



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOTELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

IOT MONITORING OVZDUŠÍ

IOT AIR MONITORING

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kousal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2021



Semestrální 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.

BPC/BKC-SEP:

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 měřicí 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.

BPC/BKC-BAP:

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.

Pozn.:

Výhodou je základní znalost programování v prostředí Matlab a C.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Air Pollution Detector. Instructables circuits [online]. Autodesk, 2018 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Air-Pollution-Detector/>
- [2] Analyzing Weather Data from an Arduino-based weather station. MathWorks [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47049-analyzing-weather-data-from-an-arduino-based-weather-station>

Termín zadání: 20.9.2021

Termín odevzdání: 3.1.2022

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

ABSTRAKT

Abstrakt práce v originálním jazyce

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

ABSTRACT

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KEYWORDS

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KOUSAL, Martin. *IoT monitoring ovzduší*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2021, 46 s. Semestrální 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: Semestrální 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/diplomové/disertační práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Teoretická část	13
1.1 Měření oxidu uhelnatého	13
1.1.1 Optický senzor	13
1.1.2 Elektrochemický senzor	13
1.1.3 Polovodičový senzor	14
1.2 Měření koncentrace prachových částic	14
1.3 Měření intenzity osvětlení	15
1.3.1 Fotodiody	15
1.3.2 Fototranzistory	16
1.4 Měření UV záření	16
1.4.1 UVA záření	16
1.4.2 UVB záření	16
1.4.3 UVC záření	16
1.5 Měření teploty	17
1.5.1 Kovové senzory	17
1.5.2 Termočlánky	17
1.5.3 Polovodičové senzory	17
1.6 Měření atmosférického tlaku	18
1.6.1 Piezoelektrické senzory	18
1.6.2 MEMS senzory	18
1.7 Měření vzdušné vlhkosti	18
1.8 IoT sítě	19
1.8.1 LoRa	20
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 uhelnatého	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	28
2.1.7	Senzor měření vlhkosti	28
2.2	Výběr řídícího mikrokontroléru	29
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	33
2.4.1	Výběr step-down měniče	33
Závěr		34
Literatura		35
Seznam symbolů a zkratek		39
Seznam příloh		40
A Některé příkazy balíčku <i>thesis</i>		41
A.1	Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	41
A.2	Příkazy pro sazbu symbolů	41
B Druhá příloha		42
C Příklad sazby zdrojových kódů		43
C.1	Balíček <i>listings</i>	43
D Obsah elektronické přílohy		46

Seznam obrázků

1	Blokový diagram výsledné funkce zařízení	12
1.1	Blokové schéma senzoru prachových částic PM1003. [1]	15
1.2	MEMS kapacitní senzor tlaku. [2]	19
1.3	Ukázka průběhu rozprostřeného spektra v čase.	20
1.4	Typické zapojení LoRaWAN sítě. [3]	21
2.1	Senzor pro měření koncentrace prachových částic PMS5003. [4]	24
2.2	Senzor pro měření koncentrace oxidu uhelnatého. [5]	25
2.3	Senzor pro měření teploty SHT40. [6]	26
2.4	Senzor pro měření intenzity osvětlení VEML7700. [7]	27
2.5	Srovnání parametrů vybraných mikrokontrolerů.	29
2.6	Blokový diagram mikrokontroleru ESP32.[8]	30
2.7	LoRa modul RFM95W.	32
B.1	Alenčino zrcadlo	42

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
A.1	Přehled příkazů	41

Seznam výpisů

C.1	Ukázka sazby zkratek	43
C.2	Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.	44
C.3	Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.	45

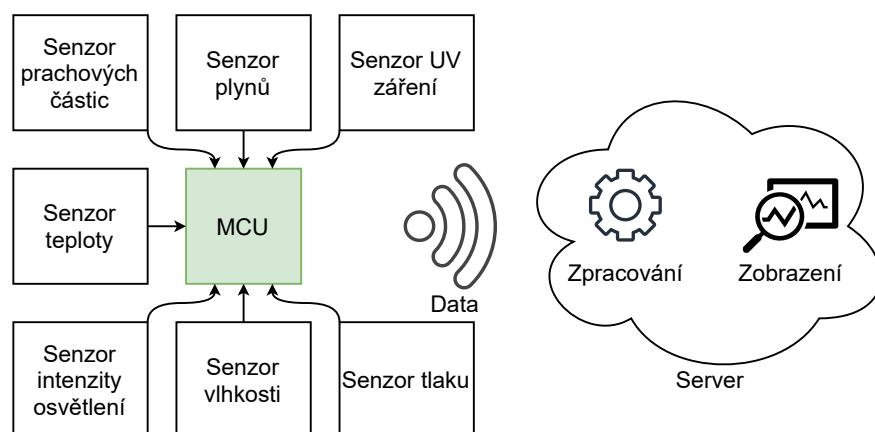
Úvod

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 pásmo a přenáší data na server, kde se dále zpracovávají a vyhodnocují. Lze je tedy dnes najít i v běžné domácnosti, 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 tedy 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

V teoretické části práce se zaměřím na teoretické principy, na kterých pracují 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 napětí či proudu jím protékajícím.

1.1 Měření oxidu uhelnatého

Oxid uhelnatý je jedovatý plyn bez chuti a zápachu. Vzniká nejčastěji při nedokonalém hoření převážně pevných paliv ale i plynů, proto je třeba jeho hodnotu hlídat. Udává se, že zhruba od 100 ppm je u většiny lidí přítomen nějaký ze symptomů trávy tímto plynem (bolest hlavy, únavu, nevolnost).

1.1.1 Optický senzor

Oxid uhelnatý 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 pyrodetektora. Tento princip měření je nejpřesnější, podává stabilní výsledky a má dlouhou životnost. Bohužel je velice drahý a tak jej není možné použít v domácích zařízeních.

1.1.2 Elektrochemický senzor

Tento druh senzor 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 poté následně zesílena do měřitelné podoby a odpovídá koncentraci oxidu uhelnatého. Bohužel díky nutnosti chemické reakce několika přítomných látek není tento druh senzoru možné zkonstruovat 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.

1.1.3 Polovodičový senzor

Poslední a zároveň nejlevnější možností měření koncentrace oxidu uhelnatého 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. Nevýhodou těchto systémů je ovšem 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.

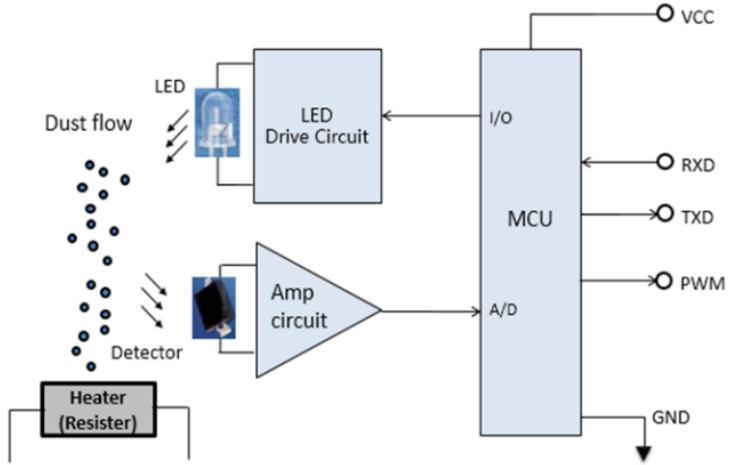
1.2 Měření koncentrace prachových částic

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 o velikosti 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 detekovat.

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



Obr. 1.1: Blokové schéma senzoru prachových částic PM1003. [1]

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 nahrazeny topným elementem (nejčastěji výkonový rezistor), kterým protéká proud a ohřívá vzduch okolo. Ten 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.

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 tranzistor NPN, který má volnou bázi. Při výrobě jsou konstruovány tak, aby dopadající fotony dopadly do oblasti kolektoru 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 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.

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 běžně 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 dokáže ovlivnit fotosyntézu a také způsobit jejich úhyn.

1.4.3 UVC záření

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

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 a PTC, podle toho, jestli mají negativní teplotní koeficient, nebo pozitivní. Například platinové teplotní čidlo je možné použít pro velký rozsah teplot, od zhruba -200°C do zhruba 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 $^{\circ}$). 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 rovnicí (1.1).

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

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.

1.6 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. Takováto měřidla 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.

1.6.1 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.

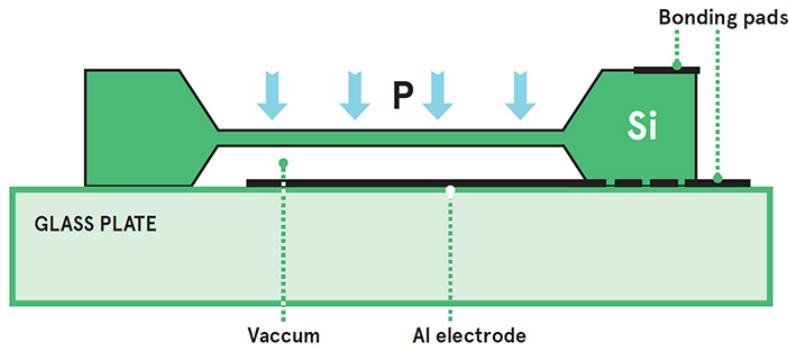
1.6.2 MEMS senzory

V dnešní době jsou velice rozšířené tzv. MEMS senzory. Jsou založeny na principu spojení mikro-mechanického principu s elektrickým principem. Nejčastěji je pro měření tlaku při tomto principu využíváno vlastností 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 1.2. 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.

1.7 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



Obr. 1.2: MEMS kapacitní senzor tlaku. [2]

i kvůli elektronice a jiným strojům. Pokud si vezmeme teplotu 0° 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 mateříalu, 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.

1.8 IoT sítě

Tyto sítě jsou uzpůsobeny pro přenos relativně krátkých datových zpráv na velmi velké vzdálenosti a to vše při zachování nízké spotřeby. Dosaž je většinou určen podle nosného kmitočtu, na kterém přenos funguje, podle dostupné šířky pásma 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 technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT. První dvě zmíněné pracují v bezlicenčním pásmu, kdežto poslední využívá licenční pásmo. Bezlicenční pásmata 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 částečkách práce se budu věnovat jednotlivým sítím

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



Obr. 1.3: Ukázka průběhu rozprostřeného spektra v čase.

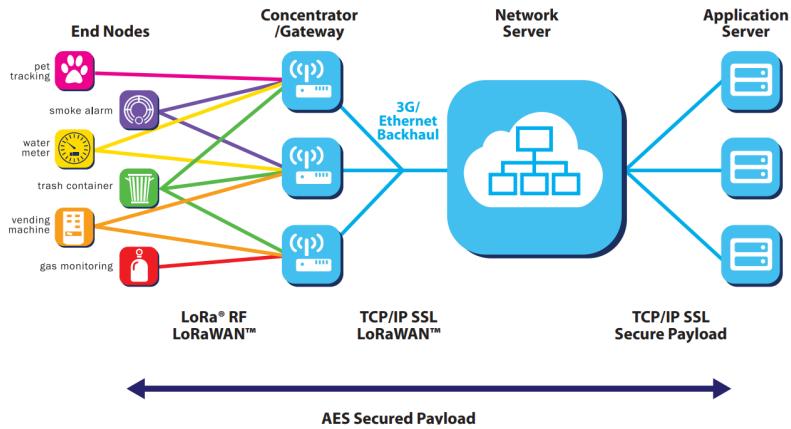
podrobněji.

1.8.1 LoRa

LoRa (Long Range) je fyzická vrstva, kterou využívá síť LoRaWAN a jak již bylo zmíněno, je určena pro provoz v bezlicenčním ISM pásmu 868 MHz. 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 pásma 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 1.3 je vidět příklad průběhu amplitudy rozloženého spektra v závislosti na čase.

1.8.2 LoRaWAN

LoRaWAN definuje princip komunikační sítě a také použitý protokol, pro svou komunikaci využívá již víše zmíněnou fyzickou vrstvu LoRa. Nejčastěji se využívá zapojení sítě do hvězdy, což umožňuje jednoduše škálovat dostupnost sítě. Pro běh sítě je třeba 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). Ná obrázku 1.4 je vidět příklad zapojení takovéto sítě. Je patrné, že koncová zařízení nemají pevně přiřazenou gateway na



Obr. 1.4: Typické zapojení LoRaWAN sítě. [3]

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, kdy je po celou dobu přenosu zprávy od koncového zařízení až na aplikaci 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 limitováni na maximální vysílací čas 30 s pro uplink a maximálně 10 zpráv na downlink pro jednu node (zařízení) na den [9]. Hlavný 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 poskytovatel, ke kterému se musíme zaregistrovat a on nám poté poskytne připojení a přenos zpráv

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

³<https://www.thethingsnetwork.org/>

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 šířkou 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 ČR 94 % [10].

1.8.4 NB-IoT

Síť NB-IoT je LPWAN síť, kde její standardy definuje partnerský projekt 3GPP[11]. I u tohoto typu sítě je opět snaha minimalizovat velikost posílaných zpráv, mít co největší dosah a to vše za udržení minimálních energetických nároků. Díky tomu, že lze síť provozovat na již existující infrastrukturě 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 pásmo 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 kHz s^{-1} .

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 zpracovávatelský 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 pokrývání. 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 bude zabývat návrhem hardwaru celého zařízení. Jedním z hlavních požadavků je nízká spotřeba, kterou bude třeba zohlednit při vybírání použitých senzorů, řídícího mikroprocesoru, komunikačního modulu a ostatních obvodových komponent.

2.1 Výběr senzorů

Celé zařízení bude schopno měřit koncentraci prachových částic, koncentraci oxidu uhelnatého, intenzitu osvětlení, intenzitu UV záření, teplotu, atmosférický tlak a relativní vlhkost. V následujících částech tedy bude 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.

Název	Rozlišení	Přesnost	Proud	Čas čtení
PMS5003	$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$0 - 100 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 10 \mu\text{g}$ $100 - 500 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 10 \%$	100 mA	10 s
PM1003	$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$0 - 100 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 30 \mu\text{g}$ $100 - 500 \mu\text{g m}^{-3}: \pm 30 \%$	90 mA	30 s
PM1006	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	$0.5 \text{ V}/100 \mu\text{g m}^{-3}$	záleží na ADC	20 mA	1 s

Tab. 2.1: Porovnání vybraných parametrů senzorů koncentrace prachových částic

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. [4]

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 uhelnatého

U senzorů oxidu uhelnatého je situace o něco složitější. Na trhu neexistuje mnoho možností, ze kterých by se dalo v rozumné cenové kategorii vybírat. Pokud se podíváme do katalogů většiny (nejen českých) obchodů, zjistíme, že ceny čidel se pohybují ve vyšších stovkách korun až po několik tisíc. Tato cena je pro neprofesionální měření nepřijatelná. Jediným možným rozumným výběrem jsou čidla s označením série MQ od výrobce Hanwei electronics¹. Vybral jsem tedy čidlo s označením MQ-7, které je nejvíce citlivé právě na oxid uhelnatý. Funguje na principu ohřevu senzitivní vrstvy (zde konkrétně z materiálu SnO_2) a následně měření jejího odporu. Senzor

¹<https://www.hwsensor.com/>



Obr. 2.2: Senzor pro měření koncentrace oxidu uhelnatého. [5]

je třeba napájet z 5 V a jeho výstup je třeba přivést na AD převodník, jelikož má analogový výstup.

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 LAMIS 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 datasheetu [12] 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.

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

Název	Rozsah	Přesnost	Spotřeba	Cena
DS18B20	-55 °C - 125 °C	±0.5 °C	1.5 mA	68 Kč
LM75A	-25 °C - 100 °C	±2 °C	280 µA	25 Kč
SHT31	-40 °C - 90 °C	±0.3 °C	350 µA	158 Kč
SHT35	-40 °C - 90 °C	±0.2 °C	1.5 mA	378 Kč
SHT40	-40 °C - 125 °C	±0.2 °C	350 µA	109 Kč

Tab. 2.2: Srovnání parametrů vybraných senzorů teploty.



Obr. 2.3: Senzor pro měření teploty SHT40. [6]

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.

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 µA při měření a až 3.4 µA v nečinném stavu a také relativně vysoké přesnosti, která je až 0.2 °C. Napájení senzoru je 3.3 V. S mikroprocesorem senzor komunikuje pomocí sběrnice I²C.

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

²<https://www.laskarduino.cz/>

dělič, na kterém budeme měřiti 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 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.

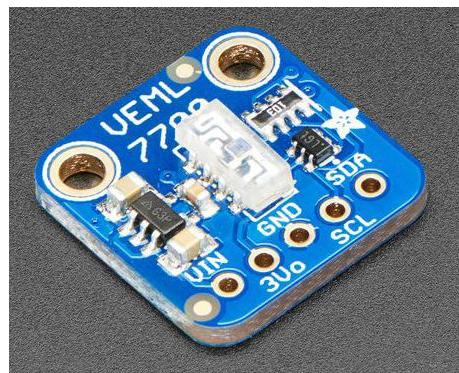
Mnohem vhodnějším typem senzorů pro toto konkrétní použití je tak integrovaný senzor, který obsahuje jednak samotnou na světlo citlivou vrstvu a druhak i řídící logiku, která nám poskytuje digitální výstup ze senzoru například ve formě sériové sběrnice.

V tabulce 2.3 jsou uvedeny vybrané druhy integrovaných senzorů a jejich základní vlastnosti.

Název	Rozsah	Spotřeba
GY-302 BH1750	0-65 535 lx	200 μ A
TSL2561	0-40 000 lx	0.6 mA
VEML7700	0-120 000 lx	50 μ A

Tab. 2.3: Srovnání parametrů vybraných senzorů intenzity osvětlení.

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 stejně 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. [7]

Název	Rozsah	Přesnost	Spotřeba
BMP180	300-1100 hPa	± 3 Pa	12 μ A
BMP280	300-1100 hPa	± 1.3 Pa	2.7 μ A
BMP388	300-1250 hPa	± 8 Pa	3.4 μ A
BME280	300-1100 hPa	± 2 Pa	7.1 μ A
ICP-10100	300-1150 hPa	± 3.2 Pa	10.4 μ A

Tab. 2.4: Srovnání parametrů vybraných senzorů atmosférického tlaku.

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.

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 ± 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 nejdůležitějších 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 zjednoduší 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.

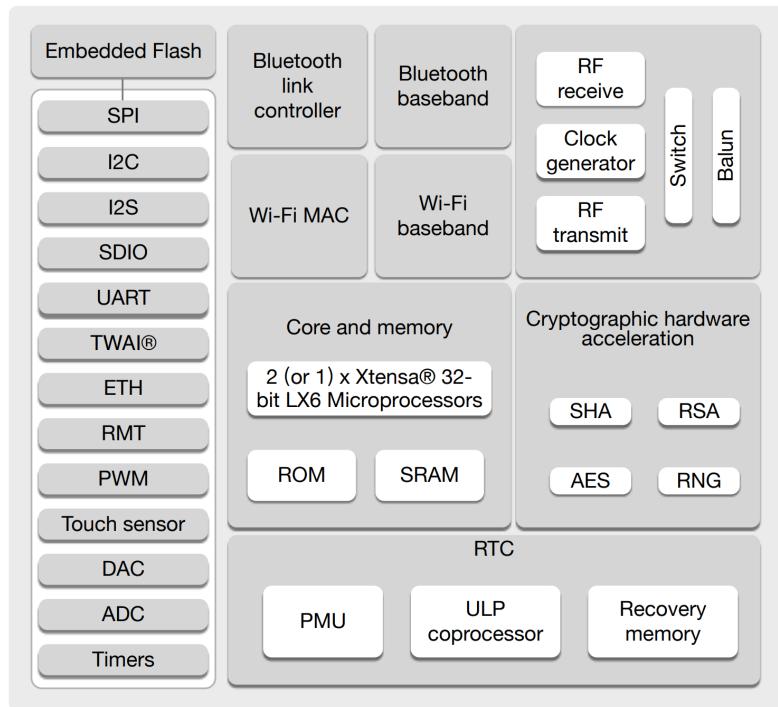
Pro výběr v této práci budu uvažovat výběr mikrokontrolerů od největších výrobců jako jsou STMicroelectronics, Atmel (dnes Microchip) nebo Espressif Systems. Existuje samozřejmě spousta dalších výrobců, ale tihle uvedení jsou jedni z největších, nejznámějších a nejdostupnějších. Porovnání ceny v tabulce 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.

Název	I ² C	SPI	GPIO	USART	WiFi	Cena
ATmega328P [13]	1	1	23	1	Ne	70 Kč
ESP32 WROOM [8]	2	4	34	3	Ano	80 Kč
ATSAM4LC2 [14]	2	1	27	3	Ne	90 Kč
STM8L162R8T6 [15]	1	2	54	3	Ne	110 Kč
STM32L051C8T6 [16]	2	2	37	2	Ne	180 Kč

Obr. 2.5: Srovnání parametrů vybraných mikrokontrolerů.

Z výše uvedené tabulky 2.5 jsem nakonec vybral mikrokontroler ESP32 WROOM od výrobce Espressif Systems. Z hlediska ceny není nejlevější, 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

³<https://www.tme.eu/cz/>



Obr. 2.6: Blokový diagram mikrokontroleru ESP32.[8]

žádný další modul. Mikrokontroler běží 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 při práci i v mnoha režimech spánku, které je možné aktivovat. Hlavní dvě jádra mikrokontroleru jsou doplněna o tzv. ULP (Ultra Low Power) koprosesory, které je možné aktivovat v režimu spánku a vykonávat tak velice jednoduché sekvence příkazů a ovládat například výstupní piny. Na obrázku 2.6 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 zvlášť, jak je zmíněno přímo v oficiální dokumentaci⁴. Nelze provádět ani kalibraci

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

na jednom daném vzorku pro danou výrobní sérii.

Kvůli těmto 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 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.[17]. Obsahuje dva kanály s rozlišením 12 bitů. Připojení k mikrokontroleru je provedeno přes sběrnici SPI a maximální spotřeba při čtení je $550 \mu\text{A}$ při 5 V napájení.

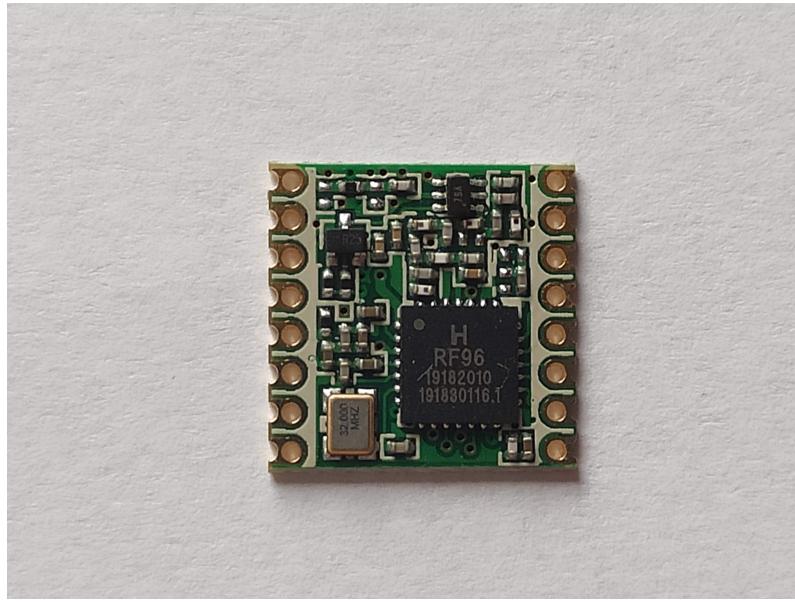
2.3 Přenos dat na server

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 se tam data dostala. Pro první pokusy bude nejjednodušší použití sítě WiFi, do které se se zařízením lze jednoduše připojit a poté se lze připojit na zpracovávatelský 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. Další 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 řádově větší vzdálenosti. Jako nejjednodušší 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 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

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



Obr. 2.7: LoRa modul RFM95W.

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 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[18] 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 [19], 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 interruptu), 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.

⁶<https://www.thethingsnetwork.org/>

2.4 Napájení zařízení

První verze tohoto zařízení bude napájena z 5 V a bude tak možné využít např. mobilní nabíječky či powerbanky. Výhodou tohoto řešení je zaručený zdroj napětí 5 V a odpadá také nutnost například hlídání stavu baterií nebo řízení jejich nabíjení. V budoucích verzích ovšem chci zařízení napájet právě z baterií, aby odpadla nutnost mít k dispozici elektrickou rozvodnou síť a aby zařízení bylo použitelné kdekoli.

Celé zařízení ke své funkci tedy potřebuje napětí 5 V a 3.3 V. První ze zmíněných napětí bude bráno přímo ze zdroje (nabíječka nebo powerbanka) a není třeba se o něj více starat, jelikož tyto zařízení mají integrované různé druhy ochran (přepětí, nadprudová aj.). Je tedy třeba zajistit napájecí zdroj poskytující napětí 3.3 V. Pro tyto účely bude třeba použít tzv. step-down měnič. Jelikož bude použit také externí AD převodník, je vhodné mu zajistit 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.

2.4.1 Výběr step-down měniče

Step-down 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.

Já jsem pro svou práci vybral step-down měnič TPS54331 od výrobce Texas Instruments Incorporated[20].

Závěr

Shrnutí studentské práce.

Literatura

- [1] CUBIC. *Infrared LED Particle Sensor Module* [online]. 2018 [cit. 18. listopadu 2021]. Dostupné na: <http://rackcdn.com/Cubic_PM1003_DS.pdf>.
- [2] 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>>.
- [3] 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>.
- [4] 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>>.
- [5] 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>.
- [6] LASKARDUINO.CZ. *LaskaKit SHT40 Senzor teploty a vlhkosti vzdachu / laskarduino.cz* [online]. 2021 [cit. 5. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.laskarduino.cz/laskakit-sht40-senzor-teploty-a-vlhkosti-vzduchu/>.
- [7] 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.htm>.
- [8] 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.
- [9] THE THINGS INDUSTRIES. *Duty Cycle* [online]. 2021 [cit. 20. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/#fair-use-policy>>.
- [10] SIGFOX. *Sigfox.cz - Connecting things* [online]. 2021 [cit. 20. listopadu 2021]. Dostupné na: <<https://sigfox.cz/cs>>.

- [21] 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>.
- [22] SHARP. *GP2Y1010AU0F* [online]. 2021 [cit. 21. listopadu 2021]. Dostupné na: <https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf>.
- [23] 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>.
- [24] MAXIM INTEGRATED. *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* [online]. 2019 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [25] 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>.
- [26] SENSIRION. *Datasheet SHT3x-ARP* [online]. 2016 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: https://www.tme.eu/Document/2e0098c5e5c9e7ad6b9934b65a407be3/Sensirion-SHT3x_analog.pdf.
- [27] 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.
- [28] SENSIRION. *SHT4x* [online]. 2020 [cit. 1. prosince 2021]. Dostupné na: <https://cdn.sos.sk/productdata/79/7c/0364ef45/sht40-ad1b-r2.pdf>.
- [29] 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>.
- [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] 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>.

- [32] BOSCH. *BMP388 - Data sheet* [online]. 2018 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.mouser.com/pdfdocs/BST-BMP388-DS001-01.pdf>.
- [33] 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>.
- [34] BOSCH. *BMP180 Data sheet* [online]. 2013 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
- [35] BOSCH. *BME280 - Data sheet* [online]. 2021 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst>
- [36] BOSCH. *BMP280: Data sheet* [online]. 2018 [cit. 7. prosince 2021]. Dostupné na: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-274.2.pdf>.

Seznam symbolů a zkratek

Šířka levého sloupce **Seznamu symbolů a zkratek** je určena šířkou parametru prostředí acronym (viz řádek 1 výpisu zdrojáku na str. 43)

KolikMista pouze ukázka vyhrazeného místa

DSP číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing

f_{vz} vzorkovací kmitočet

Seznam příloh

A Některé příkazy balíčku thesis	41
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	41
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů	41
B Druhá příloha	42
C Příklad sazby zdrojových kódů	43
C.1 Balíček listings	43
D Obsah elektronické přílohy	46

A Některé příkazy balíčku thesis

A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek

Tab. A.1: Přehled příkazů pro matematické prostředí

Příkaz	Příklad	Zdroj příkladu	Význam
<code>\textind{...}</code>	β_{\max}	$\$\\beta_{\\textind{max}}$$	textový index
<code>\const{...}</code>	U_{in}	$\$\\const{U}_{\\textind{in}}$$	konstantní veličina
<code>\var{...}</code>	u_{in}	$\$\\var{u}_{\\textind{in}}$$	proměnná veličina
<code>\complex{...}</code>	u_{in}	$\$\\complex{u}_{\\textind{in}}$$	komplexní veličina
<code>\vect{...}</code>	\mathbf{y}	$\$\\vect{y}$$	vektor
<code>\mat{...}</code>	\mathbf{Z}	$\$\\mat{Z}$$	matice
<code>\unit{...}</code>	kV	$\$\\unit{kV}$ či \unit{kV}$	jednotka

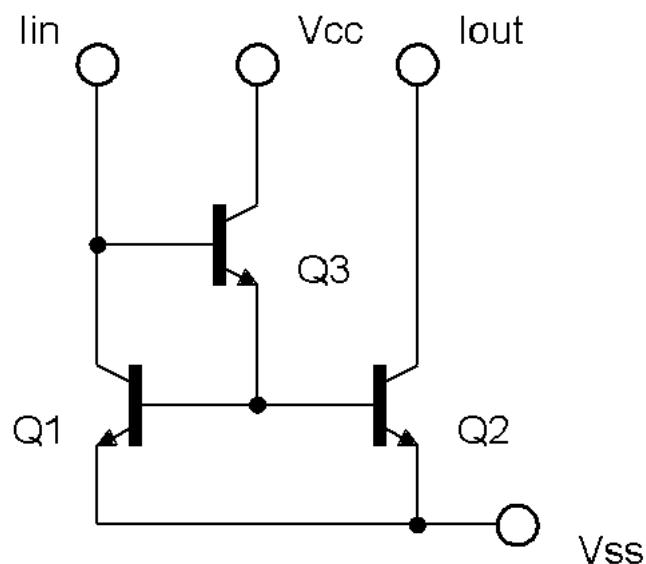
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů

- `\E`, `\eul` – sazba Eulerova čísla: e,
- `\J`, `\jmag`, `\I`, `\imag` – sazba imaginární jednotky: j, i,
- `\dif` – sazba diferenciálu: d,
- `\sinc` – sazba funkce: sinc,
- `\mikro` – sazba symbolu mikro stojatým písmem¹: μ,
- `\uppi` – sazba symbolu π (stojaté řecké pí, na rozdíl od `\pi`, což sází π).

Všechny symboly jsou určeny pro matematický mód, vyjma `\mikro`, jenž je použitelný rovněž v textovém módu.

¹znak pochází z balíčku `textcomp`

B Druhá příloha



Obr. B.1: Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo.

Pro sazbu vektorových obrázků přímo v L^AT_EXu je možné doporučit balíček TikZ. Příklady sazby je možné najít na T_EXample. Pro vyzkoušení je možné použít programy QTikz nebo TikzEdt.

C Příklad sazby zdrojových kódů

C.1 Balíček `listings`

Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít balíček `listings`. Balíček zavádí nové prostředí `lstlisting` pro sazbu zdrojových kódů, jako například:

```
\section{Balíček lstlisting}
Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít
    balíček \href{https://www.ctan.org/pkg/listings}%
    {\texttt{listings}}.
Balíček zavádí nové prostředí \texttt{lstlisting} pro
    sazbu zdrojových kódů.
```

Podporuje množství programovacích jazyků. Kód k vysázení může být načítán přímo ze zdrojových souborů. Umožňuje vkládat čísla řádků nebo vypisovat jen vybrané úseky kódu. Např.:

Zkratky jsou sázeny v prostředí `acronym`:

```
6 \begin{acronym}[KolikMista]
```

Šířka textu volitelného parametru `KolikMista` udává šířku prvního sloupce se zkratkami. Proto by měla být zadávána nejdélší zkratka nebo symbol. Příklad definice zkratky f_{vz} je na výpisu C.1.

Výpis C.1: Ukázka sazby zkratky

```
21 \acro{symfvz} % název
22 [\ensuremath{f_{\text{vz}}}] % symbol
23 {vzorkovací kmitočet} % popis
```

Ukončení seznamu je provedeno ukončením prostředí:

```
26 \end{acronym}
```

Poznámka k výpisům s použitím volby jazyka `czech` nebo `slovak`:

Pokud Váš zdrojový kód obsahuje znak spojovníku `-`, pak překlad může skončit chybou. Ta je způsobena tím, že znak `-` je v českém nebo slovenském nastavení balíčku `babel` tzv. aktivním znakem. Přepněte znak `-` na neaktivní příkazem `\shorthandoff{-}` těsně před výpisem a hned za ním jej vratte na aktivní příkazem `\shorthandon{-}`. Podobně jako to je ukázáno ve zdrojovém kódu `šablony`.

Na výpisu C.2 naleznete příklad kódu pro Matlab, na výpisu C.3 zase pro jazyk C.

Výpis C.2: Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.

```
1 %% Priklad testovani stability filtrov  
2  
3 % koeficienty polynomu ve jmenovateli  
4 a = [ 5, 11.2, 5.44, -0.384, -2.3552, -1.2288];  
5 disp( 'Polynom:' ); disp(poly2str( a, 'z' ))  
6  
7 disp('Kontrola pomocí korenů polynomu:');  
8 zx = roots( a );  
9 if( all( abs( zx ) < 1 ))  
10    disp('System je stabilní')  
11 else  
12    disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');  
13 end  
14  
15 disp(' '); disp('Kontrola pomocí Schur-Cohn:');  
16 ma = zeros( length(a)-1,length(a) );  
17 ma(1,:) = a/a(1);  
18 for( k = 1:length(a)-2)  
19    aa = ma(k,1:end-k+1);  
20    bb = fliplr( aa );  
21    ma(k+1,1:end-k+1) = (aa-aa(end)*bb)/(1-aa(end)^2);  
22 end  
23  
24 if( all( abs( diag( ma.' ) ) ) )  
25    disp('System je stabilní')  
26 else  
27    disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');  
28 end
```

Výpis C.3: Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.

```

// první kanonická forma
short fxdf2t( short coef[][][5], short sample)
{
    static int v1[SECTIONS] = {0,0}, v2[SECTIONS] = {0,0};
    int x, y, accu;
    short k;

    x = sample;
    for( k = 0; k < SECTIONS; k++){
        accu = v1[k] >> 1;
        y = _sadd( accu, _smpy( coef[k][0], x));
        y = _ssh1(y, 1) >> 16;

        accu = v2[k] >> 1;
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][1], x));
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][2], y));
        v1[k] = _ssh1( accu, 1);

        accu = _smpy( coef[k][3], x);
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][4], y));
        v2[k] = _ssh1( accu, 1);

        x = y;
    }
    return( y);
}

```

D Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha je často nedílnou součástí semestrální nebo závěrečné práce. Vkládá se do informačního systému VUT v Brně ve vhodném formátu (ZIP, PDF ...).

Nezapomeňte uvést, co čtenář v této příloze najde. Je vhodné okomentovat obsah každého adresáře, specifikovat, který soubor obsahuje důležitá nastavení, který soubor je určen ke spuštění, uvést nastavení kompilátoru atd. Také je dobré napsat, v jaké verzi software byl kód testován (např. Matlab 2018b). Pokud bylo cílem práce vytvořit hardware zařízení, musí elektronická příloha obsahovat veškeré podklady pro výrobu (např. soubory s návrhem DPS v Eagle).

Pokud je souborů hodně a jsou organizovány ve více složkách, je možné pro výpis adresářové struktury použít balíček `dirtree`.

```
/..... kořenový adresář přiloženého archivu
  logo ..... loga školy a fakulty
    BUT_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    BUT_color_PANTONE_EN.pdf
    FEEC_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    FEKT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_EN.pdf
    VUT_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
  obrazky ..... ostatní obrázky
    soucastky.png
    spoje.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloNPN.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloPNP.png
  pdf ..... pdf stránky generované informačním systémem
    student-desky.pdf
    student-titulka.pdf
    student-zadani.pdf
  text ..... zdrojové textové soubory
    literatura.tex
    prilohy.tex
    reseni.tex
    uvod.tex
    vysledky.tex
    zaver.tex
    zkratky.tex
  sablona-obhaj.tex ..... hlavní soubor pro sazbu prezentace k obhajobě
  sablona-prace.tex ..... hlavní soubor pro sazbu kvalifikační práce
  thesis.sty ..... balíček pro sazbu kvalifikačních prací
```