeba brát ohled i na mnoho dalších věcí. Všechny senzory a části desky budou navrženy tak, aby je bylo možné nezávisle na sobě vypnout a snížit tak spotřebu v době, kdy není potřeba cokoli měřit. Pokud budou všechny senzory vypnuty, tvoří spotřebu celého zařízení samotný mikrokontroler ESP32 a pasivní prvky, jako například pull-up rezistory a napěťové děliče. Mikrokontroler ESP32 má v deep-sleep (hluboký spánek) režimu spotřebu dle datasheetu [39] pouhých $5\ \mu\text{A}$ a zde již nelze spotřebu snížit. Jediné, co lze tedy ovlivnit jsou pasivní prvky a to tak, že nebudou zapojeny přímo na napájecí větev 3,3 V ale na vypínatelnou část obvodu a tak nebudou zvyšovat klidovou spotřebu zařízení. Tímto způsobem budou tedy zapojeny všechny pull-up rezistory a také napěťový dělič pro měření napětí na baterii.



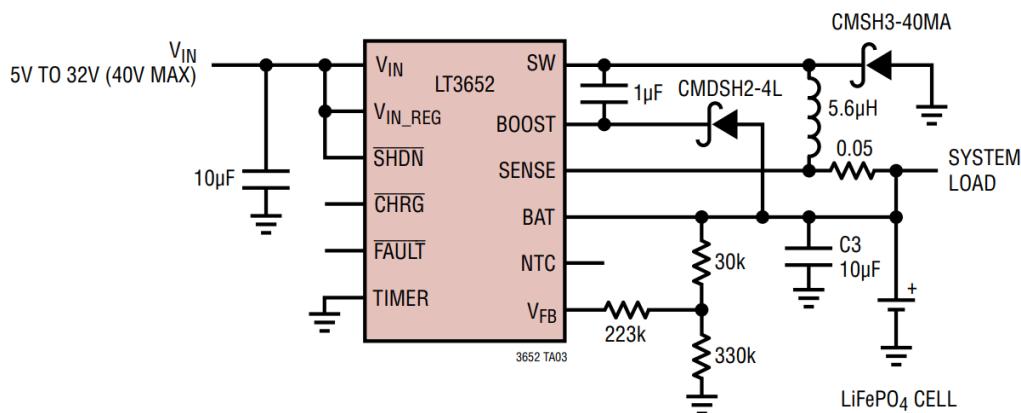
Obr. 2.11: Celkové blokové schéma navrhovaného zařízení.

2.6 Nabíjení zařízení

Jelikož je ve výsledném zařízení obsažena baterie LiFePO₄, je vhodné mít k dispozici kompatibilní nabíječku, ideálně připojitelnou k tomuto zařízení aby nebylo nutné vyndávat baterii. Pro tento účel se velmi často využívají moduly postavené na čipu TP5000 [48]. Tento nabíjecí obvod má uvnitř spínaný zdroj a umožňuje tedy nabíjení proudem až 2 A při vstupním napětí až 10 V. Je tedy možné na vstup připojit i solární panel o vhodném výkonu a parametrech a nabíjet baterii z energie jím vyrobené. Toto řešení má ovšem jednu nevýhodu a to absenci MPPT (Maximum Power Point Tracking) obvodu pro maximalizaci získané energie ze solárního panelu. Kvůli absenci tohoto obvodu jsem se rozhodl pro realizaci vlastního nabíjecího modulu.

Vybral jsem řídící čip LT3652 od firmy Analog Devices [3], který sdružuje funkce nabíjení baterie a MPPT regulátoru na vstupu. Samotný čip umožňuje nabíjení baterie spínaným zdrojem s výstupním proudem až 2 A při vstupním napětí až 32 V. Je možné tedy nabíjet i více baterií zapojených do série. Umožňuje nastavit maximální napětí, do kterého se baterie mají nabíjet, nabíjecí proud a nebo také právě napětí pro MPPT regulátor.

Při návrhu zapojení nabíjecího obvodu s čipem LT3652 budu vycházet z datasheetu výrobce [3] a v něm uvedeného typického zapojení. Výrobce v tomto datasheetu uvádí přímo konkrétní zapojení pro jednu LiFePO₄ baterii s maximálním napětím 3,6 V, ze kterého bdudu vycházet. Toto zapojení je vidět na obrázku 2.12.



Obr. 2.12: Zapojení nabíjecího obvodu LT3652 podle doporučení výrobce. [3]

Jako první bude doplněna možnost využití integrovaného MPPT regulátoru. Tento regulátor funguje tak, že se skrze napěťový dělič přivádí vstupní napětí na pin V_{IN_REG} obvodu, kde se porovnává s referenčním napětím 2,7 V a pokud je toto napětí vyšší, umožňuje nabíjení maximálním proudem. Pokud je toto přivedené napětí nižší než 2,7 V, dochází k omezení nabíjecího proudu tak, aby byl stále zachován

největší nabíjecí výkon. Poměr tohoto napěťového děliče lze spočítat dle následující rovnice:

$$\frac{R_{IN1}}{R_{IN2}} = \frac{V_{IN_min}}{2,7} - 1 \quad (2.1)$$

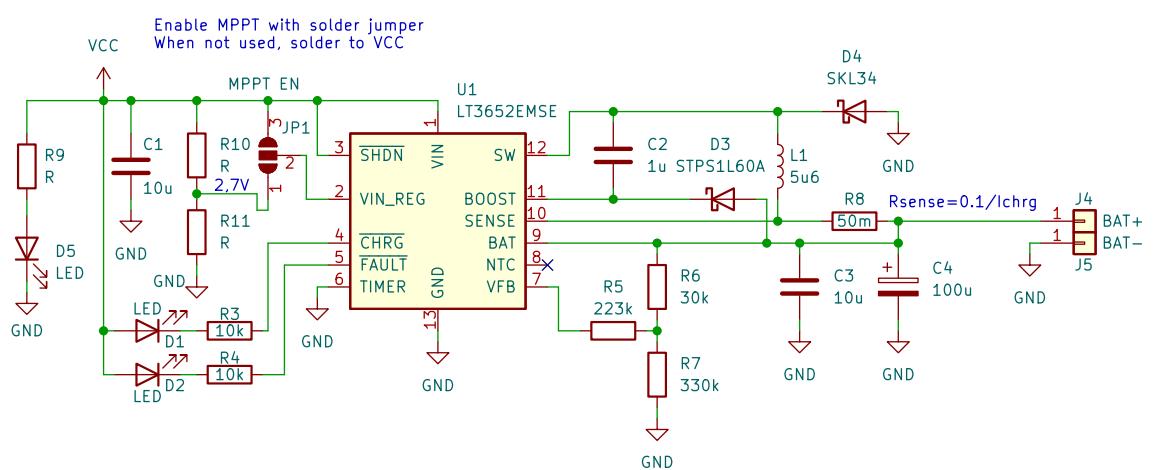
Kde R_{IN1} a R_{IN2} jsou odpory v napěťovém děliči a V_{IN_min} je minimální hodnota vstupního napětí pro nabíjení maximálním proudem.

Dalším doplněním zapojení od výrobce jsou signalizační LED. Obvod umí generovat na pinech CHRG a FAULT až čtyři různé kombinace stavů. Na každém pinu tedy bude zapojena jedna LED, aby bylo možné tyto stavy rozpoznat. Pokud nebude svítit ani jedna, neprobíhá žádné nabíjení a nebo není připojena baterie, pokud svítí LED na pinu CHRG, tak probíhá normální proces nabíjení baterie. Pokud se rozsvítí LED na pinu FAULT, obvod vyhodnotil baterii jako špatnou. Tento stav nastává, pokud přetrvává i přes zahájený nabíjecí cyklus podvýbití baterie pod 2,5 V. Posledním možným stavem je rozsvícení obou LED, které značí přehřívání baterie. V této aplikaci nebude NTC (Negative Temperature Coefficient) senzor pro snímání teploty baterie zapojen a tak nemůže tento stav nastat. Je zde doplněna ještě jedna indikační LED, která se rozsvítí ihned po přivedení napájecího napětí a slouží tak ke kontrole zapnutí celého obvodu.

Poslední možností, jak doporučené zapojení upravit je změna nabíjecího proudu. Velikost nabíjecího proudu je dána velikostí odporu zapojeného v sérii mezi kladným pólem baterie a pinem SENSE obvodu. Velikost tohoto nastavovacího odporu lze vypočítat podle rovnice:

$$R_{SENSE} = \frac{0,1}{I_{CHG(max)}} \quad (2.2)$$

Kde $I_{CHG(max)}$ je právě velikost požadovaného nabíjecího proudu. Pro nabíjecí proud 1 A by vycházela hodnota odporu na $100\text{ m}\Omega$. Při vybírání konkrétních součástek je potřeba uvažovat také výkonovou ztrátu na tomto odporu, jelikož skrze něj protéká veškerý nabíjecí proud, a podle toho jej dostatečně výkonově dimenzovat. Celkové výsledné použité zapojení nabíječky je vidět na obrázku 2.13.



Obr. 2.13: Výsledné zapojení nabíječky LiFePO₄ baterie za použití obvodu LT3652.

3 Návrh desek plošných spojů

Návrh PCB (desek plošných spojů) byl proveden podle výrobních pravidel firmy JLCPCB¹. Maximální rozměry pro levnou výrobu (2 až 4\$ za 5 ks desek) jsou 100×100 mm pro dvouvrstvou desku. Do těchto výrobních možností je tedy nutné koncipovat veškeré návrhy desek. Desky budou navrženy pro ruční osazení a jsou tomu tedy i uzpůsobeny pouzdra součástek. Tuto cestu jsem zvolil, protože i po započítání nákladů na dopravu a clo je výroba u této společnosti nesrovnatelně cenově výhodnější, než u české konkurence. Veškeré návrhy PCB a schémat jsou provedeny v programu KiCad², který je dostupný zdarma a lze jej používat i pro komerční projekty. Navíc je open-source a má veřejně dostupné Python API (Application Programming Interface), což umožňuje komunitě vytvářet pluginy a rozšíření pro usnadnění práce.

3.1 Návrh desky plošných spojů nabíječky

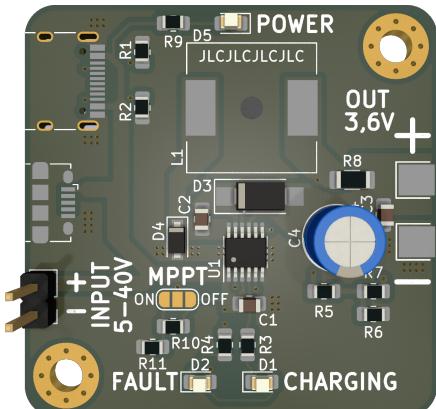
Po návrhu schematického zapojení samotného nabíjecího obvodu bylo zapotřebí navrhnut desku plošných spojů. Jelikož se jedná o jednoduchý obvod s málo součástkami, vystačí dvouvrstvá deska plošných spojů. Na desce jsou navrženy celkem tři druhy možností napájení. Je zde konektor Micro-USB, USB-C a také dvě plošky pro připojení jakéhokoli zdroje 5 až 40 V. Poslední ze zmíněných možností se hodí právě pro připojení jakéhokoliv solárního panelu, který splňuje bude mít dostatečný výkon. Společně s možností solárního panelu je zde také umístěna pájecí propojka, kterou lze zapnout nebo vypnout MPPT funkci obvodu. Pokud uživatel chce funkci vypnout (napájení ze stabilního zdroje napětí), stačí pájením spojit prostřední plošku a plošku s nápisem OFF. Při zapnutí je třeba doplnit dva rezistory do napěťového děliče (R10 a R11 podle schématu 2.13) dle rovnice 2.1. Pro připojení nabíječky k hlavní desce jsou použity 2 mm banánky, které zajistí mechanické zajištění a navíc snesou proudové zatížení až 15 A, takže nebudou vznikat ztráty přechodovým odporem. Při návrhu spojů bylo dbáno na optimální rozložení součástek z hlediska proudových smyček dle datasheetu výrobce čipu. Výsledná deska má rozměry 40×40 mm a je vidět na obrázku 3.1.

3.2 Návrh desky plošných spojů hlavní desky

Po návrhu celkového blokového schématu 2.11 je potřeba provést návrh desky i pro hlavní řídící desku. Tato deska bude rozdělena do dvou, jedna s veškerou elektroniku

¹<https://jlcpcb.com>

²<https://kicad.org/>



(a) 3D model desky plošného spoje



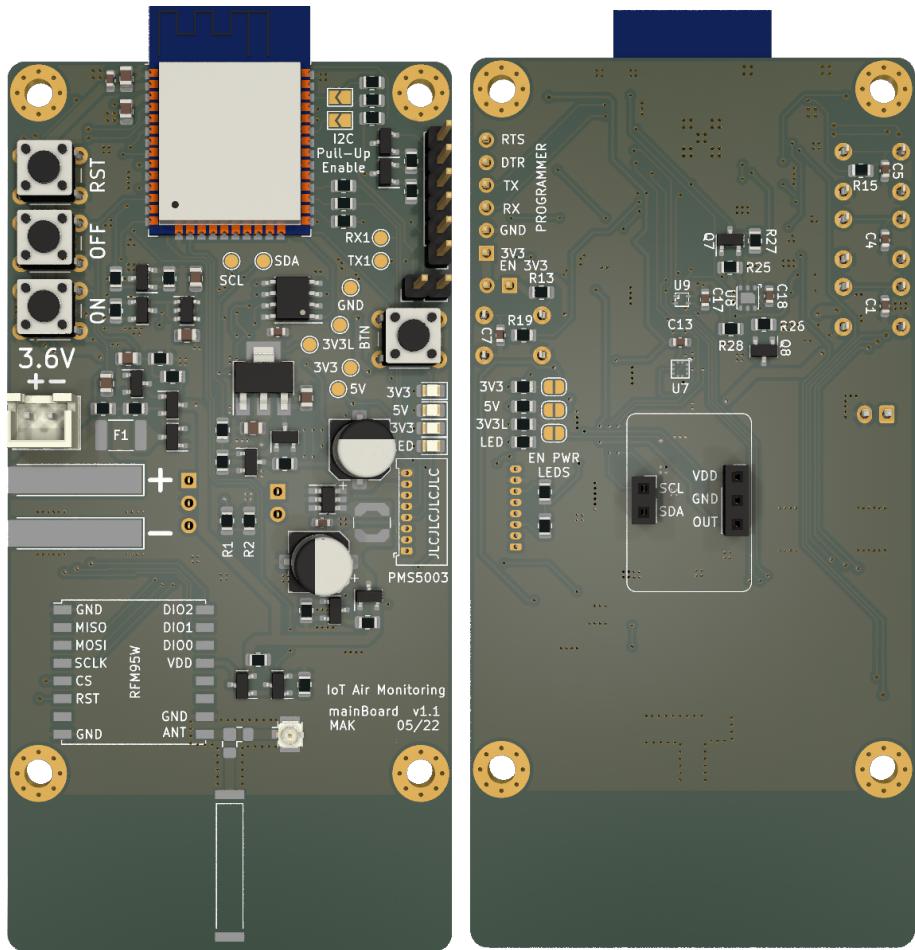
(b) Vyrobena a osazená deska plošného spoje

Obr. 3.1: Deska plošných spojů pro nabíječku.

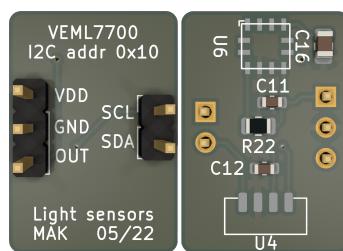
kou a většinou senzorů a druhá menší se senzorem intenzity osvětlení a senzorem UV záření. Toto rozdělení je provedeno kvůli možnosti umístění senzorů světla z hlediska mechanické konstrukce na místo, kde nebudou stíněny. Obě dvě tyto desky jsou koncipovány jako dvouvrstvé. Na hlavní desce je převážná většina součástek umístěna na přední straně a na zadní jsou umístěny víceméně ostatní senzory. Deska obsahuje také čtyři LED pro indikaci funkce jednotlivých napájecích větví, tyto LED jsou nezávisle na sobě zapínatelné pomocí pájecí propojky. Programování probíhá pomocí externího programátoru CP2102³, který se připojuje k hlavní desce na které jsou pouze dva tranzistory a rezistory potřebné k zajištění přepínání ESP32 do režimu nahrávání firmware. Dále deska obsahuje již zmíněný LoRa modul RFM95W ke kterému lze připojit připájením 100 nF kondenzátoru anténu osazenou přímo na desce nebo U.FL konektor pro připojení externí antény. Celá deska je navržena s ohledem na co nejnižší spotřebu a pro dosažení co nejlepších parametrů bylo dbáno na doporučené zapojení dle datasheetu výrobců. Největší pozornost byla věnována oblasti spínaného zdroje, jelikož je zde potřeba správně rozložit součástky a dimenzovat spoje na desce a také oblasti okolo mikropáskového vedení do k anténám, kde je potřeba minimalizovat rušení a také přizpůsobit spoje na impedanci $50\ \Omega$.

Na menší desce se světelnými senzory jsou umístěny pouze součástky podle datasheetů od výrobců a také konektory pro připojení k hlavní desce. Budou využity tzv. pin headery na kterých je vyvedeno napájení 3,3 V, analogový výstup ze senzoru UV záření a také signály datové sběrnice I²C.

³<https://www.silabs.com/interface/usb-bridges/classic/device.cp2102>



Obr. 3.2: Pohled na 3D model hlavní řídící desky.



Obr. 3.3: Pohled na 3D model desky se světelnými senzory.

4 Software pro zařízení

Tato kapitola se věnuje návrhu a vývoji software pro výsledné zařízení včetně zpracování přijatých dat na serveru a jejich zobrazení uživateli v grafické podobě. Jako první jsou rozebrány možnosti zpracovávání dat a na základě výběru vhodných služeb pro tyto účely je navržen obslužný firmware mikrokontroleru a další součásti zpracování dat.

4.1 Server pro zpracování naměřených dat

Důležitým rozhodnutím pro realizaci celého zařízení je vhodný výběr aplikací a služeb, ve kterých se budou naměřená data uchovávat a následně zpracovávat či zobrazovat. Na trhu existuje několik veřejně dostupných serverů, které umožňují přijímání dat skrze různé protokoly a jejich následné uchovávání a zpracovávání.

Mezi nejznámější služby patří ThingSpeak¹, který umožňuje integraci MATLAB skriptů které se spouštějí nad uloženými přijatými daty. Při využívání neplacené verze této služby jsme limitování maximálním počtem přijatých zpráv za den (8200), maximální dobou běhu skriptů 20 s nebo třeba pouze čtyřmi neveřejnými kanály na jeden účet. Další nevýhodou je možnost přijímat do jednoho kanálu maximálně 8 proměnných, pokud bychom chtěli vizualizovat více dat, musíme je rozdělit do více kanálů a můžeme tak brzy narazit na limity účtu poskytovaného zdarma.

Dalším z možných serverů na příjem a zpracování dat je ubidots². I tento server poskytuje licenci zdarma, která je určena pro nekomerční použití studenty a kutily, kteří si chtějí platformu vyzkoušet. Nachází se zde omezení například v počtu maximálně tří připojených zařízení a uchovávání dat po dobu maximálně jednoho měsíce. Každé připojené zařízení může zasílat ke zpracování maximálně 10 měřených veličin.

Jednou z možností je využít Arduino Cloud³ od stejnojmenné společnosti Arduino. Jejich cloud nabízí také plán pro používání bez poplatků, zde se dostáváme na mnohem větší restrikce než u dříve zmíněných služeb. Připojená mohou být pouze dvě zařízení, zařízení musí být naprogramováno v jejich prostředí, jelikož není k dispozici API pro připojení jiných zařízení. Největší nevýhodou je uchovávání naměřených dat pouze jeden den, což je pro statistiky či sledování nepoužitelné.

Další z mnoha možností, jak uchovávat a zpracovávat naměřená data je vytvoření vlastního prostředí pro tyto účely. Lze použít spojení databázové aplikace, která bude uchovávat data (např. InfluxDB⁴) a dalších služeb pro příjem, zpracování a zob-

¹<https://thingspeak.com/>

²<https://ubidots.com/>

³<https://docs.arduino.cc/cloud/iot-cloud>

⁴<https://www.influxdata.com/>

razení těchto dat. Pro příjem zpráv od zařízení bude připojen Eclipse Mosquitto⁵, což je tzv. MQTT broker, který je potřebný k přijímání dat zasílaných skrze protokol MQTT. Tento broker lze poté připojit přes Node-RED⁶, což je programovací nástroj určený k jednoduchému propojení zařízení s dalšími službami, lze jej tedy použít pro zpracování přijatých zpráv a jejich následné uložení do databáze. Statis-tiky a přehledy lze vykreslovat pomocí služby Grafana⁷. Všechny tyto nástroje jsou open-source a lze je využívat zdarma i pro komerční použití. Já využiji tohoto řešení a všechny předchozí zmíněné služby budu mít nainstalované na jednodeskovém počítači Raspberry Pi 4⁸, které je pro tyto účely naprosto dostatečné.

4.2 Základní funkce zařízení

Na obrázku 4.1 je vidět základní koncept běhu programu pro mikrokontroler. Jedná se o jednoduchý stavový automat, který zajistí vykonání příkazů ve správném pořadí a zajišťuje čekání na přijmutí dat ze všech senzorů. V tomto zařízení jsou totiž využity senzory, které neposkytují změrená data okamžitě, ale až po delším časovém úseku svého provozu. Například senzor SGP30 pro měření TVOC a koncentrace CO₂ vrací prvních 15 s fixní hodnotu 400 ppm a až po uplynutí tohoto času začne vracet reálná naměřená data. Velice podobně pracuje i senzor koncentrace prachových částic, kde potřebuje být v provozu alespoň 20 s aby dokázal vrátit naměřená data.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, zařízení bude moci zasílat naměřená data pomocí WiFi nebo pomocí LoRaWAN sítě. Obě dvě sítě vyžadují projít procesem připojení, kde u WiFi zařízení dostane přidělenou IP adresu a u LoRaWAN dojde k vygenerování klíčů, pomocí kterých se poté šifrují a zasílají zprávy. Zařízení je koncipováno tak, že může být připojeno pouze k jedné z těchto sítí a toto nastavení je definováno pevně ve firmwaru zařízení.

4.3 Firmware mikrokontroleru

Celý obslužný firmware pro mikrokontroler je naprogramován za použití frameworku ESP-IDF⁹ přímo do výrobce čipu ESP32 Espressif. Tento framework obsahuje spousty knihoven pro obsluhu všech periferií a sběrnic, které čip obsahuje. Programování probíhá buďto v jazyce C nebo C++. Bylo zapotřebí napsat veškeré knihovny pro

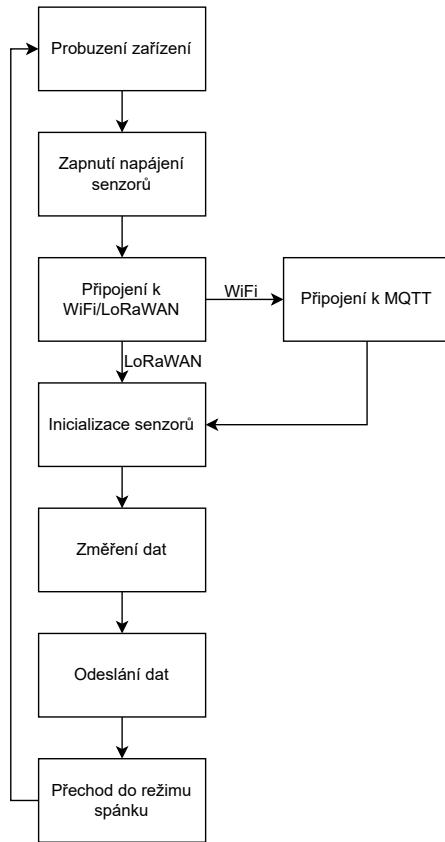
⁵<https://mosquitto.org/>

⁶<https://nodered.org/>

⁷<https://grafana.com/>

⁸<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

⁹<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/>



Obr. 4.1: Základní funkce softwaru pro mikrokontroler.

obsluhu připojených senzorů. Tyto knihovny využívají prostředky frameworku pro obsluhu hardwarevých periferií jednotlivých sběrnic.

Tento framework je postaven na projektu realtime operačního systému pro mikrokontrolery FreeRTOS¹⁰ a umožňuje tak jednoduše spouštět více vláken, časovače, spravovat fronty a uživatel se o to nemusí starat. Díky tomuto systému je software rozdělen do několika oddělených vláken, kde se starají o inicializaci WiFi rozhraní, spojení s MQTT brokerem, spojení a obsluhu LoRaWAN sítě, obsluhu senzorů na sběrnici I²C, SPI nebo UART. Díky tomuto rozdělení do jednotlivých vláken je velice snadné zajistit správné časování pro jednotlivé čtení ze senzorů a je také možné používat blokující funkce pro čekání, jelikož blokováním jednoho vlákna nedojde k ovlivnění časování vlákna jiného.

4.3.1 Obsluha senzorů

Jak již bylo zmíněno, pro obsluhu všech připojených senzorů jsou použity vlastní knihovny založené na frameworku ESP-IDF. Tyto knihovny obsahují pouze potřebné

¹⁰<https://www.freertos.org/>

čtení, inicializace a případné restarty senzorů. Není obsažena plná funkčnost dle datasheetu výrobce, jelikož pro tuto aplikaci nejsou všechny funkce senzorů potřebné. Senzory jsou rozděleny do skupin podle druhu použité komunikační sběrnice a je možné je jednotlivě softwarově vypínat, aby byla minimalizována spotřeba celého zařízení. Dále jsou také zajištěny již dříve zmíněné opakované vyčítání ze senzorů pro koncentraci CO₂ a senzoru prachových částic. Po ukončení jednotlivých měření jsou naměřená data uložena do datové struktury k pozdějšímu odeslání na server. Celý proces začínající probuzením zařízení z režimu hlubokého spánku, přes změření dat až po odeslání a uspání trvá zhruba kolem 30 s.

4.3.2 Připojení k WiFi

Pro použití zařízení s WiFi sítí je zapotřebí nakonfigurovat ve zdrojovém kódu použití této sítě a také další potřebné parametry. Konfigurace probíhá v souboru CMakelists.txt umístěném v hlavní složce se zdrojovými kódy.

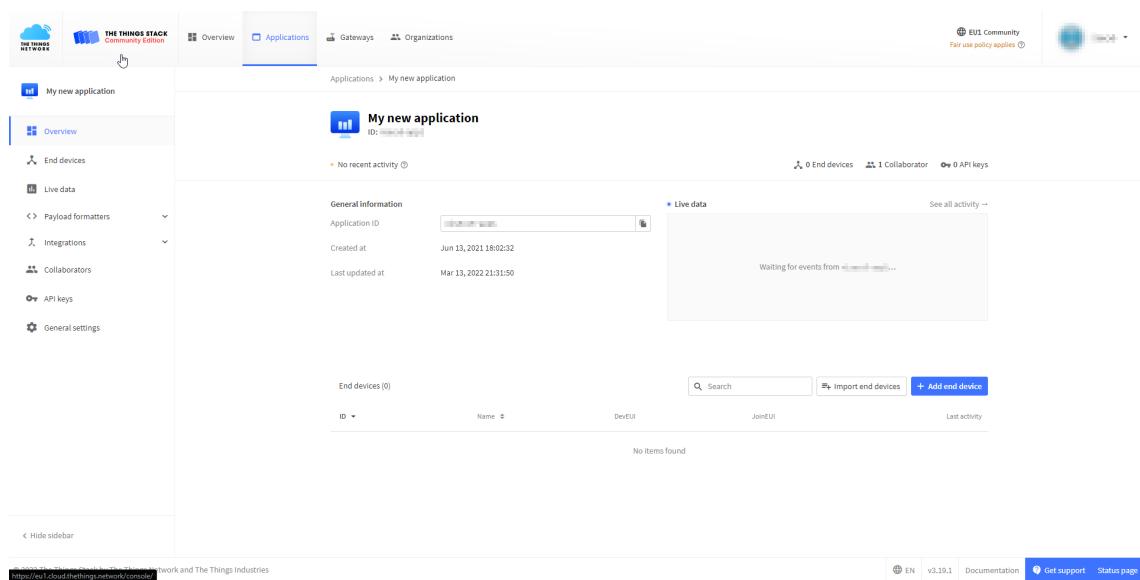
Výpis 4.1: Nastavení spojení pomocí WiFi

add_compile_definitions(WIFI)	1
# add_compile_definitions(LORAWAN)	2
...	3
	4
add_compile_definitions(SSID="")	5
add_compile_definitions(PWD="")	6
add_compile_definitions(MQTT_BROKER_URL="")	7
add_compile_definitions(MQTT_PORT=1883)	8
add_compile_definitions(MQTT_TOPIC="")	9

Nastavení probíhá pomocí zakomentování nebo odkomentování jednotlivých řádků konfiguračního souboru. Zakomentování (nepoužití) se provede pomocí znaku '#' umístěného na začátek daného řádku. Je tedy třeba takto zakomentovat druhý řádek, který definuje použití sítě LoRaWAN a odkomentovat první s WiFi sítí. V této konfiguraci je dále potřeba doplnit SSID (Service Set Identifier) požadované sítě a její heslo aby bylo možné se připojit. A dále nastavení spojení s MQTT brokerem. Zde má uživatel na výběr, jestli použije pouze IP adresu brokeru (typicky v lokální síti) nebo použije URL (Uniform Resource Locators) pro spojení skrze síť internet na broker mimo lokální síť. Další z možných nastavení je port MQTT brokeru, který je ve výchozím stavu nastaven na 1883, ale lze jej v případě potřeby změnit. Posledním nastavením je tzv. topic pro MQTT (kanál pro publikování dat), který musí být unikátní v rámci jednoho MQTT brokeru, jinak bude docházet ke konfliktům.

4.3.3 Připojení k LoRaWAN

Konfigurace připojení k LoRaWAN síti probíhá ve stejném souboru jako WiFi, tedy CMakeLists.txt v hlavní složce s firmware. Bude potřeba vygenerovat klíče pro připojení pomocí portálu The Things Network¹¹. Pro využití této sítě je potřeba si na tomto webu vytvořit účet, který je zdarma. Po přihlášení je potřeba přejít do konzole a zde zvolit záložku aplikace. Pokud uživatel nemá vytvořenou žádnou aplikaci, uvidí pouze tlačítko "+ Add application" na které je potřeba kliknout a vytvořit tak novou aplikaci. V této aplikaci poté budou sdruženy jednotlivá připojená zařízení a lze na ně aplikovat různé nastavení globálně. Při vytváření aplikace je zapotřebí vyplnit minimálně unikátní id aplikace (bez diakritiky, mezer, ...), dále je možné vyplnit jméno aplikace, které bude lidsky čitelné a případný popis aplikace.



Obr. 4.2: Vytvořená aplikace v konzoli The Things Network.

Po vytvoření aplikace je možné ji otevřít a vidět veškeré informace, tak jako na obrázku 4.2. Nyní je potřeba pomocí tlačítka "+ Add end device" přidat koncové zařízení a vytvořit pro něj připojovací unikátní klíče. Některá zařízení schválená službou The Things Network lze přidat automaticky, ale zde je třeba zvolit manuální možnost registrace. Jako první z nastavení bude třeba zvolit frekvenční plán, pro Evropu je doporučen plán s názvem "Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended)", který doporučuje zvolit. Dále je potřeba zvolit specifikaci LoRaWAN standardu, kde použité knihovny pro obsluhu této sítě plně podporují LoRaWAN specifikaci verze 1.0.3. Poslední z nastavení jsou již zmíněné aktivační klíče pro metodu OTAA (Over The Air Activation), které necháme vygenerovat pomocí serveru.

¹¹<https://www.thethingsnetwork.org/>

Je tedy třeba vygenerovat "DevEUI", "AppEUI" a "AppKey", k čemuž slouží tlačítka vedle těchto parametrů. Pole "AppEUI" necháme vyplnit nulami. Poslední z parametrů, který je možné zvolit je "End device ID", který slouží jako jedinečný identifikátor konkrétního zařízení. Lze jej ponechat na automaticky vygenerované hodnotě, která vychází z DevEUI. Správně navolené a vygenerované klíče lze vidět na obrázku 4.3. Všechny tyto tři vygenerované unikátní klíče jsou potřeba pro následující nastavení v rámci firmwaru mikrokontroleru.

Obr. 4.3: Formulář pro registraci koncového zařízení do sítě The Things Network.

V nastavovacím souboru pro firmware je tedy potřeba nastavit zakomentováním řádku s definicí WiFi a odkomentováním LoRaWAN použití této sítě. Dále je potřeba do předchystaných definic do uvozovek vložit již zmiňované vygenerované klíče. Při použití této sítě není potřeba nastavovat žádné IP adresy, zprávy se posílají skrze gateway na servery The Things Network, kde se dále zpracovávají.

Výpis 4.2: Nastavení spojení pomocí LoRaWAN

# add_compile_definitions(WIFI)	1
add_compile_definitions(LORAWAN)	2
...	3
	4
add_compile_definitions(APPEUI="")	5
add_compile_definitions(DEVEUI="")	6
add_compile_definitions(APPKEY="")	7

4.4 Přijetí dat a jejich zpracování

Všechny aplikace pro příjem a zpracování dat včetně databáze jsou nainstalovány na Raspberry Pi 4. Běží zde tedy Eclipse Mosquitto MQTT broker, Node-RED pro zpracování dat, InfluxDB pro uložení dat a Grafana pro grafickou vizualizaci dat. Webové rozhraní je dostupné z lokální sítě, ale lze toto rozhraní zpřístupnit pomocí veřejné IP adresy odkudkoli z internetu.

Naměřená data jsou přímo v mikrokontroleru naformátována do formátu JSON (JavaScript Object Notation) pro snadné zpracování a čitelnost. Takovýto přenos dat není z hlediska přenášeného datového objemu nejefektivnější, ale ani u WiFi ani u LoRaWAN nejsme tak striktně omezeni aby toto řešení nešlo použít. Naměřená data jsou pro zjednodušení programování přenášena jako celá čísla a na straně serveru je tedy potřeba data převést zpět na desetinná čísla. Ve výpisu 4.3 je vidět ukázková JSON struktura, kterou zařízení posílá. Na každém řádku je jedna měřená veličina a to napětí baterie, hodnota UV záření, teplota, vlhkost, intenzita osvětlení, tlak, prachové částice o velikosti 1 µm, 2,5 µm a 10 µm, hodnota koncentrace CO₂ a poslední hodnotou je TVOC. Je nutné mít na paměti, že zde nejsou respektovány veličiny, jelikož jsou čísla přenášená celočíselně.

Výpis 4.3: Příklad zasílané JSON zprávy.

```
{ 1
    "B": 3334 , 2
    "U": 0 , 3
    "T": 214 , 4
    "H": 437 , 5
    "L": 0 , 6
    "P": 1013959 , 7
    "P1": 27 , 8
    "P25": 1 , 9
    "P10": 0 , 10
    "C": 400 , 11
    "E": 0 12
}
```

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, příjem dat na straně serveru je zajištěn MQTT brokerem Eclipse Mosquitto při použití WiFi. MQTT funguje na principu publish-subscribe, což znamená že zařízení se připojí a publikují svá data do přidělených kanálů odkud mohou ostatní zařízení tato data číst. V tomto případě má tento topic název podle definice v konfiguraci firmwaru a vypadá následovně: `air-monitor/zvolený_název/values`. Tento název bude potřeba pro konfiguraci

v Node-RED rozhraní. Pro příjem dat z portálu The Things Network bude využit jejich MQTT broker ke kterému se připojí Node-RED jako klient a získá data z kanálu pro uplink pro jednotlivá připojená zařízení.

4.4.1 Konfigurace Node-RED

Node-RED je nástroj, který umožňuje navzájem spojit zařízení, API aplikací a provádět jednoduché zpracování dat. Jeho nastavování probíhá skrze webové rozhraní. V této aplikaci bude zpracovávat přijatá data a ukládat je do databáze. Pro konfiguraci toku dat slouží tzv. nody, které mají buďto definovanou funkci a nebo lze vytvořit obecnou funkci v JavaScriptu.

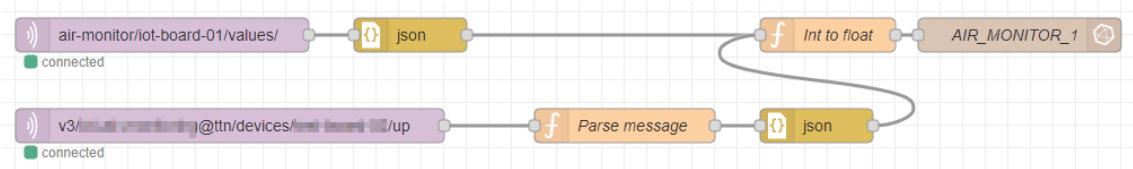
Konfigurace použitá v této konkrétní aplikaci je vidět na obrázku 4.4. Jsou zde dvě hlavní větvě, kde horní zpracovává data přenesená přes WiFi z lokálního MQTT brokeru a spodní přijímá přes MQTT data z The Things Network. V této větvi jsou extrahovány funkce pouze přijatá data, která se poté převedou na JSON objekt a jsou dále poslány ke zpracování. Jak již bylo zmíněno, data je nutné převést do desetinné podoby, což se děje v node s názvem "Int to float" jejíž definici lze vidět na výpisu 4.4. Poslední node pouze zapisuje data do předem zvolené tabulky v InfluxDB databázi.

Výpis 4.4: Funkce pro převod naměřených dat do desetinné podoby.

```
msg.payload = [ 1
{ 2
    T: (msg.payload["T"] / 10), 3
    H: (msg.payload["H"] / 10), 4
    L: msg.payload["L"], 5
    P: (msg.payload["P"] / 10), 6
    C: msg.payload["C"], 7
    E: msg.payload["E"], 8
    P1: msg.payload["P1"], 9
    P25: msg.payload["P25"], 10
    P10: msg.payload["P10"], 11
    U: (msg.payload["U"] / 1000000), 12
    B: (msg.payload["B"] / 1000) 13
}
return msg; 14
15
```

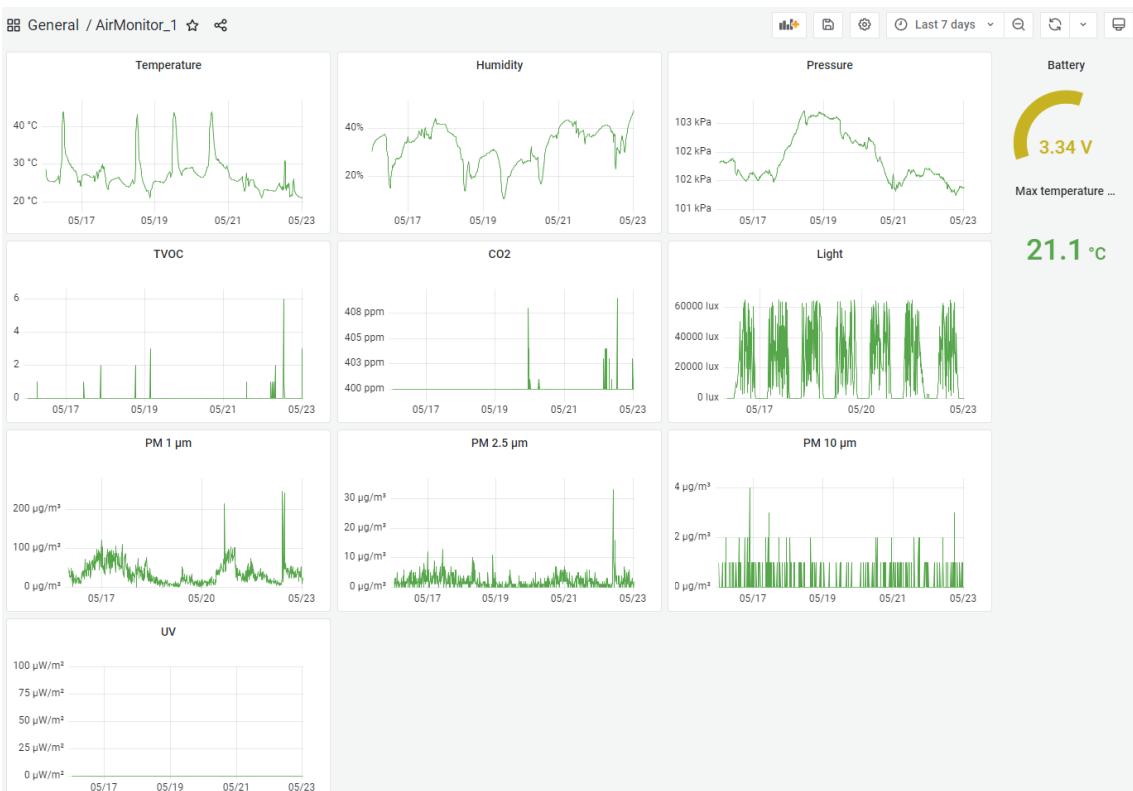
4.4.2 Grafické uživatelské rozhraní

O zobrazení dat se stará služba Grafana, která si naměřená data bere přímo z databáze InfluxDB a zobrazuje je podle definice uživatele. Je zde mnoho možností



Obr. 4.4: Konfigurace toku dat v prostředí Node-RED.

na konfiguraci zobrazených prvků jako jsou grafy, bargrafy, status bary, pouze číselné hodnoty a jiné. Rozložení závisí čistě na uživateli a jeho preferencích. Zároveň se lze v již daném rozložení panelů přepínat v zobrazeném časovém úseku. Služba sama o sobě umožňuje zobrazit např. posledních 5 min až několik posledních let a nebo lze definovat vlastní časový úsek. Dále lze také zapnout automatické obnovování a mít tak tuto službu v bezobslužném módu kde bude neustále zobrazovat aktuální data. Příklad takového zobrazení je vidět na obrázku 4.5, jsou zde v grafech vyneseny aktuální hodnoty a na pravé straně je vidět status bar se stavem baterie a zároveň pro leťmou informaci maximální hodnota teploty za posledních 24 h.



Obr. 4.5: Ukázka zobrazení naměřených dat pomocí aplikace Grafana.

Závěr

V teoretickém úvodu byly rozebrány jednotlivé technologie senzorů pro měření daných veličin a možnosti přenášení naměřených dat na server. Následně byly vybrány všechny potřebné senzory s ohledem na kvalitativní parametry a co nejnižší provozní spotřebu pro dosažení co nejdelšího provozu při případném provozu z akumulátorů. Jako IoT síť pro přenos dat byla pro první experimentální pokusy vybrána síť WiFi, s možností doplnění připojení přes LoRaWAN. Nedlouhou součástí výběru hardwarových komponent byl výběr řídícího mikrokontroleru, kde bylo zapotřebí vybrat vhodný typ podle potřebných komunikačních sběrnic a hardwarových prostředků. Nakonec byl vybrán mikrokontroler ESP32, jelikož má všechny potřebné periferie a umožňuje dosáhnout při různých provozních režimech velice nízké spotřeby.

Po sestavení výsledného blokového schématu byla navržena dvouvrstvá deska plošných spojů o rozměrech 100×100 mm, která byla následně vyrobena včetně strojního osazení většiny součástek. Po jejím vyrobení byly doosazeny ručně zbylé součástky a byla vyzkoušena alespoň základní funkčnost hlavních komponent. Bylo zjištěno, že mikrokontroler je možné naprogramovat a funguje komunikace se senzory. Byla změřena také spotřeba celého zařízení při vypnutí všech senzorů a ponechání pouze zapnutého mikrokontroleru v režimu hlubokého spánku. V tomto stavu má deska spotřebu okolo $500 \mu\text{A}$. Dále byla změřena impedance integrované antény na desce plošných spojů, která ovšem nevyšla podle očekávání. Změřená impedance byla $700 + j0 \Omega$, což není správné. Může to být nejspíše způsobeno špatným návrhem desky plošných spojů.

Dále je tedy třeba naprogramovat firmware mikrokontroleru, aby bylo možné měřit a odesílat všechny potřebné veličiny. Je třeba vyřešit problém s integrovanou anténou, a to například vyrobením desek, na kterých bude pouze zkoumaná anténa. Eliminuje se tím vliv okolí na desce a může se poté provést nové měření. V neposlední řadě je také potřeba do návrhu přidat možnost napájet zařízení z baterie pro použití mimo dosah elektrické sítě a s tím je spojená další optimalizace spotřeby celého zařízení.

Literatura

- [1] ECLIPSERA S.R.O.. *Senzor UVB / UVA Záření ML8511 pro Arduino* / dratek.cz / dratek.cz [online]. 2022 [cit. 17. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://dratek.cz/arduino/1327-senzor-uvb-uva-zareni-ml8511-pro-arduino.html?mena=1>>.
- [2] DIODES INCORPORATED. *AP1603 STEP-UP DC-DC CONVERTER* [online]. 2014 [cit. 5. května 2022]. Dostupné na: <<https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP1603.pdf>>.
- [3] LINEAR TECHNOLOGY. *LT3652 - Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power* [online]. 2010 [cit. 5. května 2022]. Dostupné na: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3652fe.pdf>>.
- [4] LEVITT-SAFETY LTD.. *How to measure dust in the workplace* [online]. 2021 [cit. 18. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.levitt-safety.com/blog/how-to-measure-dust-in-the-workplace/>>.
- [5] VOJÁČEK, A. *Kvalita vzduchu v uzavřených místnostech - 6. Senzory PM čistic* [online]. 2019 [cit. 16. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-6-senzory-pm-castic.html>>.
- [6] CUBIC. *Infrared LED Particle Sensor Module* [online]. 2018 [cit. 18. listopadu 2021]. Dostupné na: <http://9b54c437a0e032d4eb32-010f1da83de0c62ea8c11f5612b46edb.r27.cf3.rackcdn.com/Cubic_PM1003_DS.pdf>.
- [7] VAFEK, Z. *Možnosti měření oxidu uhličitého – měřicí přístroje a čidla* [online]. 2016 [cit. 17. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/13910-moznosti-mereni-oxidu-uhliciteho-merici-pristroje-a-cidla>>.
- [8] EIT INSTRUMENT MARKETS. *Ultraviolet (UV) Measurement for Formulators: Part I* [online]. 2021 [cit. 17. listopadu 2021]. Dostupné na: <https://www.eit.com/sites/default/files/instruments/UVMeasurementForFormulatorsPart1_PaintAndCoatings.pdf>.

- [9] NANINAILS. *Lampy na nehty: Tajemství UV/LED technologie* [online]. 2020 [cit. 26. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://blog.naninails.cz/site/source/zareni.jpg>>.
- [10] VOJÁČEK, A. *Přehled principů el. měření teploty - 1. díl* [online]. 2014 [cit. 15. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>>.
- [11] HUSÁK, M. 5. *TEPLOTNÍ SENZORY* [online]. 2021 [cit. 16. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://adoc.pub/5-teplotni-senzory-teplotni-senzory-jednotky-teplotni-senzor.html>>.
- [12] ANUSHA. *Humidity Sensor - Types and Working principle* [online]. 2017 [cit. 18. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.electronicshub.org/humidity-sensor-types-working-principle/>>.
- [13] ALAN. *Working Principles and Applications of Pressure Sensors* [online]. 2020 [cit. 17. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.utmel.com/blog/categories/sensors/working-principles-and-applications-of-pressure-sensors>>.
- [14] AVNET. *MEMS pressure sensors* [online]. 2021 [cit. 10. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/mems>>.
- [15] THE THINGS INDUSTRIES. *Duty Cycle* [online]. 2021 [cit. 20. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/#fair-use-policy>>.
- [16] LORA ALLIANCE. *A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™* [online]. listopad 2020 [cit. 19. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>.
- [17] SIGFOX. *Sigfox.cz - Connecting things* [online]. 2021 [cit. 20. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://sigfox.cz/cs>>.
- [18] 3GPP. *3GPP* [online]. 2021 [cit. 20. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.3gpp.org/>>.
- [19] ADAFRUIT. *PM2.5 Air Quality Sensor and Breadboard Adapter Kit - PMS5003* [online]. 2021 [cit. 21. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.adafruit.com/product/3686>>.

- [20] CUBIC. *PM1006 LED PARTICLE SENSOR SPECIFICATION* [online]. 2021 [cit. 21. listopadu 2021]. Dostupné na: <http://www.jdscompany.co.kr/download.asp?gubun=07&filename=PM1006_LED_PARTICLE_SENSOR_MODULE_SPECIFICATIONS.pdf>.
- [21] SHARP. *GP2Y1010AU0F* [online]. 2021 [cit. 21. listopadu 2021]. Dostupné na: <https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf>.
- [22] LAPIS SEMICONDUCTOR Co., LTD.. *ML8511* [online]. 2013 [cit. 29. listopadu 2021]. Dostupné na: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf>.
- [23] MAXIM INTEGRATED. *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* [online]. 2019 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. *LM75A Digital Temperature Sensor and Thermal Watchdog With Two-Wire Interface* [online]. 2000 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm75a.pdf>>.
- [25] SENSIRION. *Datasheet SHT3x-ARP* [online]. 2016 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.tme.eu/Document/2e0098c5e5c9e7ad6b9934b65a407be3/Sensirion_SHT3x_analog.pdf>.
- [26] SENSIRION. *Datasheet SHT3x-DIS* [online]. 2016 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital-971521.pdf>.
- [27] SENSIRION. *SHT4x* [online]. 2020 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://cdn.sos.sk/productdata/79/7c/0364ef45/sht40-ad1b-r2.pdf>>.
- [28] LASKARDUINO.CZ. *LaskaKit SHT40 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu / laskarduino.cz* [online]. 2021 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.laskarduino.cz/laskakit-sht40-senzor-teploty-a-vlhkosti-vzduchu/>>.
- [29] ROHM Co., LTD.. *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC* [online]. 2011 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>>.

- [30] TEXAS ADVANCED OPTOELECTRONIC SOLUTIONS INC.. *TSL2560, TSL2561 LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER* [online]. 2009 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL256x.pdf>>.
- [31] VISHAY. *High Accuracy Ambient Light Sensor With I²C Interface* [online]. 2021 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>>.
- [32] RPISHOP.CZ. *Adafruit VEML7700 Lux I²C světelný senzor* [online]. 2021 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://rpishop.cz/senzory/4126-adafruit-veml7700-lux-i2c-svetelny-senzor.html>>.
- [33] BOSCH. *BMP180 Data sheet* [online]. 2013 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>>.
- [34] BOSCH. *BMP280: Data sheet* [online]. 2018 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-274.2.pdf>>.
- [35] BOSCH. *BMP388 - Data sheet* [online]. 2018 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.mouser.com/pdfdocs/BST-BMP388-DS001-01.pdf>>.
- [36] BOSCH. *BME280 - Data sheet* [online]. 2021 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschSENSORTEC/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>.
- [37] TDK CORPORATION. *High Accuracy, Low Power, Waterproof Barometric Pressure and Temperature Sensor IC* [online]. 2019 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.farnell.com/datasheets/2905836.pdf>>.
- [38] MICROCHIP. *MegaAVR® Data Sheet* [online]. 2020 [cit. 14. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>>.
- [39] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet* [online]. 2021 [cit. 14. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>.
- [40] ATMEL CORPORATION. *ATSAM ARM-based Flash MCU SAM4L Series* [online]. 2013 [cit. 14. prosince 2021]. Dostupné na: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42023-ARM-Microcontroller-ATSAM4L-Low-Power-LCD_Datasheet.pdf>.

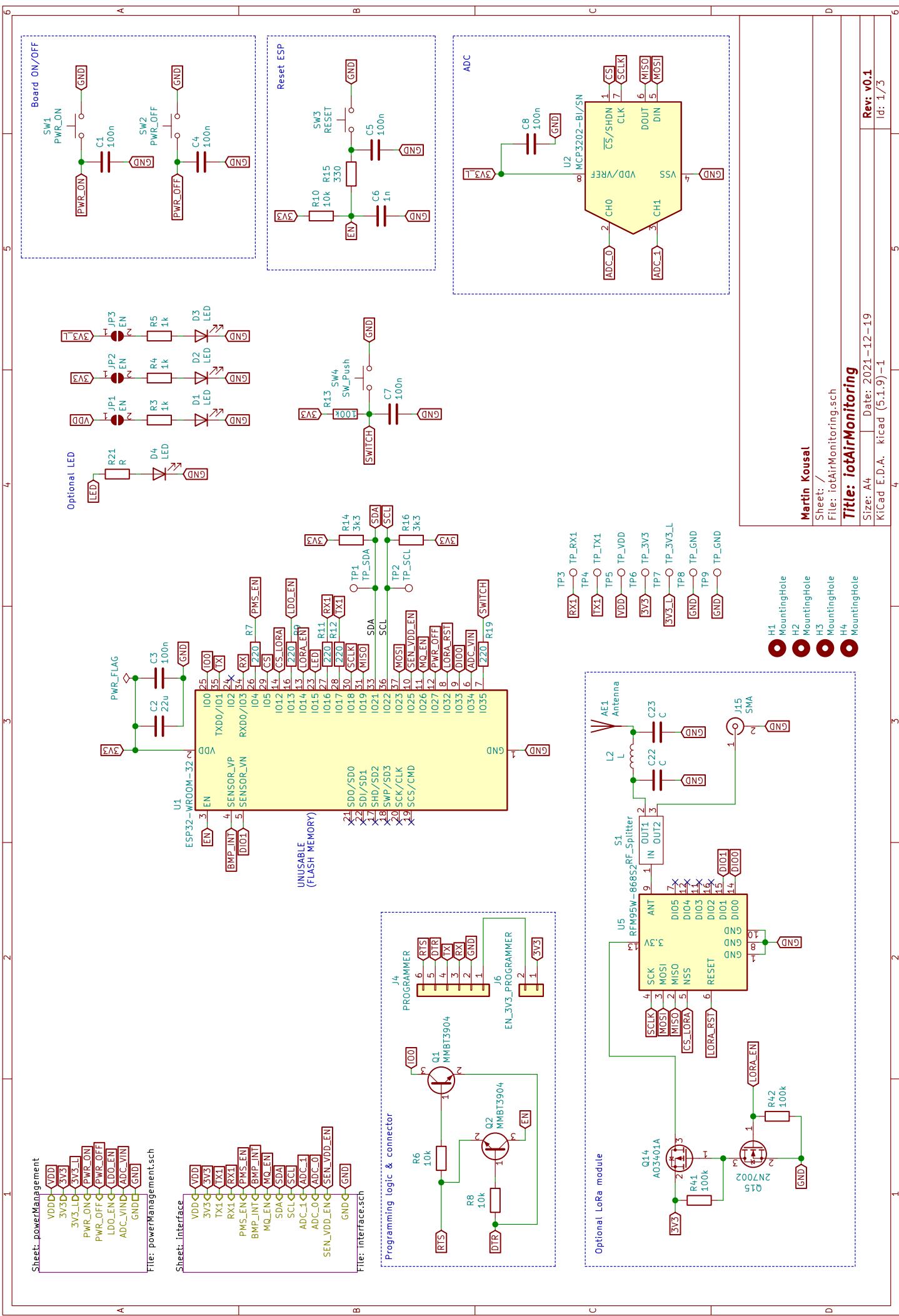
- [41] STMICROELECTRONICS. *8-bit ultra-low-power MCU, 64 KB Flash, 2 KB data EEPROM, RTC, AES, LCD, timers, USARTs, I2C, SPIs, ADC, DAC, COMPs* [online]. 2015 [cit. 14. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.tme.eu/Document/555393ce991cb6c1e35c17af5cf6bcbb/STM8L162R8-DTE.pdf>>.
- [42] STMICROELECTRONICS. *Access line ultra-low-power 32-bit MCU Arm®-based Cortex®-M0+, up to 64 KB Flash, 8 KB SRAM, 2 KB EEPROM, ADC* [online]. 2018 [cit. 14. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.tme.eu/Document/8153a4940683e7174c04490d86ca77b0/stm32l051c8.pdf>>.
- [43] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.. *2.7V Dual Channel 12-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface* [online]. 2011 [cit. 16. prosince 2021]. Dostupné na: <<https://www.tme.eu/Document/352ff61b0472cba270d1fa451c4df0c1/MCP3202.pdf>>.
- [44] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Kmitočtová tabulka* [online]. 2018 [cit. 27. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.ctu.cz/narodni-kmitoctova-tabulka>>.
- [45] HOPE MICROELECTRONICS CO., LTD. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module* [online]. 2006 [cit. 10. prosince 2021]. Dostupné na: <https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf>.
- [46] ADVANCED MONOLITHIC SYSTEMS. *AMS1117 1A LOW DROPOUT VOLTAGE REGULATOR* [online]. 2021 [cit. 28. listopadu 2021]. Dostupné na: <<http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>>.
- [47] SEMICONDUCTOR COMPONENTS INDUSTRIES, LLC. *NCP115 LDO Regulator - High PSRR 300 mA* [online]. 2019 [cit. 6. května 2022]. Dostupné na: <<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ncp115-d.pdf>>.
- [48] NANJING EXTENSION OF MICROELECTRONICS Co., LTD.. *TP5000 (2A switching 4.2V lithium battery lithium iron /3.6V Battery charger)* [online]. 2022 [cit. 5. května 2022]. Dostupné na: <<https://robu.in/wp-content/uploads/2021/01/TP5000-3.6V4.2V-1A-LithiumBattery-Charger-Module.pdf>>.
- [49] ECLIPSERA s.r.o.. *Arduino MQ7 MQ-7 oxidu uhelnatého CO / dratek.cz* [online]. 2021 [cit. 28. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://dratek.cz/arduino/48468-mq7-mq-7-senzor-oxidu-uhelnateho-co.html>>.

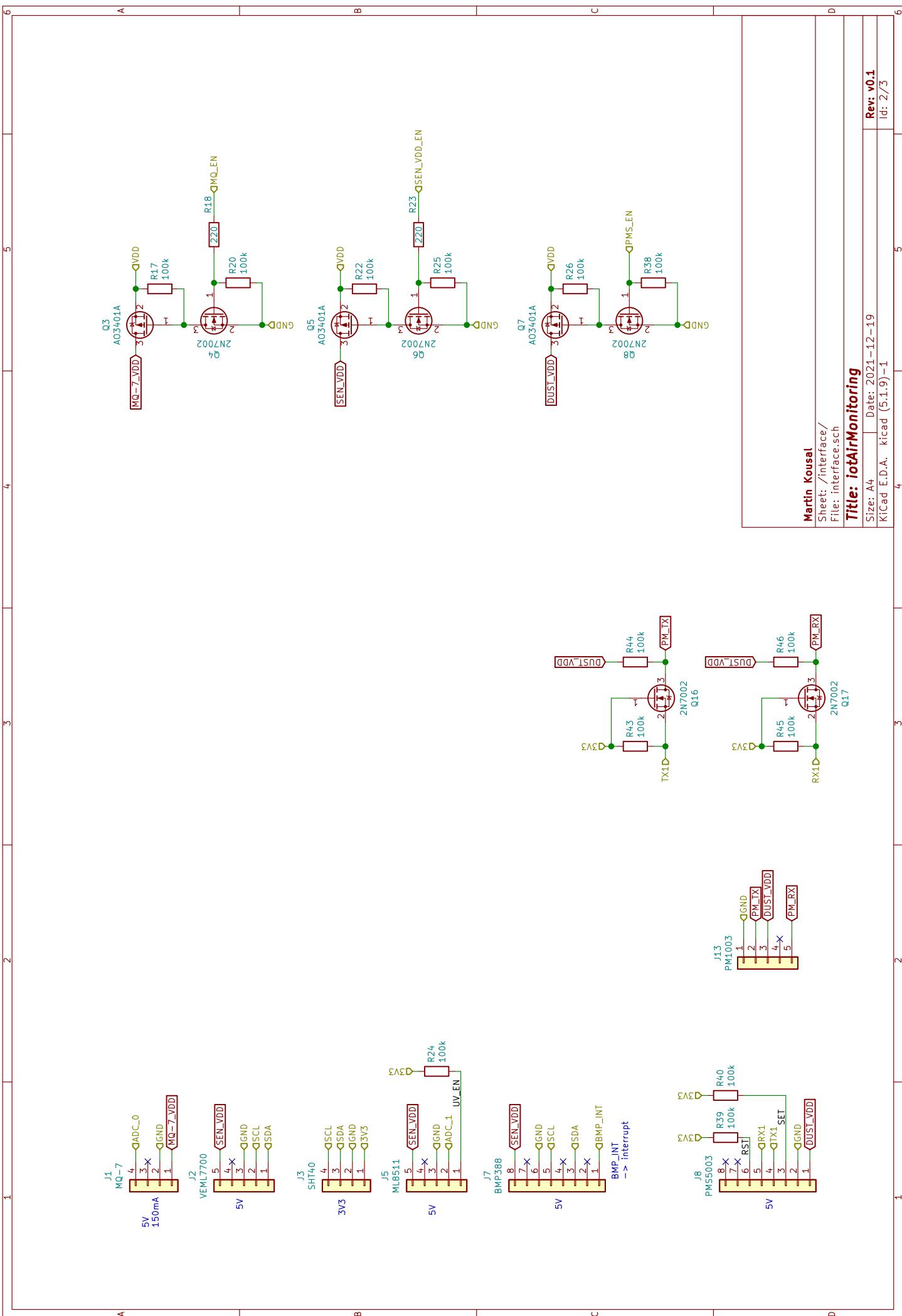
- [50] HANWEI ELECTRONICS GROUP CORPORATION. *TECHNICAL DATA MQ-7 GAS SENSOR* [online]. 2021 [cit. 28. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://image.dfrobot.com/image/data/SEN0132/MQ-7.pdf>>.
- [51] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *TPS54331 3-A, 28-V Input, Step Down DC-DC Converter With Eco-mode™* [online]. 2014 [cit. 28. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54331.pdf>>.
- [52] MICRODIODE ELECTRONICS. *SS52 THRU SS5200* [online]. 2021 [cit. 28. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.farnell.com/datasheets/1441695.pdf>>.
- [53] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Miniature Helical PCB Antenna for 868 MHz or 915/920 MHz* [online]. 2012 [cit. 29. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.ti.com/lit/an/swra416/swra416.pdf>>.
- [54] ROTRONIC. *The Capacitive Humidity Sensor – How it Works & Attributes of the Uncertainty Budget* [online]. 2021 [cit. 17. listopadu 2021]. Dostupné na: <https://www.rotronic.com/media/productattachments/files/ca/capacitive_humidity_sensor_final.pdf>.

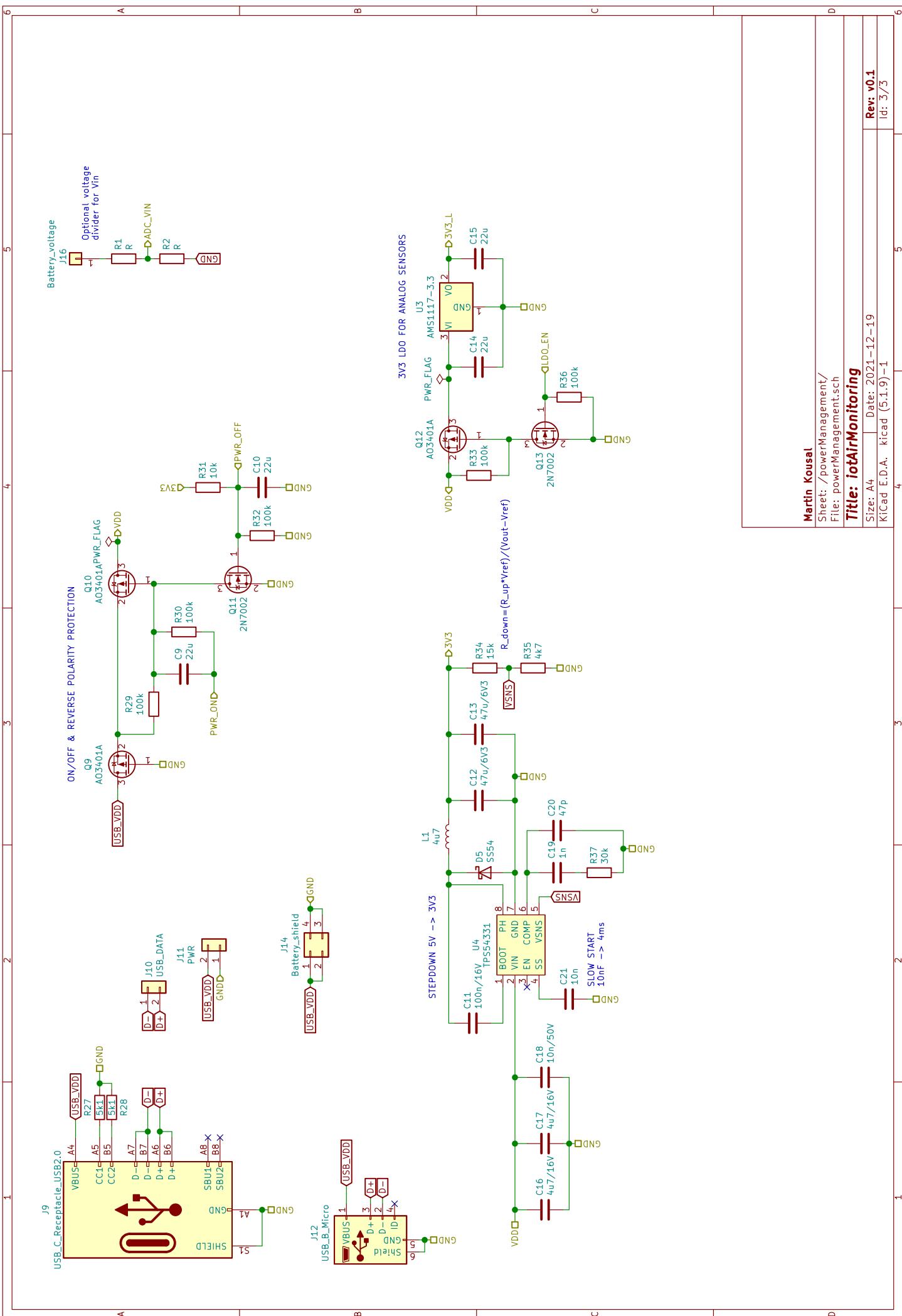
Seznam příloh

A Schéma zapojení zařízení	60
B Foto realizované desky plošných spojů	64

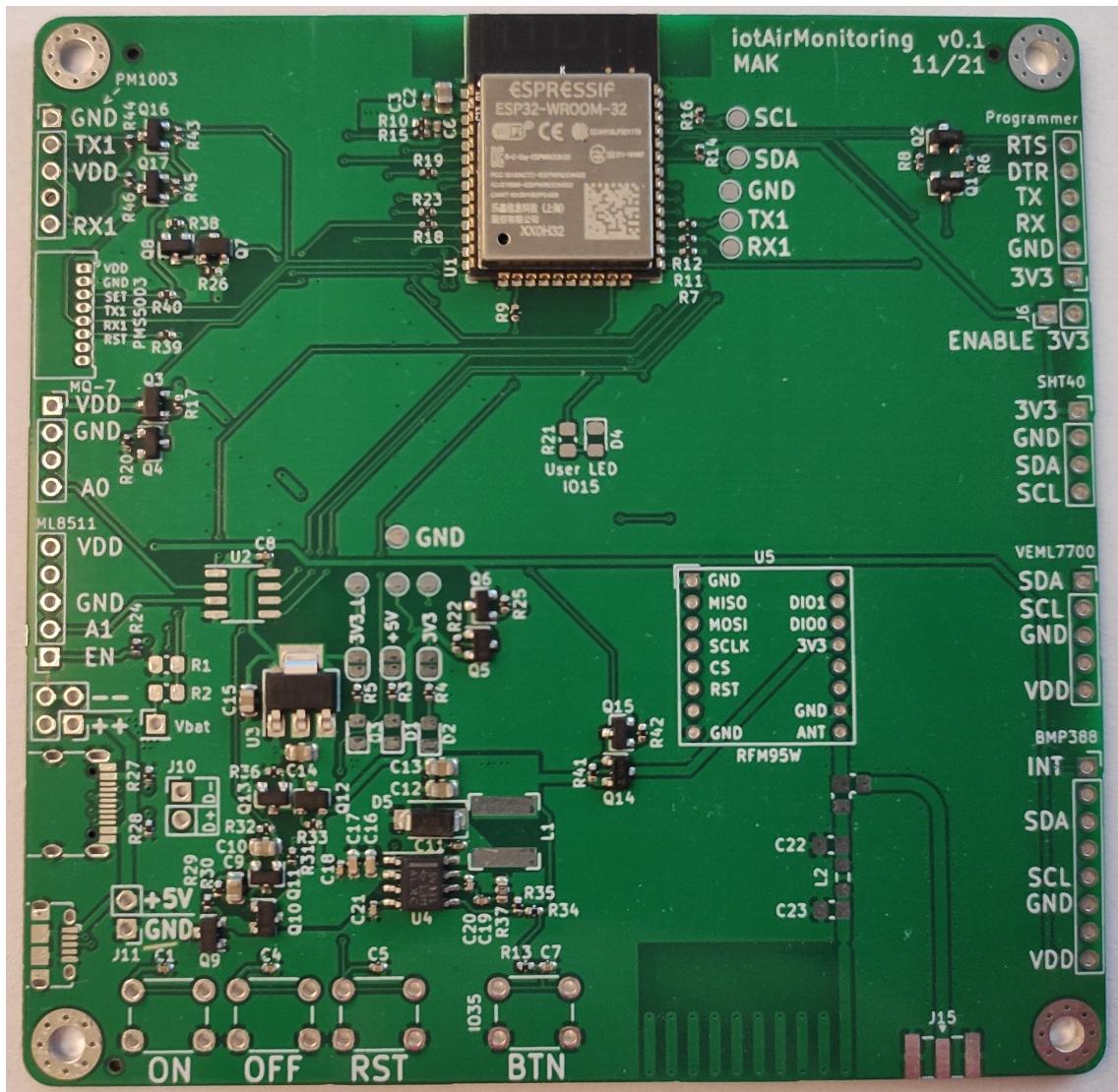
A Schéma zapojení zařízení



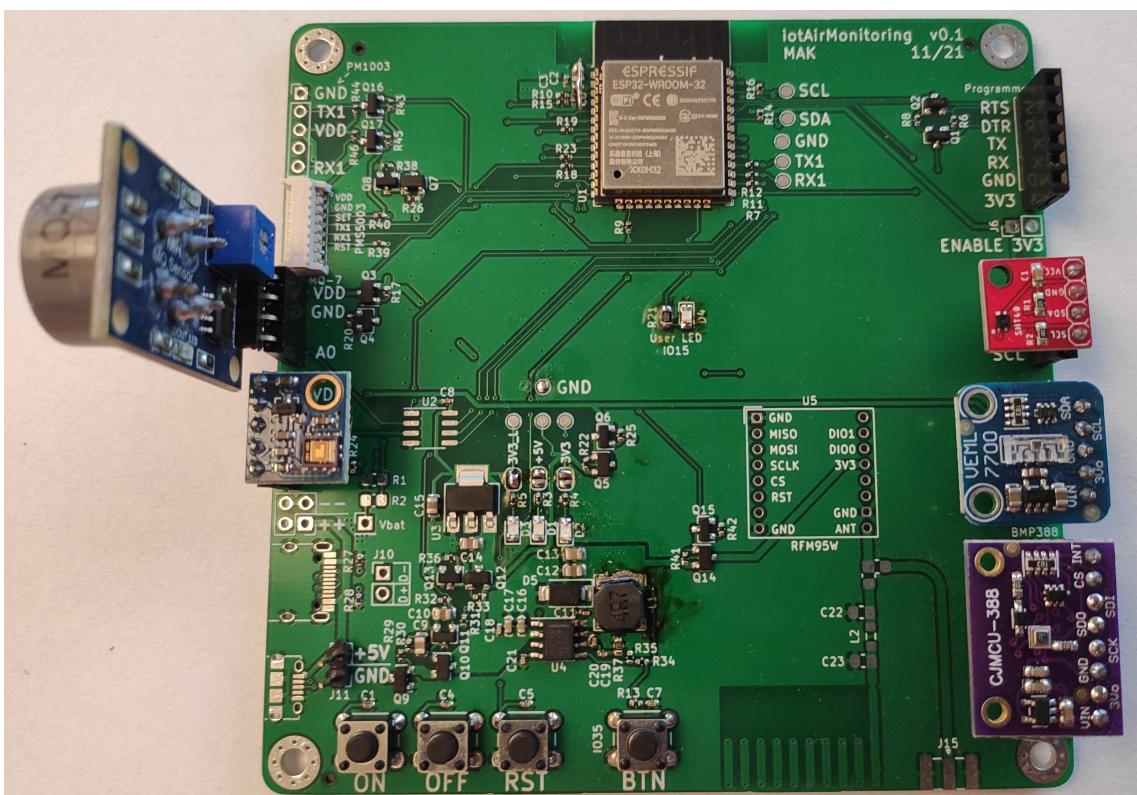




B Foto realizované desky plošných spojů



Obr. B.1: Foto realizované desky osazené z výroby.



Obr. B.2: Foto realizované desky včetně doosazení součástek a přidání modulů se senzory.