



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

SENZOR PRO MĚŘENÍ KONCENTRACE OXIDU UHLIČITÉHO V OVZDUŠÍ

SENSOR FOR MEASURING THE CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE IN THE AIR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Garncarz

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Garncarz

ID: 246815

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Senzor pro měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte rešerši metod pro měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. Porovnejte jednotlivé metody měření, konstrukční principy a způsoby zajištění dlouhodobé stability modulů. Zaměřte se na principy, které umožňují využití v aplikacích s nízkým odběrem energie. Pro tyto vybrané měřicí principy najděte dostupná komerční řešení. Vyberte vhodné moduly a senzory pro další porovnání. Navrhněte a realizujte vhodný hardware pro vyčítání naměřených hodnot ze senzorů.

Zvolte vhodnou metodiku měření a proveďte porovnání jednotlivých senzorů z pohledu jejich dlouhodobé stability a spotřeby energie. Získané údaje statisticky zpracujte a proveďte diskusi získaných výsledků.

Konzultant: Ing. Petr Ševčík, Comet system s.r.o.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WONG, Jacob Y a ANDERSON, Roy L. Non-Dispersive Infrared Gas Measurement. Ifsa Publishing, 2012. ISBN 978-8461597321.

[2] DINH, Trieu-Vuong; CHOI, In-Young; SON, Youn-Suk a KIM, Jo-Chun. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. Online. Sensors and Actuators B: Chemical. 2016, roč. 231, s. 529-538. ISSN 09254005

[3] JIA, Xiaoning; ROELS, Joris; BAETS, Roel a ROELKENS, Gunther. A Miniaturised, Fully Integrated NDIR CO2 Sensor On-Chip. Online. Sensors. 2021, roč. 21, č. 16. ISSN 1424-8220.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 2.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, 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 práce se zabývá principy měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. Jsou rozebrány základní principy měření koncentrace CO₂ a jejich výhody a nevýhody. Podrobněji je popsán nízkoodběrový princip měření koncentrace oxidu uhličitého založený na ne-disperzní infračervené analýze (NDIR).

Ve druhé části práce je popsán návrh testovacího zařízení určeného pro provedení srovnávacích měření vybraných komerčně dostupných senzorů oxidu uhličitého. Dále je proveden výběr senzorů, jež budou podrobeny srovnávacím měřením. Je provedeno měření parametrů senzorů se zaměřením na dlouhodobou stabilitu senzorů bez nutnosti automatické kalibrace a proudový odběr senzorů. Výsledky jsou diskutovány a na jejich základě je z uvedených senzorů vybrán vhodný senzor pro použití do zařízení vyráběných zadavatelem této práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

CO₂, DC/DC měnič, Dlouhodobá stabilita, Firmware, I²C, Infračervené záření, Krátkodobá stabilita, Mikrokontrolér, NDIR, PAS, Proudový odběr, Raspberry Pi Pico, RTC, Teplotní závislost, Tlaková kompenzace, Wi-Fi

ABSTRACT

This thesis deals with principles of measuring the concentration of carbon dioxide in the air. The basic principles of CO₂ concentration measurement and their advantages and disadvantages are discussed. The low power consumption principle of carbon dioxide concentration measurement based on non-dispersive infrared analysis (NDIR) is described in detail.

The second part of this thesis describes the design of a testing device for carrying out the comparative measurements of selected commercially available carbon dioxide sensors. Furthermore, the selection of the sensors to be subjected to the comparative measurements is made. The measurement of sensor parameters is carried out with focus on long-term sensor stability without the need of automatic calibration and current consumption of the sensors. The results are discussed and on the basis of these results a suitable sensor is selected from the above mentioned sensors for use in devices manufactured by the sponsor of this thesis.

KEYWORDS

CO₂, Current Consumption, DC/DC converter, Firmware, I²C, Infrared Radiation, Long-Term Stability, Microcontroller, NDIR, PAS, Pressure Compensation, Raspberry Pi Pico, RTC, Short-Term Stability, Temperature Dependency, Wi-Fi

GARNCARZ, Martin. *Senzor pro měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Martin Garncarz
VUT ID autora: 246815
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Senzor pro měření koncentrace oxidu uhličitého v 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. Romanu Šotnerovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat vývojovému oddělení firmy Comet System, s.r.o. za podporu a možnost realizace této práce.

Obsah

Úvod	12
1 Principy měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší	13
1.1 Interaktivní principy	13
1.1.1 Elektrochemické senzory	13
1.1.2 Polovodičové senzory	14
1.1.3 Fotoionizační senzory	15
1.1.4 Plamenové ionizační senzory	15
1.1.5 Kolorimetrické senzory	16
1.2 Neinteraktivní principy	16
1.2.1 Laditelná laserová absorpční spektroskopie	16
1.2.2 Nedisperzní infračervená analýza	16
2 Návrh a realizace měřicí desky	22
2.1 Specifikace zařízení	22
2.2 Výběr platformy	23
2.3 Schéma zařízení	24
2.3.1 Mikrokontrolér	26
2.3.2 Vstupní konektor	27
2.3.3 I ² C sběrnice	27
2.3.4 Displej	28
2.3.5 Další výstupy	30
2.3.6 Napájecí subsystém	30
2.3.7 Signály na vstupním konektoru	31
2.4 Návrh desky plošných spojů	32
2.5 Firmware	33
2.5.1 Moduly firmware	35
2.5.2 Popis funkce měřicího jádra	35
2.5.3 Popis funkce komunikačního jádra	36
3 Výběr senzorů	37
3.1 Katalogové údaje senzorů	37
3.1.1 Rozměry	37
3.1.2 Přesnost měření	38
3.1.3 Napájení	39
3.1.4 Odběr elektrického proudu	40
3.1.5 Provozní a skladovací podmínky	41

3.1.6	Další parametry	41
3.2	Obchodní údaje	42
3.2.1	Cenové relace	42
3.2.2	Dostupnost senzoru na trhu a technická podpora výrobce . . .	42
3.3	Výsledky měření na senzorech	43
3.3.1	Přesnost měření a dlouhodobá stabilita senzorů	43
3.3.2	Krátkodobá stabilita měření koncentrace oxidu uhličitého . . .	46
3.3.3	Proudový odběr senzorů	48
3.3.4	Teplotní závislost měření koncentrace oxidu uhličitého	48
3.3.5	Přesnost měření teploty	50
3.3.6	Ohřev senzorů	51
3.3.7	Přesnost měření relativní vlhkosti	52
3.3.8	Tlaková kompenzace měřené hodnoty oxidu uhličitého	52
3.3.9	Další vlastnosti senzorů	53
3.4	Shrnutí výsledků měření a výběr nejvhodnějšího senzoru	54
3.4.1	Senzor EE895	54
3.4.2	Senzor CDM7162	54
3.4.3	Senzor Sunrise	54
3.4.4	Senzor Sunlight	54
3.4.5	Senzor SCD30	55
3.4.6	Senzor SCD41	55
3.4.7	Senzor CozIR-LP3	55
3.4.8	Senzor CM1107N	55
3.4.9	Výběr nejvhodnějšího senzoru	56
3.5	Potvrzení správnosti výběru senzoru	56
3.5.1	Ověření teplotní závislosti	56
3.5.2	Ověření dlouhodobé stability	57
	Závěr	59
	Literatura	60
	Seznam symbolů a zkratk	66
	A Grafické průběhy vybraných měření	68
A.1	Grafické průběhy krátkodobé stability senzorů	68
A.2	Grafické průběhy proudového odběru senzorů	69
	B Obsah elektronické přílohy	73

Seznam obrázků

1.1	Amperometrická elektrochemická metoda měření plynu (převzato a upraveno z [19])	13
1.2	Potenciometrická elektrochemická metoda měření koncentrace plynů .	14
1.3	Polovodičová metoda měření koncentrace plynů (převzato a upraveno z [19])	15
1.4	Schéma uspořádání jednodokomorového (nahore) a dvoukomorového (dole) fotoakustického senzoru (převzato a upraveno z [12])	18
1.5	Schéma uspořádání jednodokanálového (nahore) a dvoukanálového (dole) optického NDIR senzoru (převzato a upraveno z [8])	19
1.6	Schéma uspořádání dvoukanálového NDIR principu s různými délkami kanálů (převzato a upraveno z [8])	20
2.1	Testovací zapojení Raspberry Pi Pico s multiplexory	23
2.2	Blokové schéma testovacího zařízení pro měření CO ₂ senzorů	25
2.3	Detailní blokové schéma vstupního obvodu INPUT (n) testovacího zařízení pro měření CO ₂ senzorů	26
2.4	Schéma připojení mikrokontroleru k desce	26
2.5	Schéma připojení vstupního konektoru pro senzor	27
2.6	Schéma připojení I ² C multiplexoru TCA9548A na I ² C sběrnici I2C0. Ve výsledném návrhu jsou osazeny rezistory R1, R4 a R6 zkratovacími propojkami, rezistory R2, R3 a R5 jsou neosazené.	28
2.7	Schéma připojení EEPROM paměti M24M02, senzoru pro měření okolní teploty a relativní vlhkosti HYT271 a senzoru pro měření aktuálního barometrického tlaku MS5607 (vlevo). Schéma připojení I ² C expandérů pro ovládání napájení senzorů (vpravo).	29
2.8	Schéma připojení displeje pomocí SPI sběrnice k mikrokontroleru (vlevo). Schéma připojení proudového posilovače pro doplňkové EN signály (vpravo).	29
2.9	Schéma DC/DC měniče 24V/5V (nahore). Schéma DC/DC měniče 24V/12V s ovládáním výstupu pomocí relé z mikrokontroleru (uprostřed). Schéma DC/DC měniče pro napájení senzoru (pro každý vstup samostatný měnič) s ovládáním výstupního napětí 3,3V/5V a možností zapnutí/vypnutí měniče (dole)	30
2.10	Schéma vstupního konektoru	31
2.11	Rozmístění obvodových bloků na desce plošných spojů	32
2.12	Testovací zařízení na desce plošných spojů.	33
2.13	Vývojový diagram měřicího jádra. a) Hlavní struktura běhu programu. b) Inicializační funkce. c) Hlavní smyčka.	34

2.14	Vývojový diagram komunikačního jádra. a) Hlavní struktura běhu programu. b) Inicializační funkce. c) Vnější komunikační smyčka. d) Vnitřní komunikační smyčka.	34
3.1	Fotografie vybraných senzorů	38
3.2	Uspořádání pracoviště pro měření dlouhodobé stability senzorů	44
3.3	Grafy dlouhodobé stability měřených senzorů	44
3.4	Uspořádání pracoviště pro měření teplotní závislosti senzorů	49
3.5	Graf teplotní závislosti měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého	49
3.6	Uspořádání pracoviště pro měření přesnosti teplotních čidel senzorů .	50
3.7	Graf závislosti odchylky měřené teploty senzoru od etalonu na teplotě etalonu	50
3.8	Časový průběh teploty měřené senzory po zapnutí napájení v teplotně ustáleném prostředí	51
3.9	Závislost chyby měření relativní vlhkosti na okolní relativní vlhkosti .	52
3.10	Grafy teplotní závislosti naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého pro senzory Sunrise a Sunlight při referenčních koncentracích 1000 ppm a 3000 ppm	57
3.11	Grafy dlouhodobé stability senzorů Sunrise a Sunlight	58
A.1	Graf časového průběhu odchylky naměřené hodnoty od klouzavého průměru pro vybrané senzory – kontinuální režim napájení (vlevo), odpojovaný režim napájení (vpravo)	68
A.2	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru EE895	69
A.3	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CDM7162	69
A.4	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru Sunrise	70
A.5	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru Sunlight	70
A.6	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru SCD30	71
A.7	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru SCD41	71
A.8	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CozIR-LP3	72
A.9	Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CM1107N	72

Seznam tabulek

2.1	Popis signálů vstupního konektoru	27
3.1	Vybrané senzory pro provedení srovnávacích měření	37
3.2	Tabulka rozměrů vybraných senzorů	38
3.3	Tabulka přesnosti měření vybraných senzorů; MV značí měřenou hodnotu koncentrace v ppm	39
3.4	Tabulka maximální povolené odchylky měření koncentrace oxidu uhličitého při 1000 ppm a 3000 ppm	39
3.5	Tabulka povoleného rozsahu napájecího napětí vybraných senzorů	40
3.6	Tabulka průměrného a maximálního proudového odběru senzorů při kontinuálním napájení	40
3.7	Tabulka skladovacích a provozních teplot vybraných senzorů	41
3.8	Tabulka dalších fyzikálních veličin, které senzory měří	42
3.9	Tabulka nákupní ceny senzorů	42
3.10	Tabulka doby náběhu senzorů	43
3.11	Výsledek dlouhodobého testu stability měření koncentrace oxidu uhličitého jednotlivými senzory v různých režimech	45
3.12	Parametry krátkodobé stability měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého senzorů při trvalém napájení	47
3.13	Parametry krátkodobé stability měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého senzorů při odpojovaném napájení	47
3.14	Průměrný proudový odběr při trvalém a odpojovaném napájení	48

Úvod

Oxid uhličitý (CO_2) je plynem zastoupeným v malém množství v atmosféře Země. V posledních letech se o něm často hovoří v souvislosti se zvýšenou koncentrací tzv. skleníkových plynů, které způsobují globální oteplování [1]. Pro člověka může mít zvýšená koncentrace CO_2 negativní zdravotní účinky – bolest hlavy a únavu, při vyšších koncentracích může dojít k nevolnosti případně až ke ztrátě vědomí [2]. Zvýšená koncentrace CO_2 byla také považována za problematickou v souvislosti s pandemií koronaviru COVID-19 [3, 4]. Při pobytu osob v uzavřených a špatně větraných místnostech dochází vlivem fyziologických procesů k postupnému zvyšování jeho koncentrace a následkem toho ke zvýšenému výskytu výše uvedených jevů. Tyto jevy mohou být eliminovány pomocí řízeného větrání na základě měření jeho koncentrace v daném prostoru. Technické požadavky na vybavení a funkci jsou specifikovány v normě ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022 [5].

Měření koncentrací CO_2 je významné nejen pro lidské zdraví, ale má své místo i ve sklenících a inkubátorech. Zde se uplatňuje především měření vyšších koncentrací oxidu uhličitého (až 100 000 ppm) [6]. Dále je důležité měření koncentrace CO_2 ve vodě pro akvaristy, kdy vyšší koncentrace mohou mít negativní dopad na ryby, naopak nižší koncentrace mohou způsobit úhyn akvariijní flóry [7].

Na trhu existuje velké množství komerčně dostupných senzorů pro měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. Většinou se jedná o senzory, které využívají principu nedisperzní infračervené analýzy (Non-Dispersive Infrared, NDIR), objevují se však i jiné (např. elektrochemické principy). Tyto a další metody měření jsou podrobně popsány v teoretické části této práce.

Aby bylo možné provést porovnání různých parametrů několika vybraných komerčně dostupných senzorů, je nutné vyvinout příslušné testovací zařízení. Toto zařízení musí umožňovat komunikaci s více různými senzory současně, měření a zaznamenávání hodnot koncentrace oxidu uhličitého, případně hodnot dalších dostupných fyzikálních veličin jako je teplota, barometrický tlak či relativní vlhkost. Zařízení dále musí umožňovat měření odběru elektrického proudu v různých režimech napájení. Podrobné požadavky na parametry testovacího zařízení jsou popsány v kapitole 2.

Cílem této práce je vybrat a ověřit parametry několika komerčně dostupných senzorů pro měření koncentrace oxidu uhličitého a vybrat jeden z nich, který je vhodný pro použití v zařízeních vyráběných zadavatelem této práce. Je kladen důraz na přesnost měření koncentrace oxidu uhličitého, dlouhodobou stabilitu senzoru bez nutnosti jeho kalibrace a také na proudový odběr. Výsledky provedených měření jsou popsány v kapitole 3.

V příloze jsou uvedeny grafické průběhy z některých měření a na závěr je uveden obsah elektronické přílohy.

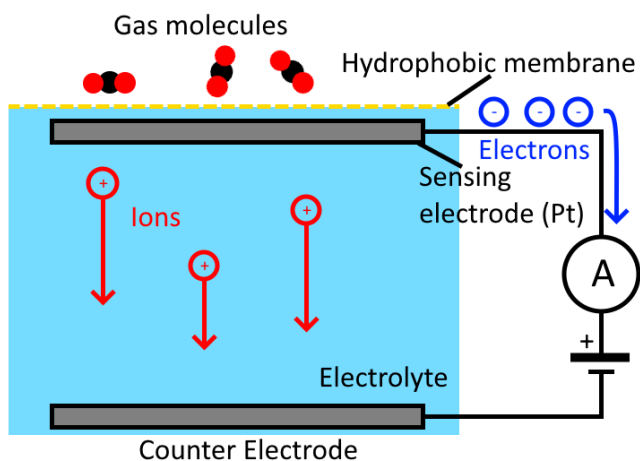
1 Principy měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší

Principy měření koncentrace oxidu uhličitého (CO_2), případně i jiných plynů, lze obecně rozdělit do dvou primárních kategorií. Existují principy interaktivní, které vyžadují přímou interakci detekční části senzoru s plynem (elektrody, polovodičové detektory apod.) pomocí oxidace, redukce či dalších fyzikálních či fyzikálně-chemických procesů [8]. Díky těmto přímým interakcím mají tyto senzory nižší životnost než senzory založené na neinteraktivních principech. Neinteraktivní principy využívají prostředníka pro detekci a měření koncentrace plynů (např. infračerveného záření), jde tedy o metodu nepřímého měření.

1.1 Interaktivní principy

1.1.1 Elektrochemické senzory

Elektrochemické senzory jsou nejrozšířenější interaktivní senzory pro měření plynu. Jejich základním principem je reakce plynu (oxidace, redukce) na měřicí elektrodě umístěné v elektrolytu. Podle toho, zda je výstupní měřenou veličinou senzoru elektrický proud či napětí, lze tyto senzory rozdělit na dvě skupiny – amperometrické a potenciometrické.

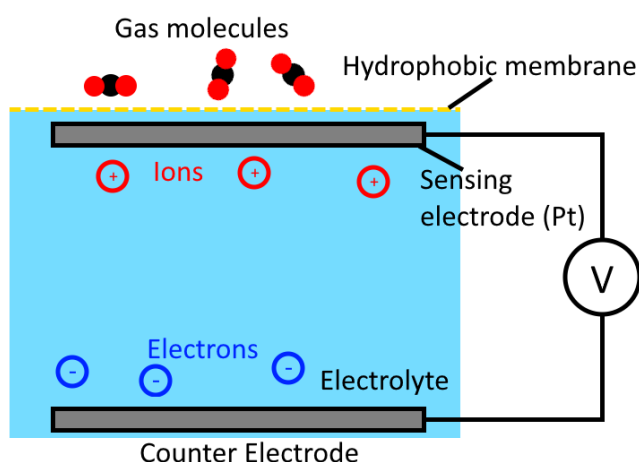


Obr. 1.1: Amperometrická elektrochemická metoda měření plynu (převzato a upraveno z [19])

U amperometrických elektrochemických senzorů (obr. 1.1) probíhá chemická reakce přímo na měřicí elektrodě a v elektrolytu. Měřicí elektroda (Sensing electrode)

je tvořena zpravidla ušlechtilým kovem (např. platinou) obaleným hydrofobní pórovitou membránou, která umožňuje měřenému plynu interagovat s elektrodou. Tato membrána slouží pro vytvoření difuzní bariéry mezi plynem a elektrolytem, neúčastní se však samotné chemické reakce. Na elektrodě pak probíhá oxidace či redukce, která vyvolává měřitelný elektrický proud mezi měřicí a referenční elektrodou (Counter electrode). Mezi obě elektrody se přivádí předpětí, aby probíhala elektrochemická reakce [8,9].

Potenciometrické elektrochemické senzory (obr. 1.2) jsou založené na měření rozdílu elektrických potenciálů (elektrického napětí) měřicí a referenční elektrody. Potenciál referenční elektrody (Counter electrode) je nezávislý, potenciál měřicí elektrody (Sensing electrode) je přímo úměrný koncentraci plynu [8,9].

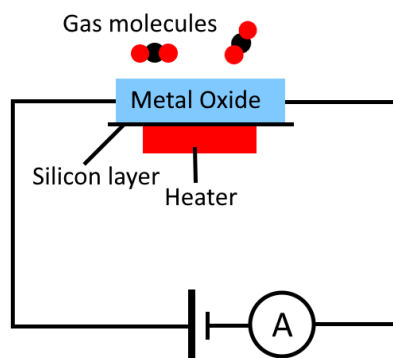


Obr. 1.2: Potenciometrická elektrochemická metoda měření koncentrace plynů

Vzhledem k tomu, že chemické reakce probíhají přímo na elektrodě, dochází postupem času k jejímu opotřebení, a tedy i ke znehodnocení. Z tohoto poznatku plyne hlavní nevýhoda elektrochemických senzorů, a sice krátká životnost (typicky 1-3 roky [9], v dnešní době i 7 let [8]). Mezi další nevýhody se řadí citlivost na další plyny, které ovlivňují měřenou hodnotu (nízká selektivita, lze eliminovat zapojením se čtyřmi elektrodami), problémy s dlouhodobou stabilitou (opotřebením elektrody dochází k průběžným změnám na výstupu) a nízká citlivost [8].

1.1.2 Polovodičové senzory

Tento princip měření je založen na změně odporu polovodiče, která je způsobena přítomností plynu (obr. 1.3). Polovodič musí být při měření zahřát na teplotu cca 500 °C, kdy dojde k prudkému zvýšení citlivosti vodivosti materiálu na plyny přítomné uvnitř oxidu. Typicky se jedná o oxidy různých kovů – oxidy vodivostního typu N (SnO_2 , ZnO_2) při těchto teplotách reagují na oxidovatelné plyny (H_2 , CH_4 ,



Obr. 1.3: Polovodičová metoda měření koncentrace plynů (převzato a upraveno z [19])

H_2S), oxidy typu P (CuO , CoO) pak naopak reagují na redukovatelné plyny (O_2 , Cl_2) [8].

Tyto senzory jsou levné, nesou s sebou však řasu nevýhod, mezi které se řadí nízká citlivost, špatná dlouhodobá stabilita, významná závislost na teplotě či nízká selektivita [8].

1.1.3 Fotoionizační senzory

Princip fotoionizace využívá ultrafialového (UV) záření, které ionizuje molekuly měřeného plynu. Vzniklé kladné a záporné ionty jsou následně sbírány na měřicích elektrodách, kde generují elektrický signál. Ten je zpracován velmi citlivou elektronikou na informaci o koncentraci měřeného plynu. Tento princip má nulovou selektivitu, nedokáže tedy určit, o jaký plyn se jedná, poněvadž jsou ionizovány molekuly všech plynů, které jsou nad požadovaným ionizačním prahem. Po projití molekul detektorem dojde k opětovnému obnovení původní molekuly plynu. Tyto senzory se typicky používají pro měření tzv. těkavých organických látek (Volatile Organic Compounds, VOC) [8].

1.1.4 Plamenové ionizační senzory

Princip měření koncentrace plynů je stejný jako v případě fotoionizace, princip samotné ionizace se však liší. Tento princip nevyužívá UV záření, ale vodíkového plamene, který je zdrojem iontů. Tato metoda způsobí destrukci většiny molekul měřeného plynu. Senzory využívající tohoto principu jsou vhodné pro detekci organických látek s vyšším počtem atomů uhlíku (bílkoviny, nukleotidy) [8].

1.1.5 Kolorimetrické senzory

Kolorimetrické senzory využívají chemických sloučenin, které jsou schopné změnit barvu v závislosti na koncentraci plynu [8]. Využívají se především v akvaristice [7].

1.2 Neinteraktivní principy

1.2.1 Laditelná laserová absorpční spektroskopie

Laditelná laserová absorpční spektroskopie (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) využívá laditelné laserové diody jako zdroje světla, vysílací optiku, komůrku s měřeným plynem, přijímací optiku a detektor [8]. Dioda se ladí přes vybraný rozsah vlnových délek, který odpovídá absorpčním čarám měřeného plynu v blízkém infračerveném spektru. Ladění probíhá změnou teploty laserové diody, následkem čehož dochází ke změně šířky zakázaného pásu polovodiče, a tedy i ke změně vyzařované vlnové délky [10]. Změna na detektoru (fotodiodě) je však při změně koncentrace špatně měřitelná, je tedy nutné, aby vybraný plyn měl v měřené oblasti výraznou a úzkou absorpční čáru, aby se změna koncentrace na výstupu projevila. Pomocí tohoto principu lze tedy měřit především plyny jako kyslík či oxid uhličitý, naopak plyny se slabou spektrální čarou (např. methan) takto měřit nelze. Tato metoda umožňuje měřit i další vlastnosti plynu, např. teplotu a tlak.

Hlavní nevýhodou této metody je měření malých změn na výrazném pozadí – veškerý šum způsobený zdrojem světla může výrazně ovlivnit měřenou hodnotu. Dalším faktorem ovlivňujícím měření je pracovní oblast senzoru založeného na TDLAS principu díky spektrálním čarám vodní páry, které v oblasti blízkého infračerveného záření vytváří nezanedbatelnou odchylku měřené koncentrace. Mezi další nevýhody lze řadit např. cenu a dostupnost laditelných laserových diod [8].

1.2.2 Nedisperzní infračervená analýza

Princip nedisperzní infračervené analýzy (Non-Dispersive InfraRed, NDIR) je v dnešní době často využívaným principem pro nízkoodběrové, nízkonákladové a přesné měření koncentrací některých plynů [8,12]. Název nedisperzní vychází z absence disperzních elementů (např. hranolů), které jsou často součástí jiných principů. Existují dvě základní skupiny NDIR senzorů: Fotoakustické NDIR senzory (Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS) a Optické NDIR senzory (často označované pouze NDIR). Oba přístupy jsou založené na stejném fyzikálním principu, a to na schopnosti molekul plynu absorbovat záření ve středním infračerveném spektru [8, 11, 13]. Tento princip

popisuje Lambertův-Beerův zákon, který popisuje útlum intenzity paprsku elektromagnetického záření v prostředí, kterým prochází [8, 11]:

$$I = I_0 \cdot e^{-l \cdot c \cdot \varepsilon} \quad (1.1)$$

kde I ... Intenzita záření po průchodu prostředím [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

I_0 ... Intenzita záření před průchodem prostředím [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

l ... optická délka paprsku procházejícího prostředím [m],

ε ... absorpční koeficient prostředí [$\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$],

c ... molární koncentrace částic absorbujících elektromagnetické záření v prostředí [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$].

PAS princip je založený na schopnosti molekuly plynu pohltit IR záření, čímž dojde k jejímu zahřátí. Ideální plyn lze popsat stavovou rovnicí:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad (1.2)$$

kde p ... tlak plynu [Pa],

V ... objem plynu [m^3],

N ... počet molekul plynu v daném objemu [-],

k ... Boltzmannova konstanta, $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$,

T ... teplota plynu [K].

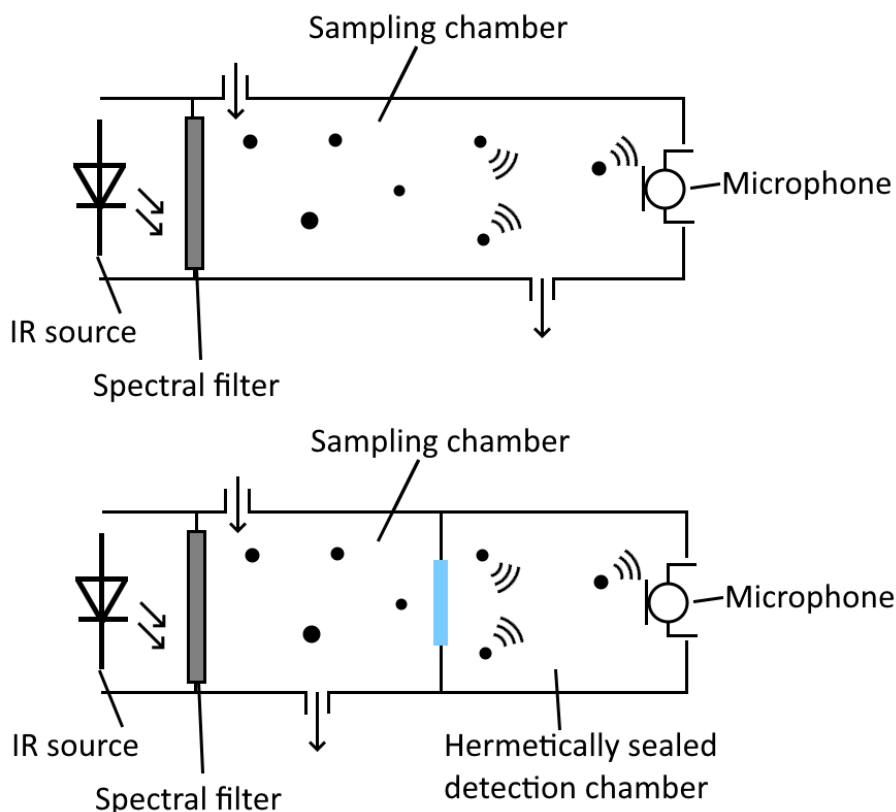
Dle této rovnice dojde při zvýšení teploty plynu ke zvýšení tlaku uvnitř komory. Pokud je zdroj světla modulovaný, dochází střídavě ke zvyšování a snižování tlaku, vznikají tedy akustické vlny, které lze detekovat mikrofonem (obr. 1.4).

Fotoakustický senzor lze realizovat s jednou komorou nebo se dvěma komorami. V případě jednkomorového uspořádání je v komoře (sampling chamber) analyzovaný plyn, který je ozařován pulsujícím úzkopásmovým IR zářením (toto záření lze získat umístěním spektrálního filtru před širokopásmový zdroj IR záření). Generuje tak akustické vlny, které jsou detekovány jedním či více mikrofony na bázi mikroelektromechanických systémů (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) [8].

Dvukomorové uspořádání využívá průsvitného okna pro oddělení komory s analyzovaným plynem (sampling chamber) od hermeticky uzavřené komory se 100% koncentrací cílového plynu (detection chamber). První komora pak slouží pro útlum IR záření, které následně prochází přes průsvitnou membránu do druhé komory. Zde jsou opět generovány akustické vlny a detekovány MEMS mikrofony [12].

Z principu PAS plyne, že tyto senzory jsou velmi náchylné na okolní vibrace, které mohou způsobit výrazné odchylky měřené hodnoty [8]. Dále je měřená hodnota koncentrace závislá na okolních atmosférických podmínkách – na teplotě, atmosférickém tlaku a relativní vlhkosti (důsledek stavové rovnice ideálního plynu (1.2)).

Jak již bylo zmíněno, optické NDIR senzory fungují na stejném fyzikálním principu jako PAS senzory. Jejich odlišnost je však ve způsobu detekce. Zatímco u PAS

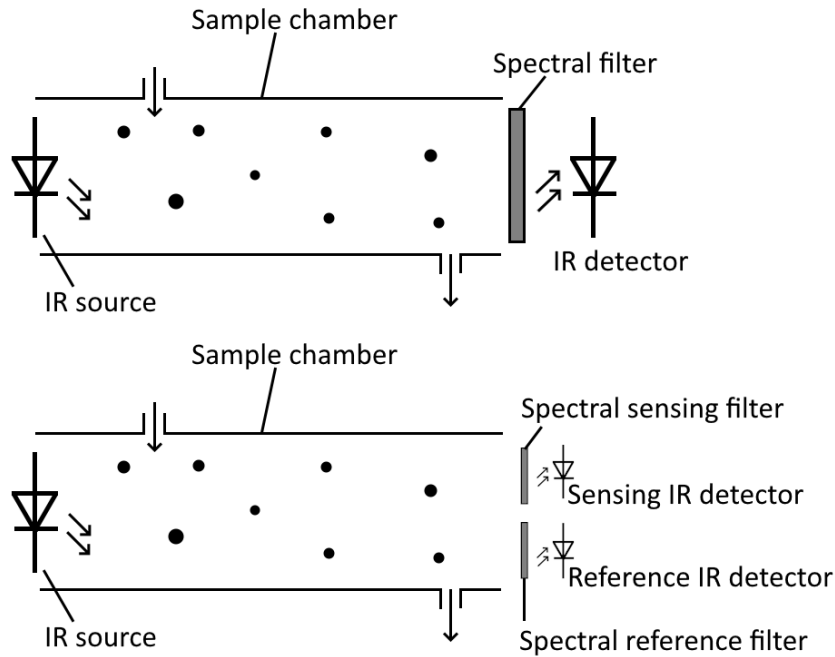


Obr. 1.4: Schéma uspořádání jednokomorového (nahore) a dvoukomorového (dole) fotoakustického senzoru (převzato a upraveno z [12])

senzorů byla změna intenzity IR záření detekována nepřímo pomocí zvukových vln vytvořených střídavým oteplováním a ochlazováním molekul plynu absorbujícího záření na dané vlnové délce, optické NDIR senzory detekují přímo IR záření dopadající na IR detektor.

Optické NDIR senzory se skládají ze zdroje IR záření, z měřicí komůrky s měřeným plynem, optického nedisperzního filtru a IR detektoru (obr. 1.5 nahore). Ze zdroje světla vychází infračervené záření, které je na konkrétních vlnových délkách pohlcováno měřeným plynem. Následně prochází oslabené záření skrz optický filtr, který filtruje spektrum na frekvenci odpovídající vlnové délce záření pohlcovaného měřeným plynem (jedná se o velmi úzkopásmový filtr) a dopadá na IR detektor, z něhož pak lze odečíst měřenou koncentraci plynu.

Uvedený princip se nazývá Single-Channel NDIR (jednokanálový senzor). Tento princip však má několik nevýhod. Měřená hodnota je závislá na teplotě, na intenzitě záření zdroje světla a na časově a teplotně závislých prvcích použitých v návrhu senzoru [8]. Proto byl vyvinut dvoukanálový senzor (NDIR Dual-Beam/Dual-Channel). Tento využívá dvou kanálů – měřicího a referenčního. Měřicí kanál odpovídá popisu jednokanálového NDIR senzoru. Druhý kanál, referenční, má stejnou optickou délku



Obr. 1.5: Schéma uspořádání jednokanálového (nahore) a dvoukanálového (dole) optického NDIR senzoru (převzato a upraveno z [8])

jako měřicí, liší se pouze centrální frekvencí filtru před detektorem (obr. 1.5 dole). Tato centrální frekvence se typicky udává přepočítaná na vlnovou délku světla podle vztahu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

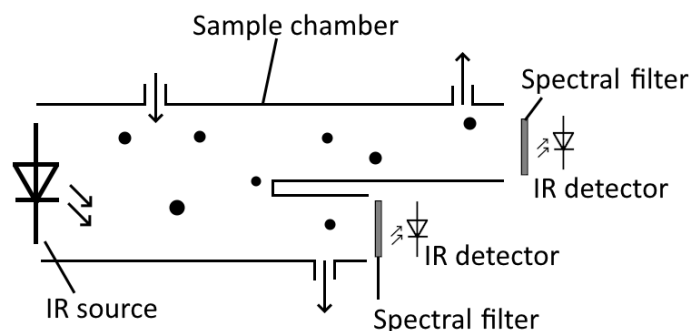
kde λ ... centrální vlnová délka filtru [m],

c ... rychlost světla v prostředí, v němž se filtr nachází (typicky vzduch) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

f ... centrální frekvence filtru [Hz].

Pro měření koncentrace oxidu uhličitého, jímž se tato práce zabývá, se využívá v měřicím kanálu filtru s centrální frekvencí odpovídající vlnové délce $4,26 \mu\text{m}$ a v referenčním kanálu filtru s centrální frekvencí odpovídající $3,9 \mu\text{m}$. Výstupní signál senzoru je pak úměrný poměru těchto dvou kanálů. Poněvadž se oba kanály nachází ve stejném prostředí a využívají stejného zdroje světla, dojde k eliminaci závislosti měřené koncentrace na zdroji světla. Zajištěním stejné teploty obou detektorů lze eliminovat jejich teplotní závislost [8, 11].

Významným vlivem, který tato konfigurace neřeší, je posun spektra zdroje záření v čase. Poněvadž dvoukanálová konfigurace využívá dvou různých frekvencí, na nichž je měřena intenzita dopadajícího IR záření, a výsledná měřená hodnota je závislá na poměru intenzity dopadajícího záření z obou kanálů, dojde při posunu spektra zdroje ke změně tohoto poměru, a tedy i měřené hodnoty koncentrace. Tento problém řeší dvoukanálový NDIR senzor s různými délkami kanálu (obr. 1.6). Díky závislosti IR



Obr. 1.6: Schéma uspořádání dvoukanalového NDIR principu s různými délkami kanálů (převzato a upraveno z [8])

záření dopadajícího na detektor na optické délce kanálu lze zkonstruovat senzor, který má dva kanály detekující záření na stejné frekvenci. Oba kanály pak mají před detektorem stejný optický filtr (pro CO_2 s centrální frekvencí odpovídající vlnové délce $4,26 \mu\text{m}$) a stejný IR detektor, liší se jen v délce měřicího kanálu [8]. Použitím tohoto zapojení se eliminuje závislost měřené hodnoty na časovém posunu spektra. Oba kanály využívají stejný zdroj světla, čímž se eliminuje závislost měřené koncentrace na teplotě zdroje IR záření. Toto uspořádání je závislé především na rozdílu teploty obou IR detektorů. Zajištěním stejné teploty obou detektorů lze eliminovat jejich teplotní závislost [8, 11].

Hlavní nevýhodou senzorů založených na NDIR principu je závislost naměřené hodnoty koncentrace plynu na teplotě okolí a atmosférickém tlaku prostředí. V případě měření nízkých koncentrací se může projevit i závislost měřené hodnoty na relativní vlhkosti [15].

Zdroj infračerveného záření

Jako zdroj infračerveného záření se v NDIR senzorech využívá dvou principů. Zdroje založené na termálním principu (starší) využívají zahřátí zdroje na vysokou teplotu. Na tomto principu fungují žárovky (teplota až $3000 \text{ }^\circ\text{C}$, širokopásmové vyzařovací spektrum) a topné membrány založené na principu MEMS. Tyto membrány dosahují díky své velikosti menších teplot než žárovky, díky čemuž jsou rychlejší a energeticky úspornější [16]. Vyzařovací spektrum topných MEMS membrán je značně užší než v případě žárovek.

Druhým v dnešní době využívaným typem zdroje záření jsou optické prvky, především infračervené diody (InfraRed Emitting Diode, IRED). Tyto diody mají vůči výše uvedeným zdrojům hned několik výhod. Není třeba je zahřívat, tedy odebraný elektrický proud pro zapnutí diody je násobně menší než v případě žárovek či

MEMS topných membrán. Zároveň rychleji reagují a vyzařovací spektrum je úzkopásmové [16].

V moderních senzorech se stále více začínají uplatňovat IRED diody se zabudovaným IR detektorem a filtrem na centrální frekvenci typické pro měřený plyn. Tento detektor pak realizuje jeden z měřicích kanálů dvoukanalového NDIR principu s nulovou optickou délkou kanálu [17, 18]. Pro vytvoření druhého kanálu pak je v senzorech využít další IR detektor s filtrem na stejné centrální frekvenci [17]. V tomto zapojení je pak eliminována závislost měřené hodnoty na posunu spektra IRED diody v čase a s teplotou.

Infračervený detektor

Podobně jako v případě zdroje IR záření i u detektorů existují termální a optické principy. Termální principy jsou založené na detekci teplotního rozdílu. Jde o např. termočláňkové baterie (řada termočláňků zapojených do série), které využívají Seebeckova jevu [14]. Dále je časté využití pyroelektrických snímačů, které jsou založené na generování elektrického náboje v závislosti na teplotě [8].

Do druhé skupiny optických detektorů jsou řazeny polovodičové PIN fotodiody. Tyto diody využívají vnitřního fotoelektrického jevu, díky němuž při ozáření intrinzičké (I) vrstvy diody dochází k excitaci elektronů, které pak tvoří elektrický proud procházející diodou v závěrném směru [16].

Často je (pro účely měření koncentrace plynu) součástí těchto detektorů i optický filtr na příslušné centrální frekvenci [17].

2 Návrh a realizace měřicí desky

2.1 Specifikace zařízení

Tato práce se zabývá návrhem vhodného testovacího zařízení, na kterém by bylo možné provést měření a srovnání různých komerčně dostupných CO₂ senzorů. Aby mohlo být měřeno několik senzorů současně ve stejném prostředí, je nutné navrhnout vhodný hardware, který by toto umožňoval. Zadavatel (firma Comet System, s.r.o.) vytvořil seznam požadavků, které výsledné testovací zařízení musí splňovat:

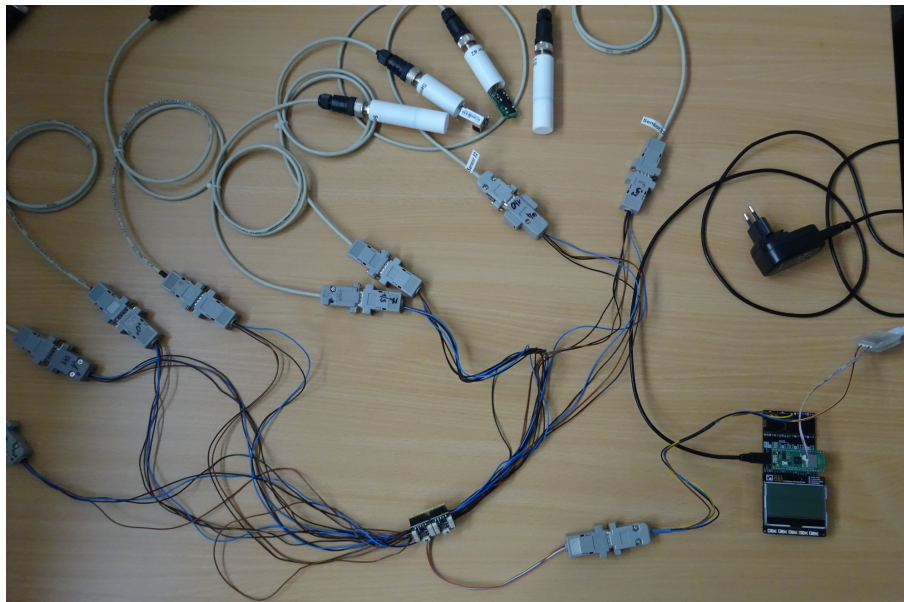
- Univerzálnost řešení: Zařízení je primárně určeno pro měření na senzorech koncentrace CO₂, ale do budoucna musí umožňovat využití i pro jiné typy senzorů s digitálními výstupy (např. senzory teploty, relativní vlhkosti, atmosférického tlaku).
- Vstupy: zařízení bude vybaveno 8 univerzálními vstupy k připojení senzorů s I²C sběrnici. Každý vstup bude opatřen vhodným konektorem, na kterém bude k dispozici samostatná I²C sběrnice a zdroj napájení senzoru. Zdroj musí umožňovat připojit senzor s napájením 3,3 V nebo 5 V se špičkovým proudovým odběrem až cca 500 mA. Dále musí umožňovat provoz jak v režimu kontinuálního napájení, tak v režimu odpojovaného napájení. Na případně nevyužité piny vstupního konektoru je vhodné přivést další signály pro budoucí použití (např. UART, zdroj 12 V apod.). Pomocí externího zařízení musí být možné proměřit časový průběh proudového odběru připojeného senzoru a stanovit jeho maximální a průměrnou spotřebu v různých režimech činnosti. Kromě naměřených hodnot z testovaných senzorů zařízení musí zaznamenávat naměřené hodnoty okolní teploty, relativní vlhkosti a barometrického tlaku.
- Připojení měřených senzorů: Sensory musí být připojeny tak, aby mohly být vloženy do uzavřené komůrky, kam bude aplikován referenční plyn o dané koncentraci. Zvážit použití mechaniky sondy Comet CO2G-10 [38] s kabelem délky 1 m, na jejímž konci bude připájený měřený senzor. Výstupní konektor kabelu je modifikován a využívá konektor Cannon-9.
- Výstupy: Výstupem je soubor se záznamem naměřených hodnot z jednotlivých senzorů opatřený časovými značkami. Zařízení proto musí obsahovat energeticky nezávislé hodiny reálného času (RTC). Pro diagnostické účely bude zařízení vybaveno jednoduchým displejem s klávesnicí.
- Konfigurace: Zařízení musí být konfigurovatelné (parametry vstupů, nastavení senzoru, záznam dat apod.). Konfigurace testovacího zařízení musí být uložena v energeticky nezávislé paměti.
- Rychlost vývoje a cena: Protože výběr vhodného senzoru musí být založen na vyhodnocení dat z dlouhodobého testování, je požadováno, aby sběr dat

byl zahájen co nejdříve. Je kladen důraz na to, aby vývoj testovacího zařízení proběhl v co nejkratší době. Z tohoto důvodu zvážit použití některé levné a komerčně dostupné platformy (Arduino, Raspberry Pi, ESP apod.) s volně dostupnými knihovnami. Pro zpracování naměřených hodnot zvážit využití existujícího systému Comet Database [39] nebo Comet Cloud (dostupné z: <https://cometsystem.cloud/auth/login> [40]), kam lze data posílat pomocí SOAP protokolu přes ethernetové rozhraní.

Tento seznam požadavků vedl k návrhu řešení, jež je popsáno v této kapitole.

2.2 Výběr platformy

V prvním kroku návrhu testovacího zařízení bylo nutné vybrat vhodný mikrokontrolér. S ohledem na požadovanou rychlost vývoje a cenu se nabízelo využití některé z komerčně dostupných stavebnicových platform, ke kterým jsou k dispozici volně šiřitelné knihovny a komunitní podpora. Výběr byl posléze zúžen na platformy Arduino, Raspberry Pi a ESP. Po důkladném zvážení všech kladů a záporů byl vybrán mikrokontrolér Raspberry Pi Pico [21]. Jedná se o mikrokontrolér s čipem RP2040, který obsahuje dvoujádrový procesor ARM Cortex-M0+, 264 kB RAM paměti a 2 MB flash paměti. Dále je k dispozici 26 GPIO (General-Purpose Input Output) pinů, 2× UART a 2× I²C sběrnice. Vybrána byla verze WH, která má k dispozici Wi-Fi modul, jež umožňuje připojení zařízení do počítačové sítě a systémů Comet Database a Comet Cloud pro sběr dat.



Obr. 2.1: Testovací zapojení Raspberry Pi Pico s multiplexory

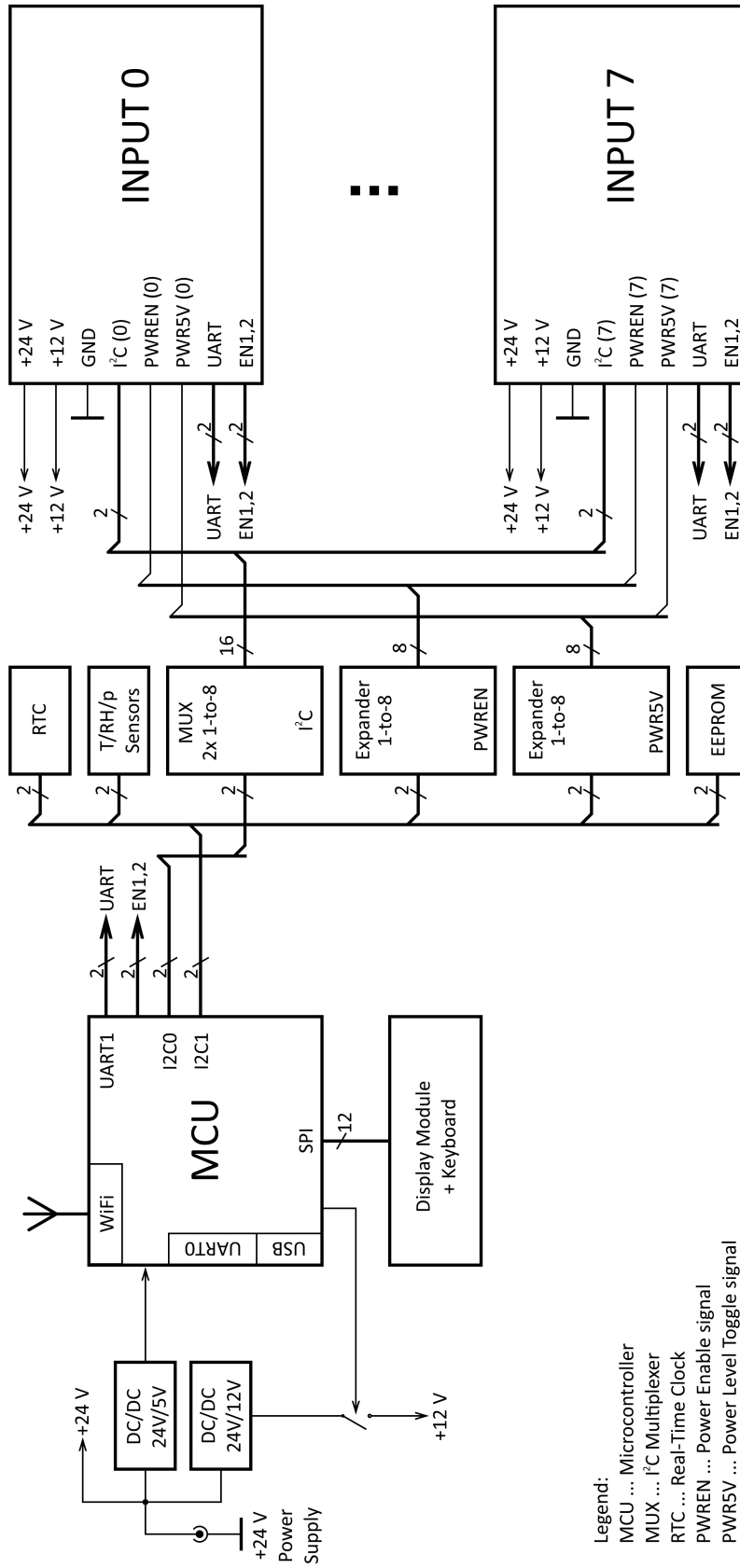
Dále byl vybrán modul reálného času (Real-Time Clock, RTC) DS3231 [23] pro Raspberry Pi Pico. Jako grafický výstup byl použit monochromatický displej GFX Pack (Pimoroni, [34]). Pro přepínání připojených senzorů byly využity dva multiplexory I²C 1 na 4 PCA9546A [24] jako dočasné řešení pro ověření navrhovaného řešení. Fotografie testovaného zapojení jednotlivých komponent je na obr. 2.1.

Navržená koncepce byla důkladně otestována s osmi připojenými senzory a řešení mikrokontrolérem Raspberry Pi Pico WH bylo vyhodnoceno jako vyhovující.

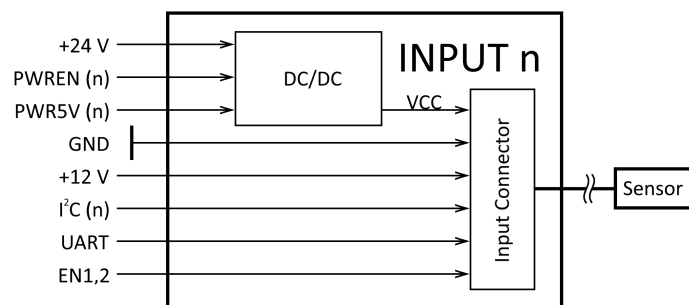
2.3 Schéma zařízení

Ve druhém kroku bylo přistoupeno k návrhu schématu testovacího zařízení založeného na vybrané platformě Raspberry Pi Pico WH. Blokové schéma je uvedeno na obr. 2.2 a na obr. 2.3 je pak detailněji zakreslený blok vstupních obvodů pro připojení měřeného senzoru.

Výsledné testovací zařízení obsahuje deset DC/DC měničů, mikrokontrolér (ve schématu označený jako MCU), hodiny reálného času (RTC), LCD displej s tlačítky, I²C multiplexor 1 na 8 (ve schématu označený jako MUX), dva I²C expandéry pro ovládání napájení senzorů (ve schématu PWREN, PWR5V), paměť EEPROM a přídatné senzory pro měření teploty, tlaku a relativní vlhkosti (ve schématu T/RH/p Sensors). Celé schéma je podrobně rozebráno v následujících podkapitolách.



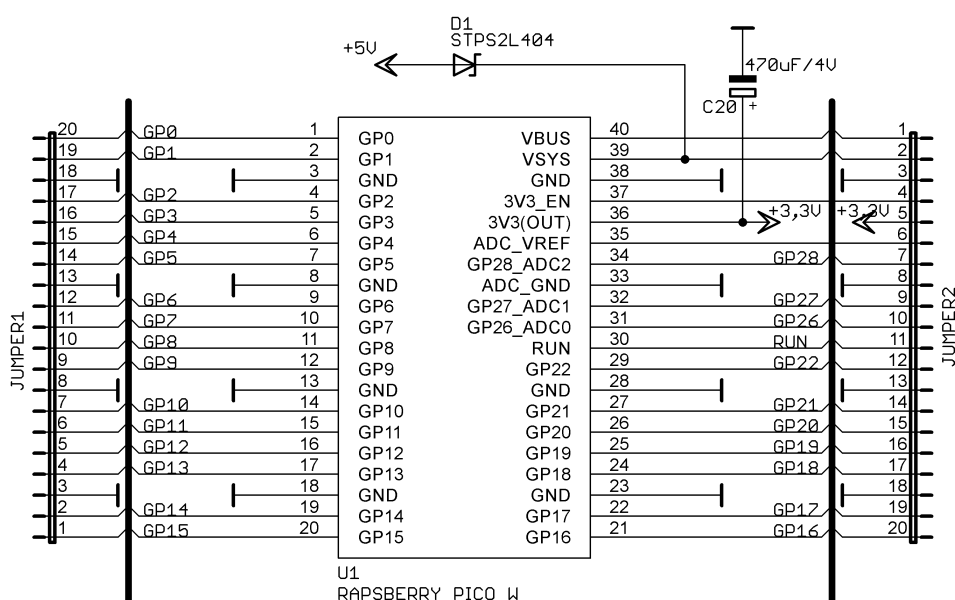
Obr. 2.2: Blokové schéma testovacího zařízení pro měření CO₂ senzorů



Obr. 2.3: Detailní blokové schéma vstupního obvodu INPUT (n) testovacího zařízení pro měření CO₂ senzorů

2.3.1 Mikrokontrolér

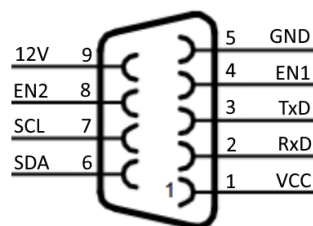
Na obr. 2.4 je uvedeno zapojení mikrokontroléru (MicroController Unit, MCU) Raspberry Pi Pico [21] pro obsluhu měření a odesílání dat. Mikrokontrolér je napájený ze spínaného zdroje 5 V přes diodu D1 s nízkým prahovým napětím STPS2L404 [20]. Tato dioda slouží k oddělení zdrojů v případě přímého připojení mikrokontroléru přes rozhraní USB. Deska mikrokontroléru obsahuje zdroj 3,3 V, jehož výstup je použitý pro napájení paměti EEPROM, I²C expandérů, senzorů pro měření teploty, relativní vlhkosti a barometrického tlaku, I²C multiplexoru a proudových posilovačů pro EN piny. Všechny piny mikrokontroléru jsou pro potřeby ladění firmware vyvedené na samostatné dutinky.



Obr. 2.4: Schéma připojení mikrokontroléru k desce

2.3.2 Vstupní konektor

Pro připojení měřených CO₂ senzorů byl vybrán běžně dostupný devítipinový konektor Cannon-9 (obr. 2.5). Jednotlivé signály jsou rozmístěny dle tab. 2.1.



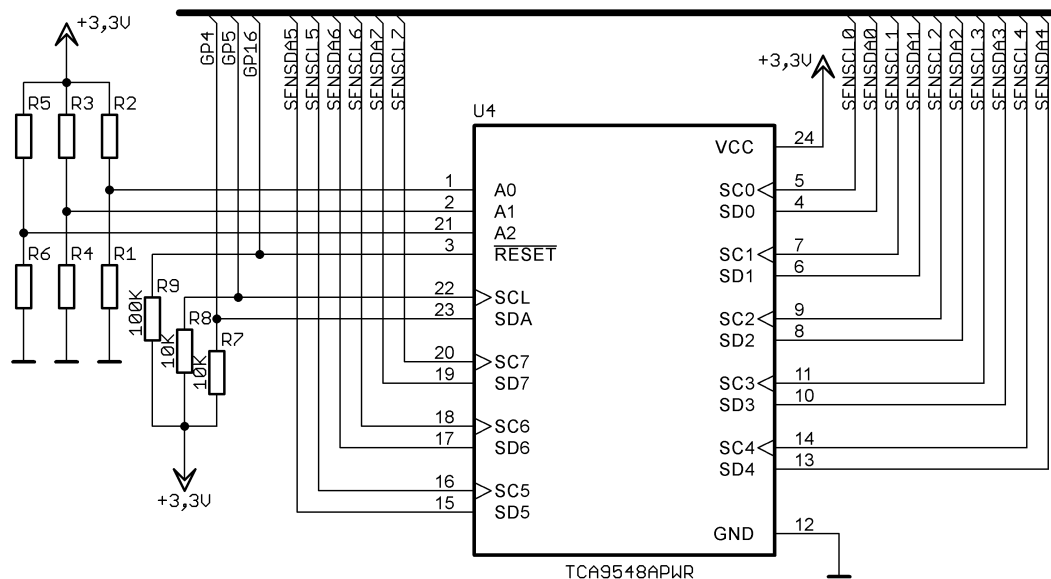
Obr. 2.5: Schéma připojení vstupního konektoru pro senzor

Tab. 2.1: Popis signálů vstupního konektoru

Číslo pinu	Název pinu	Popis
1	VCC	Napájecí napětí pro senzor
2	RxD	UART signál RxD
3	TxD	UART signál TxD
4	EN1	Signál pro budoucí použití
5	GND	Referenční nulový potenciál
6	SDA	I ² C datový signál
7	SCL	I ² C hodinový signál
8	EN2	Signál pro budoucí použití
9	12V	Napětí 12 V

2.3.3 I²C sběrnice

Z mikrokontroléru vedou celkem dvě I²C sběrnice. První sběrnice (I2C0, piny GP4, GP5) slouží pro komunikaci s měřenými senzory. Je doplněna signálem RST (pin GP16) a přivedena do I²C multiplexoru [25] (obr. 2.6), odkud je multiplexována na jednotlivé senzory. Tímto způsobem je zajištěno, že I²C sběrnice na vstupních konektorech jsou na sobě navzájem nezávislé. Použitý multiplexor a způsob zapojení pull-up rezistorů na obou stranách obvodu umožňuje pracovat na straně senzorů jak s napětím sběrnice +5 V, tak 3,3 V. Signál RST slouží pro resetování multiplexoru v případě chybového stavu I²C sběrnice. Pro nastavení I²C adresy multiplexoru slouží dvě trojice rezistorů umístěných vlevo. Ve výsledném provedení jsou osazené nulové propojky na pozicích rezistorů R1, R4 a R6, rezistory R2, R3 a R5 osazené nejsou. V případě, že by adresa multiplexoru kolidovala s adresou některého z testovaných senzorů, je možné ji úpravou osazení propojek změnit.



Obr. 2.6: Schéma připojení I²C multiplexoru TCA9548A na I²C sběrnici I2C0. Ve výsledném návrhu jsou osazeny rezistory R1, R4 a R6 zkratovací propojkami, rezistory R2, R3 a R5 jsou neosazené.

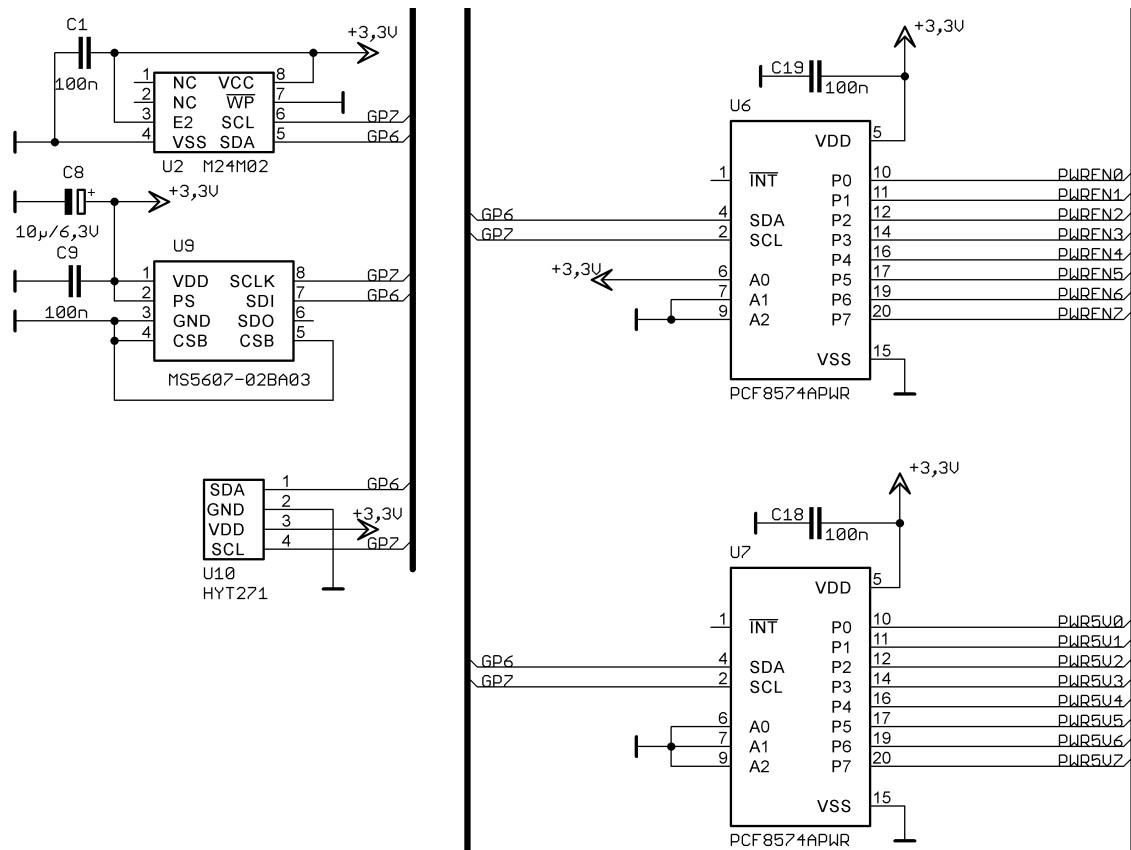
Druhá I²C sběrnice (I2C1, piny GP6, GP7) slouží pro komunikaci s ostatními perifériemi, mezi které patří senzor tlaku MS5607 [28], senzor teploty a vlhkosti HYT271 [29], paměť EEPROM M24M02 o velikosti 256 kB [26] a hodiny reálného času DS3231 [23] (obr. 2.7 vlevo).

Na tuto sběrnici jsou dále připojeny dva I²C expandéry PCF8574A [27], jejichž zapojení je znázorněno na obr. 2.7 vpravo. První expandér slouží k zapnutí/vypnutí napájení vybraného vstupu (ve schématu 2.2 označený jako PWREN_n) a druhý expandér slouží k nastavení úrovně napájecího napětí pro vybraný vstup, které může být při zapnutém zdroji buď 3,3 V, nebo 5 V (ve schématu 2.2 PWR5V).

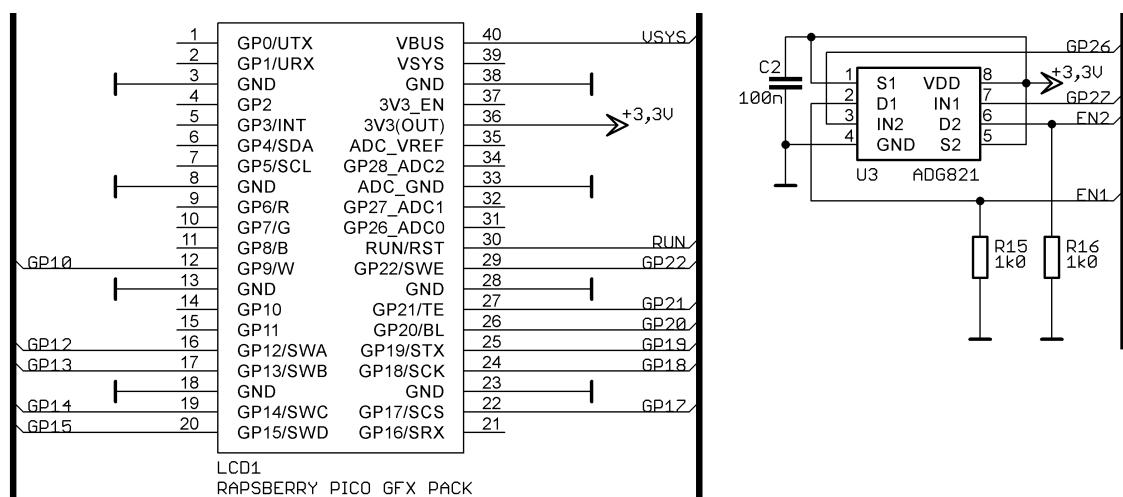
Na této sběrnici nejsou ve schématu znázorněny pull-up rezistory, které byly přidány později.

2.3.4 Displej

Jako displej (GFX Pack, [34]) byl využit monochromatický LCD displej s rozlišením 128x64 pixelů s pěti tlačítky označenými A, B, C, D, E. Displej je připojený k mikrokontroléru pomocí sběrnice SPI (obr. 2.8 vlevo). Na displej jsou dále přivedené signály pro nastavení intenzity bílého podsvícení, ovládání tlačítek a další pomocné signály (LCD reset, Data/Command, Chip Select).



Obr. 2.7: Schéma připojení EEPROM paměti M24M02, senzoru pro měření okolní teploty a relativní vlhkosti HYT271 a senzoru pro měření aktuálního barometrického tlaku MS5607 (vlevo). Schéma připojení I²C expandérů pro ovládání napájení senzorů (vpravo).



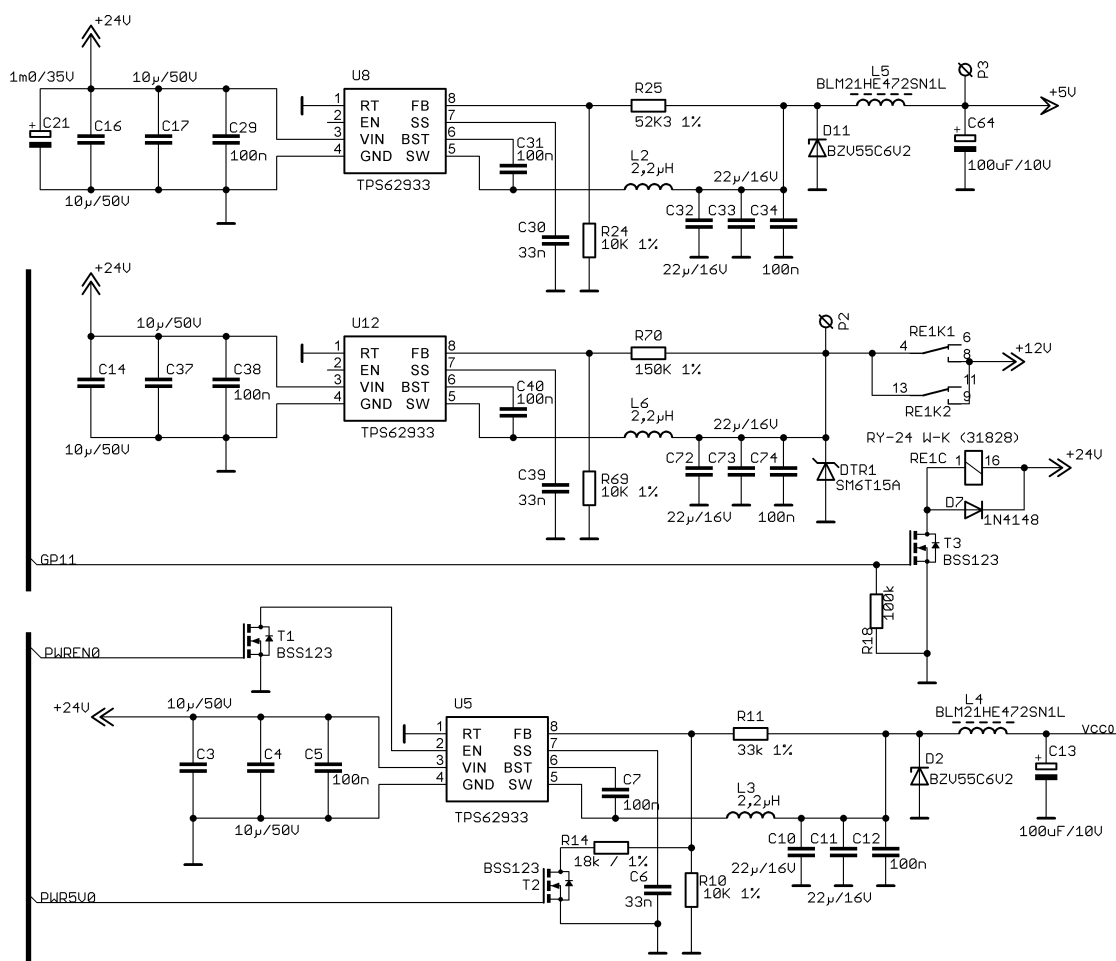
Obr. 2.8: Schéma připojení displeje pomocí SPI sběrnice k mikrokontroléru (vlevo). Schéma připojení proudového posilovače pro doplňkové EN signály (vpravo).

2.3.5 Další výstupy

Z mikrokontroléru jsou vyvedeny dva signály označené jako EN1 a EN2. Tyto signály jsou přivedeny přes proudové posilovače ADG821 [30] (obr. 2.8 vpravo) na vstupní konektory a jsou určeny pro budoucí použití. Další dvojice signálů určená pro budoucí použití umožňuje komunikaci se senzory přes UART a konečně lze na vstupní konektor přivést pomocné napětí +12 V.

2.3.6 Napájecí subsystém

Testovací zařízení je napájeno stejnosměrným napětím o nominální hodnotě +24 V pomocí standardního síťového adaptéru 24V/1A. Na desce je umístěno celkem deset spínaných DC/DC měničů. Všechny používají vstupní napětí 24 V. První měnič



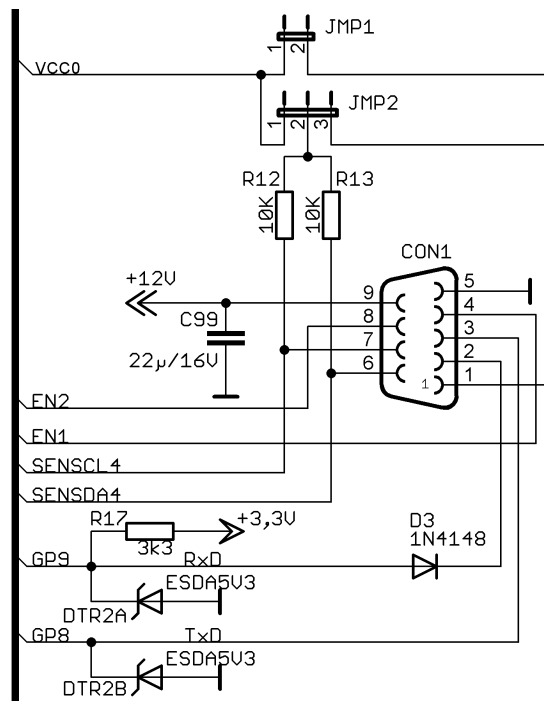
Obr. 2.9: Schéma DC/DC měniče 24V/5V (nahore). Schéma DC/DC měniče 24V/12V s ovládáním výstupu pomocí relé z mikrokontroléru (uprostřed). Schéma DC/DC měniče pro napájení senzoru (pro každý vstup samostatný měnič) s ovládáním výstupního napětí 3,3V/5V a možností zapnutí/vypnutí měniče (dole)

slouží k vytvoření napájecího napětí +5 V pro mikrokontrolér (obr. 2.9 nahoře). Druhý měnič (obr. 2.9 uprostřed) vytváří pomocné napětí +12 V (viz výše). Zbývajících osm měničů (obr. 2.9 dole) slouží k napájení jednotlivých senzorů připojených ke vstupním konektorům a umožňují nezávisle na sobě nastavit napájení pro každý senzor v úrovních +5 V / +3,3 V / Vypnuto. Řízení se provádí pomocí signálů PWREnN a PWR5Vn. Tato koncepce byla zvolena proto, aby každý vstup mohl být samostatně řízený a aby případný zkrat na jednom vstupu neovlivnil funkčnost ostatních senzorů. Kromě toho je na desce k dispozici ještě napětí +3,3 V vytvořené spínaným zdrojem, který je součástí mikrokontroléru. Všech deset měničů je realizováno pomocí obvodu TPS62933 [31] (snižující měnič), který pracuje v režimu Fixed Frequency Peak Current Mode s pevnou frekvencí 1,2 MHz. Maximální výstupní proud je 3 A. Použitá zapojení jsou navržena podle referenčního zapojení výrobce uvedeného v datasheetu.

Na výstupech měničů jsou osazeny ochranné Zenerovy diody [33] příp. tranzil SM6T15A [32] jako ochrany proti zničení desky přepětím při poruše zdroje.

Rezistory odporového děliče pro FB pin obvodu TPS62933 byly vypočteny podle datasheetu výrobce pro napětí na výstupu děliče 0,8 V. Většina měničů má na výstupu ještě zařazen EMI LC filtr pro potlačení elektromagnetického rušení.

2.3.7 Signály na vstupním konektoru

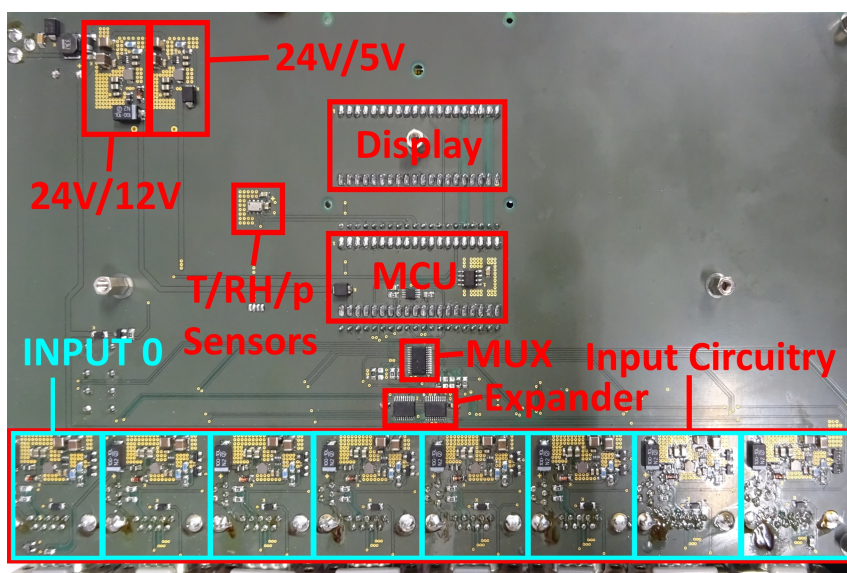


Obr. 2.10: Schéma vstupního konektoru

Na vstupní konektor (obr. 2.10) je přivedeno napájení senzoru (VCCn – pro každý senzor samostatně), I²C sběrnice samostatná pro každý senzor (SDAn, SCLn) a referenční nulový potenciál (GND). Další signály byly přidány pro budoucí použití: komunikace pomocí UART z mikrokontroléru (RxD, TxD – toto rozhraní je společné pro všechny senzory), dva pomocné signály (EN1, EN2 – společné pro všechny senzory) a napětí +12 V spínané kontaktem relé (12V – společné pro všechny senzory). Na signálech UART (RxD, TxD) jsou umístěny tranzily ESDA5V3 sloužící jako ochrana proti elektrostatickým výbojům. Na signálu RxD je dioda 1N4148 pro oddělení vstupů (jde o diodový součet). Jelikož signály UART nejsou multiplexovány, v některých případech může docházet k znehodnocení přijaté odpovědi. Dále jsou zde navrženy dva pull-up rezistory na I²C sběrnici o hodnotě 10 k Ω a dvě zkratovací propojky označené JMP1 a JMP2. JMP1 slouží pro vložení zařízení k měření proudového odběru senzoru. Změnou nastavení JMP2 lze zahrnout nebo vyloučit odběr I²C sběrnice během komunikace se senzorem při měření jeho odběru.

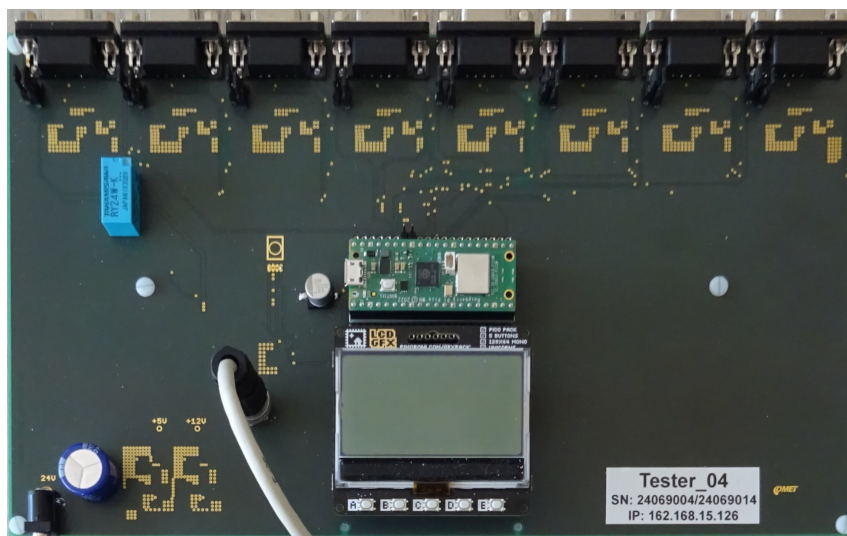
2.4 Návrh desky plošných spojů

Návrh desky plošných spojů (DPS) pro testovací zařízení byl proveden v programu Eagle. Pro realizaci zařízení bylo použito dvouvrstvé DPS. Výsledná DPS má rozměry 275,5×159,3 mm. Na obr. 2.11 lze vidět rozmístění jednotlivých bloků na DPS. Osazovací výkresy jsou k dispozici v elektronické příloze (složka CO2 Tester HW).



Obr. 2.11: Rozmístění obvodových bloků na desce plošných spojů

Na obr. 2.12 je fotografie finálního testovacího zařízení.



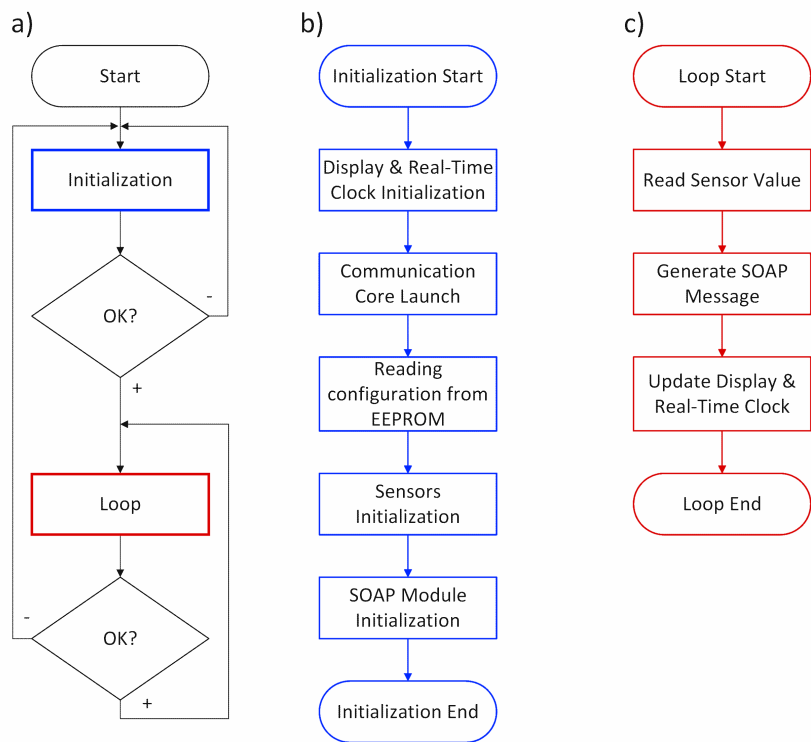
Obr. 2.12: Testovací zařízení na desce plošných spojů.

2.5 Firmware

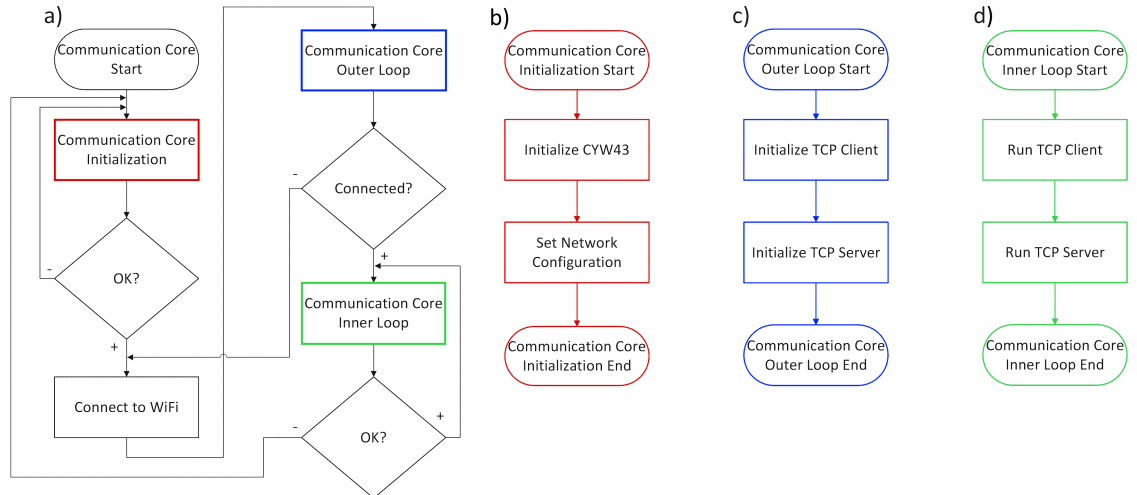
Programování firmware mikrokontroléru probíhalo v jazyce C. Využity byly vývojové nástroje a knihovny Pico SDK [22].

Firmware vytvořený pro mikrokontrolér testovacího zařízení umožňuje měření senzorů připojených ke všem vstupům současně a odesílání těchto měřených hodnot pomocí Wi-Fi rozhraní. Dále je k dispozici plně funkční displej s možností zobrazení měřených hodnot ze senzorů, měřicí periody, periody odesílání dat a dalších informací o běhu zařízení. Firmware je k dispozici v elektronické příloze této práce (složka CO2 Tester FW).

Firmware využívá obou jader, která jsou k dispozici na použitém mikrokontroléru. Základní struktura kódu běžícího na měřicím jádře je vytvořena podle zvyklostí programování mikrokontrolérů [35], kdy po zapnutí zařízení je spuštěna inicializační funkce a následně se v nekonečné smyčce provádí hlavní kód firmware (obr. 2.13a). Vývojový diagram obou funkcí je stručně popsán na obr. 2.13b, c. Základní struktura programu komunikačního jádra je složitější kvůli nutnosti připojení zařízení do Wi-Fi sítě (obr. 2.14a). Stejně jako na měřicím jádře je spuštěna inicializační funkce (obr. 2.14b). Kvůli nutnosti připojení zařízení do Wi-Fi sítě byl vytvořen mezistupeň v nekonečné smyčce, který zajistí opětovné připojení k síti v případě výpadku (obr. 2.14c). Pokud je zařízení připojeno k síti, je spouštěna vnitřní smyčka (obr. 2.14d).



Obr. 2.13: Vývojový diagram měřicího jádra. a) Hlavní struktura běhu programu. b) Inicializační funkce. c) Hlavní smyčka.



Obr. 2.14: Vývojový diagram komunikačního jádra. a) Hlavní struktura běhu programu. b) Inicializační funkce. c) Vnější komunikační smyčka. d) Vnitřní komunikační smyčka.

2.5.1 Moduly firmware

Měřicí jádro využívá následujících modulů:

- Sensors – řídí komunikaci se senzory. Zajišťuje uložení konfigurace do senzorů, umožňuje vyčítat naměřené hodnoty ze senzorů, ovládat jejich napájení pomocí knihovny `power`, ovládat I²C multiplexor (knihovna `mux`) a číst měřené hodnoty ze senzorů teploty, relativní vlhkosti a tlaku (knihovny `hyt271`, `ms5607`). Součástí modulu je dále řada knihoven pro komunikaci s různými modely měřených senzorů. Práce s každým ze senzorů probíhá pomocí stavového automatu, který umožňuje plnou míru kontroly nad okamžitým stavem senzoru a umožňuje číst měřenou hodnotu z více senzorů s malým časovým odstupem. Tento princip zajišťuje přesnější srovnání měřených hodnot senzorů.
- Display – řídí zobrazování informací na displeji. Součástí tohoto modulu je knihovna pro komunikaci s použitým displejem (knihovna `gfx_pack`), která zajišťuje psaní textu a dalších obrazců na displej. Další součástí je knihovna pro ovládání modulu reálného času RTC, který aktualizuje svou hodnotu jednou za cca 250 ms. Tato knihovna slouží jako mezivrstva pro ukládání aktuálního data a času a využívá pro komunikaci s modulem DS3231 (obvod reálného času) externí volně dostupnou knihovnu [36], která spadá pod licenci BSD-3-Clause.
- Config – řídí načtení a uložení konfigurace do paměti EEPROM. Součástí modulu je knihovna `eeprom`, která slouží pro komunikaci s EEPROM pamětí.
- SOAP – slouží pro vytváření zprávy s naměřenými hodnotami, jež bude odeslána přes Wi-Fi síť do cílového úložiště. Tato zpráva obsahuje časovou značku a naměřené hodnoty ze všech aktivních senzorů.

Obsluhu komunikačního jádra zajišťuje knihovna `wifi`. Její součástí jsou moduly TCP klient pro odesílání měřených hodnot do databáze a TCP server pro účely servisní komunikace.

2.5.2 Popis funkce měřicího jádra

Měřicí jádro provádí základní obsluhu komponent testeru. Ovládá displej, senzory a všechny s nimi související operace (čtení měřených hodnot, nastavení konfigurace a napájení) a připravuje zprávu pro odeslání naměřených dat.

Jako první je volána funkce `init()`, která postupně inicializuje jednotlivé moduly. Proces inicializace je tvořen nastavením funkcí pinů mikrokontroléru pro komunikaci s ostatními periferiemi, přípravou proměnných, polí a struktur pro správnou funkci mikrokontroléru a získáním konfigurace zařízení a senzorů z paměti EEPROM. Tato funkce také inicializuje komunikační jádro.

Hlavní měřicí smyčka pracuje na principu pollingu, kdy každý modul periodicky kontroluje, zda má provést nějakou akci. Postupně tak dochází k předávání kon-

troly mezi všemi moduly. Okamžitý stav modulu je popsán stavovými automaty umístěnými ve strukturách jednotlivých modulů.

Alternativním řešením k principu pollingu je využití časovačů a přerušování. Od tohoto řešení bylo ustoupeno na základě problémů s laděním firmware.

2.5.3 Popis funkce komunikačního jádra

Komunikační jádro obsluhuje bezdrátovou komunikaci mikrokontroléru, případně pak servisní komunikaci. Kód tohoto jádra je spouštěn během inicializace měřicího jádra. Během něj dochází ke spuštění Wi-Fi modulu CYW43 a přípravě zařízení pro komunikaci (nastavení IP adresy, režimu pracovní stanice a vypnutí úsporného režimu Wi-Fi modulu).

Ve vnější smyčce dochází k připojení zařízení k Wi-Fi síti s parametry specifikovanými v paměti EEPROM. Po úspěšném připojení je inicializován TCP klient pro odesílání naměřených dat (knihovna `tcp_client`) a TCP server pro účely servisní komunikace (knihovna `tcp_server`). Následně je volána funkce vnitřní smyčky `wifi_loop()`, která obsluhuje výše zmíněné komponenty (TCP klient a TCP server). Toto uspořádání umožňuje neustálou kontrolu připojení k Wi-Fi síti a díky stavovým automatům implementovaným v rámci knihoven `tcp_client` a `tcp_server` i schopnost současného běhu TCP serveru i klienta.

3 Výběr senzorů

Zadavatel stanovil tato kritéria pro výběr senzorů k testování:

- Rozměry
- Komunikační rozhraní (preferována I²C sběrnice)
- Přesnost měření, stabilita hodnot bez využití automatické kalibrace
- Odběr elektrické energie (využití v bateriově napájených aplikacích)
- Teplotní rozsah, provozní podmínky
- Cena a dostupnost

Pro srovnávací měření bylo na základě těchto požadavků vybráno celkem osm senzorů, jejichž seznam je uvedený v tab. 3.1. Sloupec s názvem „Senzor“ obsahuje typové označení senzoru přidělené výrobcem a je v tomto významu použitý i v dalších tabulkách. Parametry, podle nichž byly tyto senzory vybrány, jsou diskutovány v následujících podkapitolách. Všechny vybrané senzory mají k dispozici komuni-

Tab. 3.1: Vybrané senzory pro provedení srovnávacích měření

Senzor	Výrobce	Princip
EE895	E+E Elektronik	Optický NDIR
CDM7162	Figaro	Optický NDIR
Sunrise	Senseair	Optický NDIR
Sunlight	Senseair	Optický NDIR
SCD30	Sensirion	Optický NDIR
SCD41	Sensirion	Fotoakustický NDIR
CozIR-LP3	Gas Sensing Solutions	Optický NDIR
CM1107N	Cubic Sensor and Instrument	Optický NDIR

kační rozhraní I²C, garantovanou životností více než 10 let a, jak je patrné z tabulky 3.1, všechny jsou založeny na principu NDIR, v důsledku čehož je odběr elektrické energie použitých senzorů menší ve srovnání s jinými principy.

3.1 Katalogové údaje senzorů

Tato kapitola srovnává vybrané parametry senzorů na základě údajů z katalogových listů jejich výrobců [41–48] a dostupných údajů o senzorech.

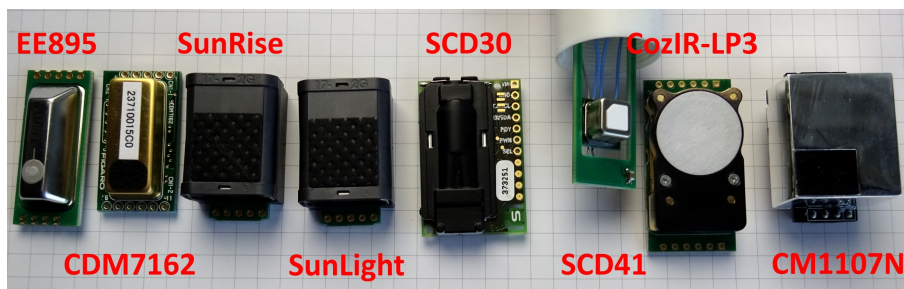
3.1.1 Rozměry

Senzor je určený k zabudování do různých přístrojů, které zadavatel již vyrábí nebo je připravuje do výroby. Jedním ze základních kritérií pro výběr senzoru jsou tedy jeho

rozměry. Tabulka 3.2 uvádí rozměry vybraných senzorů, které vyhověly požadavkům zadavatele. Na obr. 3.1 je uvedeno jejich vizuální porovnání.

Tab. 3.2: Tabulka rozměrů vybraných senzorů

Senzor	Délka	Šířka	Výška
EE895	35 mm	15 mm	7 mm
CDM7162	32 mm	17 mm	8 mm
Sunrise	33,5 mm	19,7 mm	11,5 mm
Sunlight	33,5 mm	19,7 mm	11,5 mm
SCD30	35 mm	23 mm	7 mm
SCD41	10,1 mm	10,1 mm	6,3 mm
CozIR-LP3	38,7 mm	19,5 mm	9,5 mm
CM1107N	33 mm	21,7 mm	12,7 mm



Obr. 3.1: Fotografie vybraných senzorů

3.1.2 Přesnost měření

Přesnost měření koncentrace oxidu uhličitého je dalším ze základních parametrů senzoru. Při porovnání senzorů je nutné vzít v úvahu, zda se jedná o údaje platné v celém rozsahu provozních podmínek senzoru, nebo jen v jejich omezené části. Pro některé aplikace také existují normativní požadavky, např. ANSI/ASHRAE 62.1 [5] pro řízení větrání v budovách. V tab. 3.3 je uvedeno srovnání přesností vybraných senzorů při teplotě 23 °C v prostředí bez kondenzace vodní páry.

Pro lepší přehlednost jsou v tab. 3.4 uvedeny hodnoty maximální povolené odchylky pro koncentrace 1000 ppm a 3000 ppm. Z uvedených hodnot je zřejmé, že nejlepší přesnost mají senzory Sunrise, CozIR-LP3 a CM1107N. Naopak nejhorší přesnost na vyšších koncentracích vykazuje senzor SCD41.

Tab. 3.3: Tabulka přesnosti měření vybraných senzorů; MV značí měřenou hodnotu koncentrace v ppm

Senzor	Měřicí rozsah [ppm]	Maximální odchylka při 23 °C
EE895	0–5000	$\pm(50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
CDM7162	360–5000	$\pm(50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
	400–1500	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
Sunrise	1501–2500	$\pm 75 \text{ ppm}$
	2501–5000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
	5001–10 000	$\pm 10 \% \text{ MV}$
Sunlight	400–5000	$\pm(50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
	5001–10 000	$\pm 10 \% \text{ MV}$
SCD30	400–10 000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
	400–1000	$\pm(50 \text{ ppm} + 2,5 \% \text{ MV})$
SCD41	1001–2000	$\pm(50 + 3 \% \text{ ppm})$
	2001–5000	$\pm(40 \text{ ppm} + 5 \% \text{ MV})$
CozIR-LP3	0–5000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$
CM1107N	0–5000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ MV})$

Tab. 3.4: Tabulka maximální povolené odchylky měření koncentrace oxidu uhličitého při 1000 ppm a 3000 ppm

Senzor	Odchylka při 1000 ppm, 23 °C	Odchylka při 3000 ppm, 23 °C
EE895	$\pm 80 \text{ ppm}$	$\pm 140 \text{ ppm}$
CDM7162	$\pm 80 \text{ ppm}$	$\pm 140 \text{ ppm}$
Sunrise	$\pm 60 \text{ ppm}$	$\pm 120 \text{ ppm}$
Sunlight	$\pm 80 \text{ ppm}$	$\pm 140 \text{ ppm}$
SCD30	$\pm 60 \text{ ppm}$	$\pm 120 \text{ ppm}$
SCD41	$\pm 75 \text{ ppm}$	$\pm 190 \text{ ppm}$
CozIR-LP3	$\pm 60 \text{ ppm}$	$\pm 120 \text{ ppm}$
CM1107N	$\pm 60 \text{ ppm}$	$\pm 120 \text{ ppm}$

3.1.3 Napájení

Ze strany zadavatele práce je preferováno napájecí napětí 3,3 V DC. V tab. 3.5 jsou uvedeny rozsahy napájecího napětí jednotlivých senzorů. Je zřejmé, že senzor CM1107N podporuje pouze napájecí napětí 5 V DC, všechny ostatní podporují napájecí napětí 5 V DC i 3,3 V DC.

Tab. 3.5: Tabulka povoleného rozsahu napájecího napětí vybraných senzorů

Senzor	Rozsah napájecího napětí
EE895	(3,3-5) V DC ± 5 %
CDM7162	(3,3 \pm 0,3) V nebo (5,0 \pm 0,5) V DC
Sunrise	(3,05-5,5) V DC
Sunlight	(3,05-5,5) V DC
SCD30	(3,3-5,5) V DC
SCD41	(2,4-5,5) V DC
CozIR-LP3	(3,25-5,5) V DC
CM1107N	(4,5-5,5) V DC

3.1.4 Odběr elektrického proudu

Odběr elektrického proudu je důležitý především pro bateriově napájená zařízení. V tab. 3.6 jsou uvedeny katalogové hodnoty průměrného a špičkového odebíraného proudu při kontinuálním napájení senzorů za stanovených podmínek měření. Tyto podmínky zahrnují interval měření, počet měřených vzorků na jednu hodnotu a napájecí napětí senzoru.

Srovnáním hodnot průměrného odběru v tab. 3.6 lze pozorovat výrazně nižší očekávaný odběr senzorů Sunrise a Sunlight. Tyto senzory spolu se senzorem CozIR-LP3 využívají pro realizaci zdroje záření IRED diodu, která má výrazně nižší spotřebu elektrické energie ve srovnání se žárovkou, kterou využívají ostatní senzory.

Tab. 3.6: Tabulka průměrného a maximálního proudového odběru senzorů při kontinuálním napájení

Senzor	Podmínky měření	Průměrný odběr	Maximální odběr
EE895	15 s, 3,3 V _{DD}	1,6 mA	95 mA
CDM7162	2 s, 5 V _{DD}	25 mA	75 mA
Sunrise	16 s/8 vzorků, 3,3 V _{DD}	34 μ A	<125 mA
Sunlight	16 s/8 vzorků, 3,3 V _{DD}	30 μ A	<80 mA
SCD30	2 s	19 mA	75 mA
SCD41	5 s, 3,3 V _{DD}	18 mA	205 mA
CozIR-LP3	0,5 s/16 vzorků, 3,3 V _{DD}	1,5 mA	35 mA
CM1107N	1 s, 5 V _{DD}	<50 mA	-

3.1.5 Provozní a skladovací podmínky

Oba parametry jsou uvedeny v tab. 3.7. Zadavatel preferuje pro provoz senzoru rozsah běžných pokojových teplot a relativních vlhkostí, nicméně nemůže vyloučit jeho expozici širšímu teplotnímu rozsahu (-30 až $+60$) °C. Je žádoucí, aby v tomto případě nedošlo k poškození či výrazné degradaci parametrů senzoru. Prověření chování senzorů zatížených nad rámec běžných provozních podmínek bude předmětem měření.

Tab. 3.7: Tabulka skladovacích a provozních teplot vybraných senzorů

Senzor	Rozsah skladovacích teplot	Rozsah provozních teplot
EE895	$(-40-60)$ °C	$(-40-60)$ °C
CDM7162	$(-30-60)$ °C	$(0-50)$ °C
Sunrise	$(-40-70)$ °C	$(0-50)$ °C / $(-40-60)$ °C ¹
Sunlight	$(-40-70)$ °C	$(0-50)$ °C / $(-40-60)$ °C ¹
SCD30	$(-40-70)$ °C	$(0-50)$ °C
SCD41	$(10-50)$ °C / $(-40-70)$ °C ²	$(-10-60)$ °C
CozIR-LP3	$(-40-70)$ °C	$(0-50)$ °C / $(-25-55)$ °C ³
CM1107N	$(-30-70)$ °C	$(-10-50)$ °C

Rozsah provozních vlhkostí senzorů CDM7162, Sunrise a Sunlight je $(0-85)$ % RH. Rozsah provozní vlhkostí ostatních vybraných senzorů je $(0-95)$ % RH.

3.1.6 Další parametry

Některé z vybraných senzorů mají vnitřní čidla pro měření dalších fyzikálních veličin (barometrického tlaku, teploty okolí a relativní vlhkosti). Tab. 3.8 udává, které další veličiny tyto senzory měří.

Dle katalogového listu senzoru CozIR-LP3 [47] existuje verze senzoru se zabudovaným čidlem pro měření teploty a relativní vlhkosti. Měření ovšem byla prováděna se senzorem bez těchto čidel.

¹Senzor je možné provozovat v širším rozsahu teplot se sníženou přesností

²Krátkodobě

³Platí pro senzor se speciální úpravou

Tab. 3.8: Tabulka dalších fyzikálních veličin, které senzory měří

Senzor	Barometrický tlak	Teplota okolí	Relativní vlhkost
EE895	Ano	Ano	Ne
CDM7162	Ne	Ne	Ne
Sunrise	Ne	Ano	Ne
Sunlight	Ne	Ano	Ne
SCD30	Ne	Ano	Ano
SCD41	Ne	Ano	Ano
CozIR-LP3	Ne	Ne	Ne
CM1107N	Ne	Ne	Ne

3.2 Obchodní údaje

3.2.1 Cenové relace

Důležitým parametrem z obchodního hlediska je cena senzoru. Tabulka 3.9 uvádí cenu jednoho kusu senzoru při nákupu daného počtu senzorů. Ceny jsou uvedeny k 1. 11. 2024.

Tab. 3.9: Tabulka nákupní ceny senzorů

Název	Cena/ks	Při objednaném množství
EE895	41,178 €	2000 ks
CDM7162	29,5 €	500 ks
Sunrise	32 €	500 ks
Sunlight	19 €	500 ks
SCD30	34 €	200 ks
SCD41	26 €	200 ks
CozIR-LP3	39 €	500 ks
CM1107N	15,5 €	500 ks

3.2.2 Dostupnost senzoru na trhu a technická podpora výrobce

Všechny vybrané senzory jsou v současné době dobře dostupné na trhu. Švédská společnost Senseair je součástí jednoho z předních světových výrobců NDIR prvků, skupiny Asahi Kasei Group. S výrobcem bylo několikrát komunikováno, technická podpora byla na velmi vysoké úrovni. Rakouská společnost E+E Elektronik v určitém období zcela stáhla své senzory z trhu, ale přibližně po roce jejich prodej

obnovila. Švýcarská společnost Sensirion a čínská společnost Cubic Sensor and Instrument dobře komunikují z obchodního hlediska.

3.3 Výsledky měření na senzorech

Pro ověření přesnosti měření koncentrace oxidu uhličitého byly jako etalony použity kalibrované referenční plyny – oxid uhličitý v syntetickém vzduchu o nominální koncentraci 1000 ppm a 3000 ppm, pokud v rámci měření daného parametru není uvedeno jinak. Konkrétní koncentrace referenčních plynů byly převzaty z jejich kalibračních listů. Během měření byly senzory umístěny v uzavřeném boxu s přívodem a odvodem referenčního plynu, rychlost průtoku plynu byla nastavena na 1 l/min. Některá měření byla prováděna v tzv. odpojovaném režimu napájení. Při těchto měřeních byly senzory periodicky připojovány k napájení s intervalem 2 minuty. Po zapnutí napájení senzoru následovala časová prodleva k ustálení parametrů, poté proběhlo měření a napájení senzoru bylo následně odpojeno. Doba potřebná k ustálení parametrů po zapnutí napájení byla stanovena experimentálně a je pro jednotlivé senzory uvedena v tabulce 3.10.

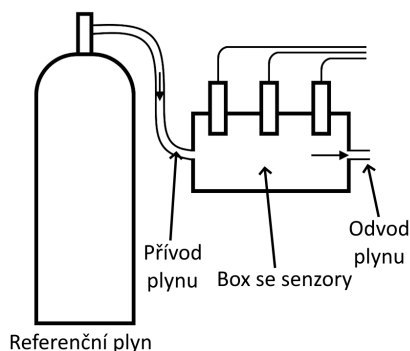
Konfigurace senzorů během měření je uvedena v elektronické příloze (soubor Konfigurace senzorů.xlsx).

Tab. 3.10: Tabulka doby náběhu senzorů

Senzor	Doba náběhu [s]
EE895	10
CDM7162	90
Sunrise	<10
Sunlight	<10
SCD30	50
SCD41	55
CozIR-LP3	<10
CM1107N	30

3.3.1 Přesnost měření a dlouhodobá stabilita senzorů

V rámci testování přesnosti měření a dlouhodobé stability senzorů (tzv. driftu) byla provedena kalibrace senzorů při koncentraci oxidu uhličitého 2930 ppm pro senzory EE895, Sunrise, Sunlight, SCD30, SCD41 a CozIR-LP3. Senzory CDM7162 a CM1107N nepodporují kalibraci při vysokých koncentracích oxidu uhličitého, tyto byly kalibrovány při koncentraci 979 ppm. Uspořádání pracoviště pro měření přes-



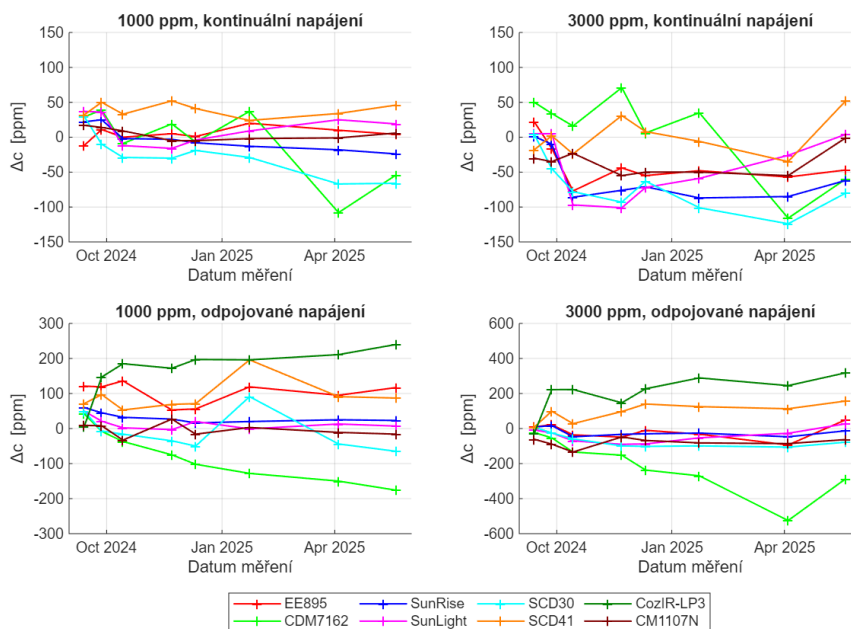
Obr. 3.2: Uspořádání pracoviště pro měření dlouhodobé stability senzorů

nosti a dlouhodobé stability senzorů je uvedeno na obr. 3.2. Při měření nebyla v souladu s požadavkem zadavatele aktivní žádná forma automatické kalibrace senzorů.

Měření probíhalo po dobu devíti měsíců. Po celou tuto dobu byla měřicí pracoviště zapnutá a naměřené hodnoty se kontinuálně zaznamenávaly do databáze. Přibližně jednou za měsíc byly do měřících boxů aplikovány referenční plyny o nominálních koncentracích 1000 ppm a 3000 ppm a pro jednotlivé senzory byly vyhodnoceny aktuální chyby měření.

Od každého typu senzoru byly měřeny dva kusy, jeden v režimu trvalého napájení s měřicím intervalem 10 sekund a druhý v režimu odpojovaného napájení s měřicím intervalem 2 minuty.

Výsledky jsou uvedeny v grafech na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Grafy dlouhodobé stability měřených senzorů

Z uvedených grafů a naměřených hodnot v režimu s trvalým napájením byl vyloučen senzor CozIR-LP3, který v průběhu měření vykazoval výrazný drift (až 700 ppm). Pravděpodobně došlo k jeho poškození během měření teplotní závislosti v širokém rozsahu teplot.

Přehled výsledků měření dlouhodobé stability je uveden v tabulce 3.11.

Tab. 3.11: Výsledek dlouhodobého testu stability měření koncentrace oxidu uhličitého jednotlivými senzory v různých režimech

Senzor	Režim s kontinuálním napájením	Režim s odpojovaným napájením
EE895	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci
CDM7162	stabilní ve specifikaci	mimo specifikaci
Sunrise	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci
Sunlight	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci
SCD30	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci
SCD41	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci
CozIR-LP3	-	mimo specifikaci
CM1107N	stabilní ve specifikaci	stabilní ve specifikaci

Diskuze k výsledkům měření:

- Senzor EE895 v režimu trvalého napájení vykazoval chybu měření v rozsahu udávaném výrobcem. V režimu odpojovaného napájení měl po celou dobu stabilní odchylku cca 100 ppm od etalonu. Tato odchylka byla způsobena nepřesnou kalibrací senzoru výrobcem v koncentraci 3000 ppm (nelze provést kalibraci senzoru ve více bodech, jedná se tedy zřejmě o špatnou směrnici kalibrační přímky). Měřená odchylka od etalonu nevykazuje výrazné změny v čase, senzor lze považovat za dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.
- Senzor CDM7162 při trvalém napájení vykazoval po kalibraci odchylku od etalonu v mezích udaných výrobcem po dobu cca šesti měsíců. V režimu s odpojovaným napájením lze pozorovat výrazný nárůst odchylky od etalonu v čase, která po dvou měsících překročila maximální odchylku udávanou výrobcem. Na základě měření lze usoudit na nutnost nové kalibrace senzoru po cca dvou měsících, pokud není senzor trvale napájený.
- Senzor Sunrise vykazuje dlouhodobě stabilní odchylku od etalonu. V grafech 3.3 nahoře lze pozorovat mírnou změnu odchylky od etalonu po cca dvou měsících od zahájení měření. K tomuto posunu došlo během měření teplotní závislosti senzorů v požadovaném rozsahu teplot. V dalším období odchylky nevykazují významné změny. Senzor lze považovat za dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.

- Senzor Sunlight vykazuje podobnou charakteristiku jako senzor Sunrise. Senzor po celou dobu měření nepřekročil maximální povolenou odchylku stanovenou výrobcem. Senzor lze považovat za dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.
- Senzor SCD30 při koncentraci 1000 ppm v režimu trvalého i odpojovaného napájení přesáhl maximální odchylku povolenou výrobcem o nejvýše 30 ppm. Tato odchylka ovšem byla způsobena nepřesnou kalibrací senzoru v koncentraci 3000 ppm, kde senzor při odpojovaném napájení vykazoval téměř konstantní odchylku od etalonu (v režimu trvalého napájení lze pozorovat změnu odchylky, k níž došlo během měření teplotní závislosti senzorů v požadovaném rozsahu teplot). Senzor je bez automatické kalibrace dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.
- Senzor SCD41 vykazuje v průběhu měření odchylku menší než maximální odchylku udávanou výrobcem. Senzor nevykazuje výraznou časovou závislost odchylky, lze jej tedy považovat za dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.
- Senzor CozIR-LP3 při trvalém napájení vykazoval v důsledku vystavení teplotám mimo pracovní rozsah odchylku až 700 ppm, nelze tedy určit jeho dlouhodobou stabilitu pro tento režim napájení. Pro odpojovaný režim vykazuje senzor prudký nárůst odchylky v průběhu prvního měsíce, poté došlo k jeho zpomalení. Senzor není vhodné používat bez zapnuté automatické kalibrace.
- Senzor CM1107N vykazuje odchylku v průběhu měření menší než maximální odchylku udávanou výrobcem a nevykazuje výraznou časovou závislost této odchylky. Senzor lze tedy považovat za dlouhodobě stabilní v rozsahu více než 9 měsíců.

3.3.2 Krátkodobá stabilita měření koncentrace oxidu uhličitého

Při měření krátkodobé stability (šumu měřené hodnoty) senzoru byly senzory umístěny v uzavřeném prostředí s výrazně omezenou cirkulací vzduchu. Koncentrace oxidu uhličitého se během měření pohybovala v rozsahu 1000 až 1500 ppm, nebylo využito referenčních plynů. Princip zpracování dat spočívá ve výpočtu klouzavého průměru, výpočtu okamžité odchylky a následném výpočtu maximální a směrodatné odchylky. Počet vzorků pro výpočet klouzavého průměru odpovídá pro trvale napájené senzory jedné hodině, pro odpojovaný režim napájení pak dvěma hodinám. Výsledné hodnoty shrnují tabulky 3.12 a 3.13. Grafické zpracování měření je uvedeno v příloze A.1.

Tab. 3.12: Parametry krátkodobé stability měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého senzorů při trvalém napájení

Senzor	Maximální odchylka ⁴	Směrodatná odchylka ⁴
EE895	32 ppm	6 ppm
CDM7162	26 ppm	6 ppm
Sunrise	3 ppm	1 ppm
Sunlight	11 ppm	1 ppm
SCD30	18 ppm	4 ppm
SCD41	20 ppm	4 ppm
CozIR-LP3	206 ppm	15 ppm
CM1107N	7 ppm	2 ppm

Tab. 3.13: Parametry krátkodobé stability měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého senzorů při odpojovaném napájení

Senzor	Maximální odchylka ⁴	Směrodatná odchylka ⁴
EE895	75 ppm	15 ppm
CDM7162	161 ppm	47 ppm
Sunrise	23 ppm	6 ppm
Sunlight	42 ppm	9 ppm
SCD30	29 ppm	7 ppm
SCD41	62 ppm	14 ppm
CozIR-LP3	46 ppm	11 ppm
CM1107N	32 ppm	7 ppm

Při trvalém napájení senzorů lze pozorovat nejmenší odchylku u senzorů Sunrise, Sunlight a CM1107, největší pak u senzoru CozIR-LP3. Pro snížení této odchylky bylo laborováno s blokováním napájení senzoru, tento krok však neměl významný vliv na výslednou krátkodobou stabilitu tohoto senzoru.

Při odpojovaném napájení vykazuje senzor CozIR-LP3 výrazně menší odchylku než při trvalém napájení. Výrazně vyšší odchylku vykazuje senzor CDM7162. Tento senzor může mít dobu náběhu až 2 minuty, která odpovídá použitému měřicímu intervalu. Hodnota ze senzoru je tedy čtena už po 90 sekundách pro zachování tohoto intervalu a snížení celkového odběru elektrické energie senzoru. Nejmenší odchylku v odpojovaném režimu napájení vykazují senzory Sunrise, SCD30 a CM1107N.

⁴Odchylka od hodnoty klouzavého průměru

3.3.3 Proudový odběr senzorů

Pro měření profilu elektrického proudu byl využit pomocný vzorkovací ampérmetr s rozsahem 500 mA a vzorkovací frekvencí 330 Hz. Grafické znázornění profilu proudového odběru vybraných senzorů je uvedeno v příloze A.2. Tabulka 3.14 ukazuje průměrný proudový odběr při trvalém a odpojovaném napájení pro vybrané senzory. Naměřené hodnoty zahrnují odběr senzoru způsobený měřením koncentrace oxidu uhličitého i komunikací se senzorem.

Tab. 3.14: Průměrný proudový odběr při trvalém a odpojovaném napájení

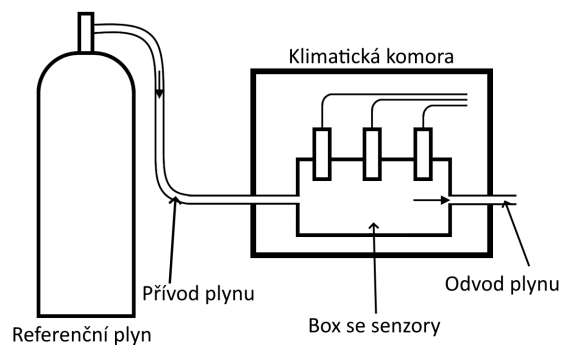
Senzor	Proudový odběr (trvalé napájení)	Proudový odběr (odpojované napájení)
EE895	2,8 mA	0,57 mA
CDM7162	25,9 mA	18,7 mA
Sunrise	0,28 mA	0,26 mA
Sunlight	0,28 mA	0,26 mA
SCD30	15,1 mA	6,5 mA
SCD41	14,0 mA	1,25 mA
CozIR-LP3	1,13 mA	0,36 mA
CM1107N	40 mA	13,1 mA

Z uvedených hodnot je patrné, že senzory Sunrise, Sunlight a CozIR-LP3 mají nejmenší odběr elektrické energie. Tyto senzory využívají jako zdroj světla IRED diodu, zatímco ostatní optické NDIR senzory využívají žárovku, která vyžaduje vyšší elektrický proud. Senzory CDM7162 a CM1107N vyžadují v odpojovaném režimu průměrně více než 10 mA, tyto senzory nejsou tedy vhodné pro bateriová zařízení.

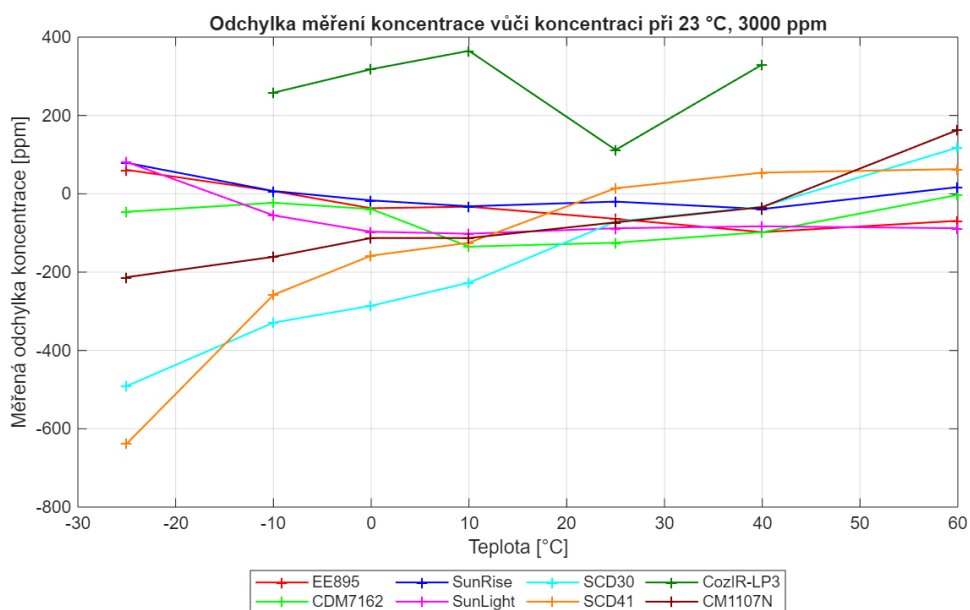
3.3.4 Teplotní závislost měření koncentrace oxidu uhličitého

Teplota je významným faktorem při měření koncentrace oxidu uhličitého pomocí nedisperzní infračervené analýzy, neboť ovlivňuje rychlost pohybu molekul plynu a vzdálenost mezi nimi, a tedy i počet molekul plynu schopných absorbovat infračervené záření (více kapitola 1.2.2). Některé senzory využívají pro tuto vnitřní korekci zabudovaná teplotní čidla, jiné (dle výrobce) vykazují minimální teplotní závislost [42] či tuto informaci nezmiňují.

Uspořádání pracoviště je na obr. 3.4. Senzory byly umístěny do uzavřeného boxu s vývody pro přívod a odvod plynu, který byl vložen do klimatické komory. Hadice přívodu plynu byla v délce 3 m stočená v komoře, aby se plyn dokonale vytemperoval na teplotu v komoře ještě před vstupem do boxu se senzory. Proudění plynu bylo



Obr. 3.4: Uspořádání pracoviště pro měření teplotní závislosti senzorů



Obr. 3.5: Graf teplotní závislosti měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého

nastaveno na 1 l/min. Komora byla nastavena na teplotu 23 °C, po ustálení bylo provedeno měření při koncentracích referenčního plynu 1000 ppm a 3000 ppm. Toto bylo opakováno pro teploty -25 °C, -10 °C, 0 °C, +10 °C, +40 °C, +60 °C a pak znovu +23 °C. Graf 3.5 uvádí závislost odchylky měřené koncentrace od referenční koncentrace 3000 ppm při 23 °C na teplotě.

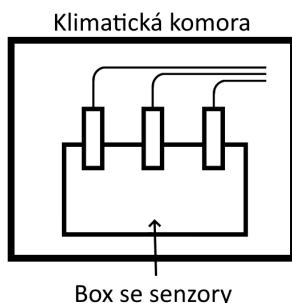
Z uvedeného grafu je zřejmá výrazná odchylka měření koncentrace oxidu uhličitého při nízkých teplotách u senzorů SCD30, SCD41 a CM1107N. Na vysokých teplotách lze pozorovat vysokou odchylku u senzorů CM1107N a SCD30. Sensory EE895, CDM7162, Sunrise a Sunlight nevykazují výraznou teplotní závislost měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého.

Senzor CozIR-LP3 vykazoval vysokou odchylku v celém rozsahu měřených teplot.

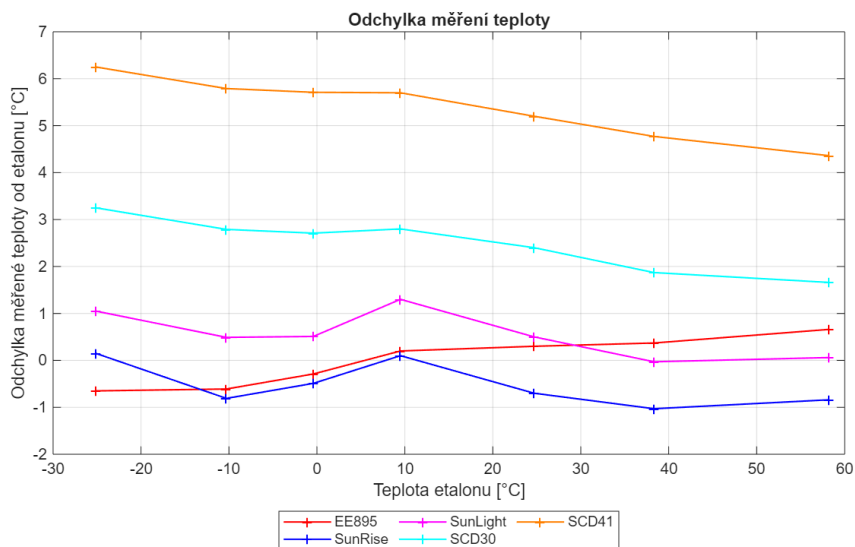
Při krajních teplotách (-25 °C a $+60\text{ °C}$) poskytoval namísto hodnoty koncentrace oxidu uhličitého chybové hlášení. Během měření došlo vlivem extrémních teplot k poškození tohoto senzoru.

3.3.5 Přesnost měření teploty

Některé senzory kromě měření koncentrace oxidu uhličitého umožňují také měřit teplotu uvnitř senzoru pro potřeby kompenzace měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého a tuto teplotu je možné s deklarovanou přesností ze senzoru vyčítat. Měření bylo provedeno v klimatické komoře v rozsahu (-25 °C až $+60\text{ °C}$) (uspořádání pracoviště je na obr. 3.6). Graf 3.7 ukazuje závislost chyby měření teploty vůči etalonu v celém měřeném rozsahu teplot.



Obr. 3.6: Uspořádání pracoviště pro měření přesnosti teplotních čidel senzorů

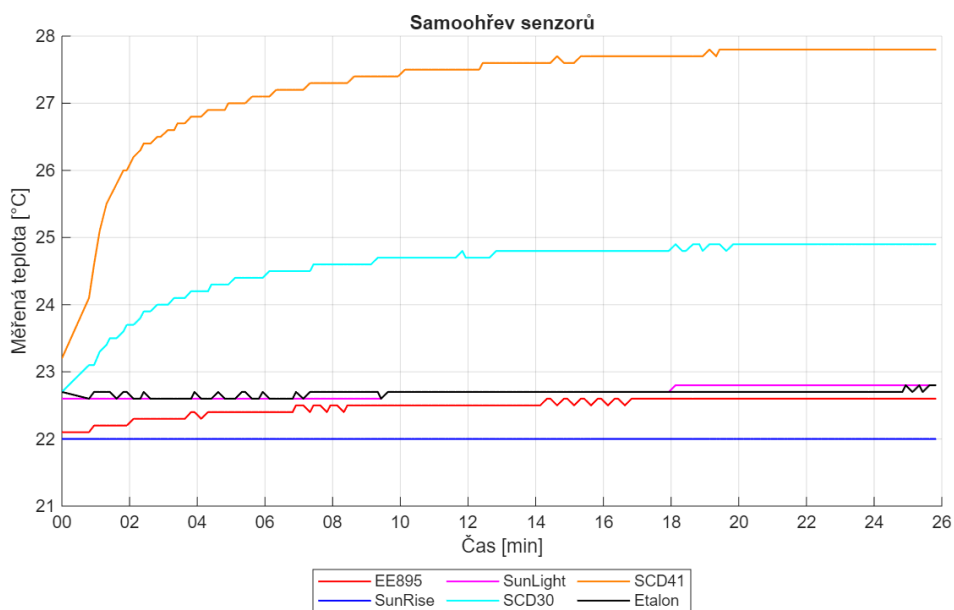


Obr. 3.7: Graf závislosti odchylky měřené teploty senzoru od etalonu na teplotě etalonu

Z uvedeného grafu lze pozorovat výraznou chybu měření teploty senzorů SCD30 a SCD41. Tyto senzory se během provozu zahřívají, a tedy teplota uvnitř senzoru je vyšší než teplota okolí. Tyto senzory není vhodné použít pro přesné měření teploty okolí. Sensory EE895, Sunrise a Sunlight mají v celém měřeném rozsahu odchylku od etalonu menší než 1,5 °C.

3.3.6 Ohřev senzorů

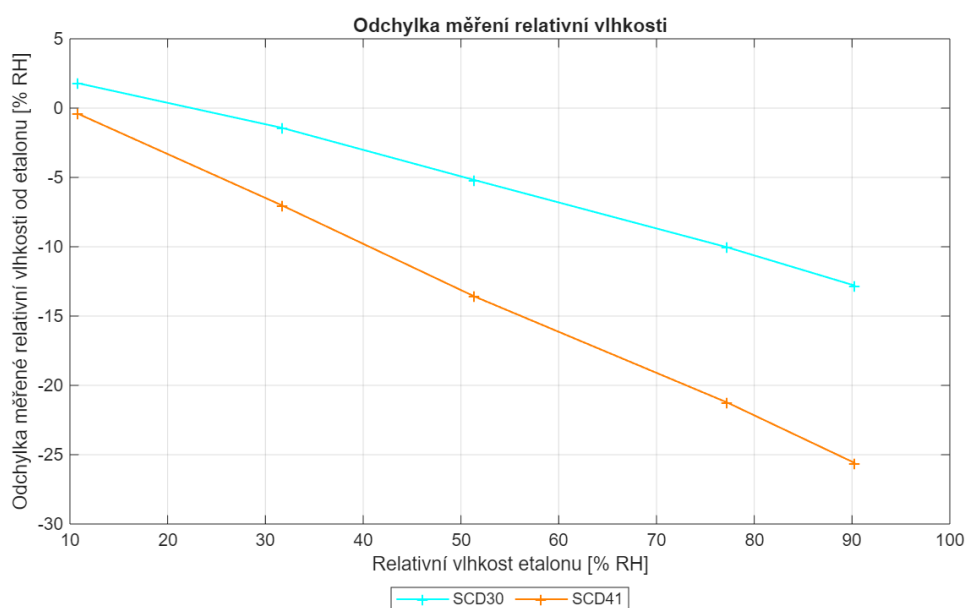
Pracovní teplota senzoru může ovlivnit výslednou naměřenou hodnotu koncentrace oxidu uhličitého. Během ověřování přesnosti teplotních čidel senzorů SCD30 a SCD41 se ukázalo jako vhodné analyzovat nárůst vnitřní teploty v senzorech po jejich připojení k napájení. Sensory byly ve vypnutém stavu umístěny do termostatu o teplotě 23 °C, po teplotním ustálení k nim bylo připojeno napájení a po dobu 25 minut byla vyčítána a zaznamenávána teplota. Graf 3.8 ukazuje výsledky tohoto měření. Lze pozorovat výrazný nárůst teploty senzorů SCD30 a SCD41 po zapnutí. Teplota senzoru SCD30 se zvýšila celkem o cca 2 °C a senzor SCD41 se ohřál o cca 4,5 °C. Tento ohřev se ukázal jako problematický nejen při měření teploty, ale i při měření relativní vlhkosti (kapitola 3.3.7).



Obr. 3.8: Časový průběh teploty měřené senzory po zapnutí napájení v teplotně ustáleném prostředí

3.3.7 Přesnost měření relativní vlhkosti

Měřená hodnota koncentrace oxidu uhličitého může být mimo jiné ovlivněna vlhkostí okolí. Dva z testovaných senzorů (SCD30 a SCD41) ji umožňují měřit. Přesnost těchto senzorů relativní vlhkosti byla ověřena pomocí rosnobodového vlhkoměru MBW-473 SH2. Výsledný graf závislosti odchylky měřené hodnoty relativní vlhkosti od etalonu na relativní vlhkosti prostředí je uveden na obr. 3.9.



Obr. 3.9: Závislost chyby měření relativní vlhkosti na okolní relativní vlhkosti

Z uvedeného grafu lze pozorovat, že s rostoucí vlhkostí významně roste chyba měření relativní vlhkosti senzorů. Tato chyba je způsobena vyšší teplotou uvnitř senzorů vůči okolnímu prostředí v důsledku zahřívání senzorů. Naměřená hodnota relativní vlhkosti z těchto senzorů je použitelná pouze v případě, že je senzor odpojený od napájení a není tak ovlivněný parazitním vnitřním ohřevem.

3.3.8 Tlaková kompenzace měřené hodnoty oxidu uhličitého

Další fyzikální veličinou, na níž závisí měřená koncentrace oxidu uhličitého, je barometrický tlak. Dle teorie 1.2.2 je tato závislost lineární, jedná se však pouze o aproximaci. Někteří výrobci udávají tlakovou závislost naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého jako 1 % MV/kPa [42], jiní až 1,6 % MV/kPa [49]. Finská společnost Vaisala doporučuje v [50] rovnici

$$c(t, p) = c(25^\circ\text{C}, 1013 \text{ hPa}) \cdot \frac{p}{1013} \cdot \frac{298}{273 + t} \quad (3.1)$$

kde $c(t, p)$... koncentrace oxidu uhličitého při teplotě t a barometrickém tlaku p [ppm],

$c(25^\circ\text{C}, 1013 \text{ hPa})$... koncentrace oxidu uhličitého při teplotě 25°C a barometrickém tlaku 1013 hPa [ppm],

p ... barometrický tlak [hPa],

t ... teplota [$^\circ\text{C}$].

Výrobce Gas Sensing Solutions doporučuje v [51] pro kompenzaci rovnici

$$c(p) = \frac{c(1013 \text{ hPa})}{1 - (1013 - p)/1013} \quad (3.2)$$

Po komunikaci se švédskou společností Senseair byla doporučena rovnice

$$c(p) = \frac{c(1013 \text{ hPa})}{4,026 \cdot 10^{-3} \cdot p + 5,780 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \quad (3.3)$$

Z vybraných senzorů poskytuje tlakově kompenzovanou hodnotu koncentrace oxidu uhličitého bez vnějšího zásahu pouze senzor EE895.

Pro aproximaci použité kompenzační rovnice byl senzor EE895 vložen do podtlakové komory a byla změřena přibližná závislost poskytované hodnoty koncentrace oxidu uhličitého na barometrickém tlaku. Na základě tohoto měření byla jako nejlepší aproximace této charakteristiky vybrána rovnice 3.3.

3.3.9 Další vlastnosti senzorů

Při práci s některými senzory byly pozorovány některé další vlastnosti podstatné pro jejich používání.

Po zapnutí napájení senzoru CDM7162 naměřená hodnota koncentrace oxidu uhličitého postupně narůstá od hodnoty 0 ppm na její skutečnou hodnotu v daném prostředí. Jedná se o formu průměrování měřené hodnoty, doba od zapnutí senzoru do ustálení měřené hodnoty se pohybuje v rozmezí 90–120 s. Okamžitou hodnotu změřené koncentrace nelze ze senzoru vyčíst a ani není k dispozici vhodný příznak, zda vyčtená hodnota už je platná nebo senzor teprve nabíhá.

U senzoru CDM7162 se navíc objevuje problém s komunikací. Měření koncentrace oxidu uhličitého se spouští každé dvě sekundy, přičemž jeho trvání je cca 500 ms. Pokud je proveden pokus o komunikaci se senzorem ve chvíli, kdy měření právě probíhá, dojde k zablokování I²C sběrnice stažením signálů SDA a SCL do úrovně L na vyšší jednotky až nižší desítky sekund.

Podobný problém se vyskytuje také u senzoru CozIR-LP3. Tento senzor měří koncentraci oxidu uhličitého každých 500 ms, přičemž měření trvá cca 100 ms. Při pokusu o komunikaci se senzorem v tomto časovém okně dochází k jeho resetování a zablokování I²C sběrnice na nízké jednotky sekund. Problémy se zablokováním sběrnice se na straně mikrokontroléru nepodařilo uspokojivě vyřešit.

3.4 Shrnutí výsledků měření a výběr nejvhodnějšího senzoru

Tato kapitola podává souhrn výsledků průzkumu a měření s cílem vybrat nejvhodnější senzor, který by se následně proměřil v počtu více kusů.

3.4.1 Senzor EE895

Mezi hlavní výhody senzoru EE895 lze zařadit tlakové čidlo, které umožňuje automatickou tlakovou kompenzaci naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého. Senzor má dále malé rozměry a nízký odběr elektrického proudu, je tedy vhodný pro použití do bateriových zařízení. Vykazuje dobrou dlouhodobou stabilitu. Další jeho výhodou je dobře vykompenzovaná teplotní závislost naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého a schopnost pracovat v širokém rozsahu provozních teplot.

Hlavní nevýhodou tohoto senzoru je vysoká pořizovací cena.

3.4.2 Senzor CDM7162

Výhodou senzoru CDM7162 jsou jeho malé rozměry.

Mezi nevýhody se řadí relativně vysoký proudový odběr (více než 10 mA), dlouhá doba náběhu senzoru (více než 90 sekund) a malý rozsah provozních teplot. Během náběhu senzor poskytuje nesprávné naměřené hodnoty, aniž by je bylo možné jednoduše rozpoznat. Při práci s tímto senzorem docházelo k výpadkům komunikace, které se nepodařilo odstranit.

3.4.3 Senzor Sunrise

Senzor Sunrise využívá jako zdroj záření nízkoodběrovou IRED diodu, díky čemuž má nízký odběr elektrické energie (desetiny mA). Senzor umožňuje měření koncentrace oxidu uhličitého s vysokou přesností, naměřená hodnota je stabilní z krátkodobého i dlouhodobého hlediska a nevykazuje výraznou teplotní závislost. Po připojení napájení senzor poskytuje první platnou hodnotu v rámci přesnosti stanovené výrobcem již po velmi krátkém čase. Umožňuje měřit koncentraci oxidu uhličitého až do 10 000 ppm.

Hlavní nevýhodou tohoto senzoru je jeho pořizovací cena a větší rozměry.

3.4.4 Senzor Sunlight

Senzor Sunlight je velmi podobný senzoru Sunrise - proudový odběr je velmi nízký (desetiny mA), naměřená hodnota je stabilní, první hodnota je k dispozici krátce

po zapnutí senzoru. Další výhodou je nízká pořizovací cena tohoto senzoru a nízká závislost měřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého na teplotě. Umožňuje měření koncentrace až do 10 000 ppm. Senzor je rozměrově shodný se senzorem Sunrise a oba senzory jsou pinově i programovou obsluhou zaměnitelné.

Nevýhodou tohoto senzoru jsou jeho větší rozměry.

3.4.5 Senzor SCD30

Senzor SCD30 umožňuje měření koncentrace oxidu uhličitého s dobrou přesností a stabilitou. Měřicí rozsah senzoru je až do 10 000 ppm.

Senzor má vyšší proudový odběr (vyšší jednotky mA) a výraznou teplotní závislost při nižších teplotách. Při provozu dochází k ohřevu senzoru o cca 2 °C, což má výrazný vliv na měřenou hodnotu teploty a relativní vlhkosti senzoru. Senzor má vyšší pořizovací cenu a větší rozměry.

3.4.6 Senzor SCD41

Hlavní výhodou senzoru SCD41 jsou jeho malé rozměry a dobrá dlouhodobá stabilita.

Mezi nevýhody lze zařadit vysoký vnitřní ohřev senzoru (až 4,5 °C) a špatnou krátkodobou stabilitu naměřených hodnot v režimu odpojovaného napájení. Naměřené hodnoty vykazují silnou závislost na teplotě. Při vyšších koncentracích oxidu uhličitého má senzor nižší garantovanou přesnost měřené hodnoty.

3.4.7 Senzor CozIR-LP3

Výhodou senzoru CozIR-LP3 je jeho malý proudový odběr.

Hlavní nevýhodou tohoto senzoru jsou časté výpadky komunikace. Senzor vykazuje silnou teplotní závislost naměřené hodnoty a špatnou dlouhodobou stabilitu. Má větší rozměry a vyšší pořizovací cenu. Při trvalém napájení má senzor špatnou stabilitu naměřených hodnot koncentrace oxidu uhličitého.

3.4.8 Senzor CM1107N

Senzor CM1107N má nízkou pořizovací cenu a umožňuje měření koncentrace oxidu uhličitého s vysokou přesností a stabilitou.

Mezi hlavní nevýhody lze zařadit velké rozměry a velký proudový odběr (více než 10 mA). Na rozdíl od předchozích senzorů vyžaduje napájecí napětí 5 V.

3.4.9 Výběr nejvhodnějšího senzoru

Po pečlivém zvážení všech zjištěných skutečností a po diskuzi se zadavatelem této práce byly pro další použití vybrány senzory Sunrise a Sunlight od výrobce Senseair. Oba senzory jsou pinové i softwarově zaměnitelné, proto bylo rozhodnuto zopakovat některá důležitá měření na čtyřech kusech senzoru Sunrise a čtyřech kusech senzoru Sunlight s tím, že preferovaným typem je levnější senzor Sunlight.

3.5 Potvrzení správnosti výběru senzoru

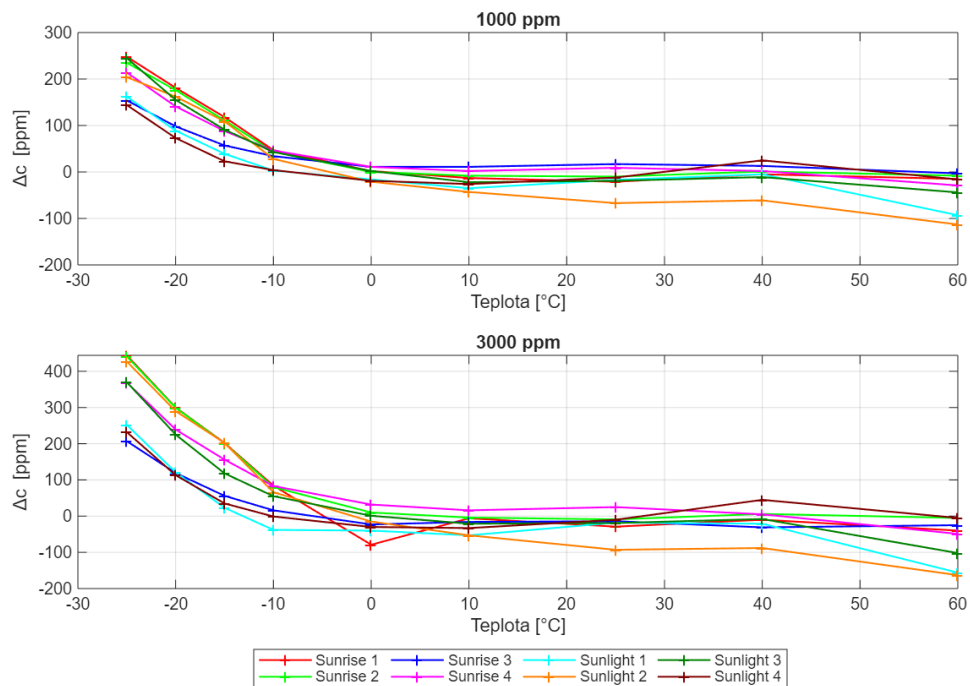
Cílem této části je verifikace dříve naměřených hodnot pro více kusů vybraných typů senzorů a rozhodnutí mezi dražším senzorem Sunrise a preferovaným senzorem Sunlight od výrobce Senseair. Měření byla prováděna na 4 kusech od každého z těchto typů.

Byla provedena tato měření:

- Ověření teplotní závislosti
- Ověření dlouhodobé stability senzorů po dobu 6 měsíců

3.5.1 Ověření teplotní závislosti

Na grafech na obr. 3.10 jsou uvedeny teplotní závislosti naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého pro senzory Sunrise a Sunlight pro koncentrace 1000 ppm a 3000 ppm. Lze pozorovat výraznou odchylku měřené hodnoty při nízké teplotě (řádově nízké stovky ppm). Naměřené hodnoty při koncentraci 1000 ppm jsou posunuty o cca 50 ppm. Bylo ověřeno, že k posunu došlo po výměně tlakové lahve s referenčním plynem za novou a souvisí to s nejistotou jeho kalibrace externí laboratoří. V rozsahu (-10 až $+60$) °C vykazuje většina senzorů odchylku v mezích daných výrobcem.

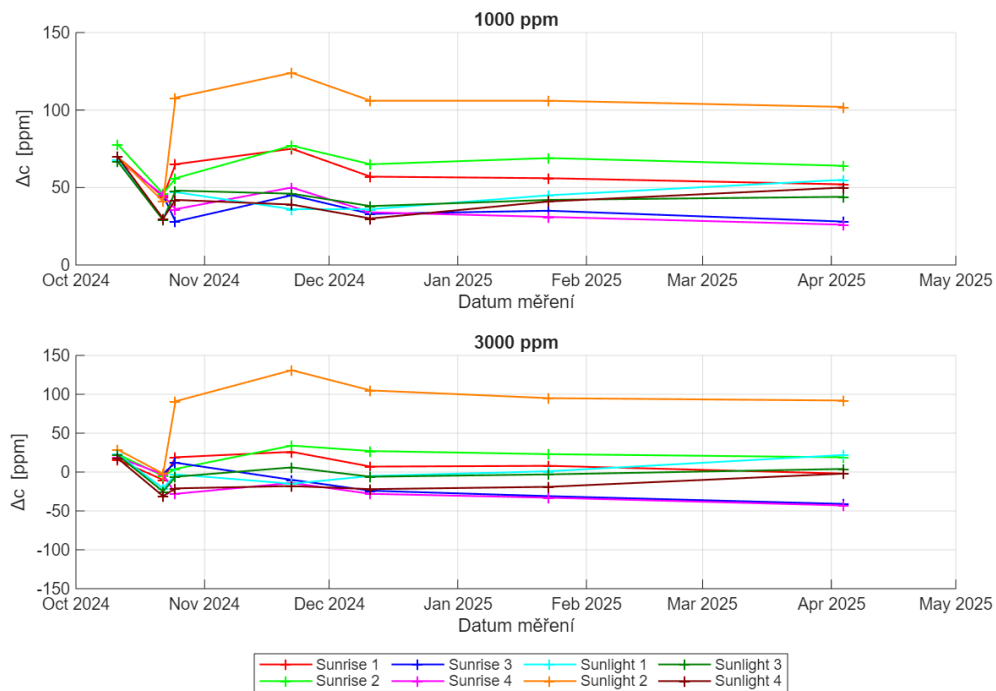


Obr. 3.10: Grafy teplotní závislosti naměřené hodnoty koncentrace oxidu uhličitého pro senzory Sunrise a Sunlight při referenčních koncentracích 1000 ppm a 3000 ppm

3.5.2 Ověření dlouhodobé stability

Na grafech na obr. 3.11 lze pozorovat dlouhodobou stabilitu senzorů. V prvním měsíci bylo provedeno měření teplotní závislosti v širokém rozsahu teplot podle požadavků zadavatele a toto měření způsobilo u jednoho senzoru Sunlight výraznější a trvalou změnu odchylky, která se pak již dále neměnila. Senzory vykazují vysokou míru dlouhodobé stability.

Hodnoty v horním grafu (1000 ppm) vykazují konstantní odchylku cca 50 ppm, která byla způsobena nejistotou kalibrace nového referenčního plynu v externí laboratoři.



Obr. 3.11: Grafy dlouhodobé stability senzorů Sunrise a Sunlight

Závěr

V rámci této práce byly popsány principy měření koncentrace různých plynů se zaměřením na nízkoodběrový princip nedisperzní infračervené analýzy. Ve druhé části bylo navrženo a zkonstruováno testovací zařízení pro čtení a sběr měřených hodnot z testovaných senzorů.

V poslední části této práce proveden užší výběr senzorů, které byly následně změřeny a otestovány. Kritéria pro výběr stanovil zadavatel této práce. Testováno bylo celkem osm typů senzorů od různých výrobců. Na základě provedených měření, která jsou popsána v kapitole 3.3, byly vybrány senzory Sunrise a Sunlight jako preferované volby. Podrobné srovnání senzorů je uvedené v kapitole 3.4.

Na základě dodatečných měření, která jsou popsána v kapitole 3.5, byl vybrán senzor Sunlight jako vhodný senzor pro měření koncentrace oxidu uhličitého v zařízeních vyráběných zadavatelem této práce. Tento senzor umožňuje dostatečně přesné měření koncentrace oxidu uhličitého, vykazuje dobrou dlouhodobou stabilitu a nízký proudový odběr. Výhodou ve srovnání se senzorem Sunrise je především jeho cena, ostatní parametry obou senzorů lze na základě provedených měření považovat za podobné. V současné době je tento senzor použitý v novém výrobku zadavatele a je upraven hardware pro jeho nasazení v některých stávajících výrobcích.

Literatura

- [1] *Overview of Greenhouse Gasses*. Online. In: OVERVIEW OF GREENHOUSE GASSES | US EPA. US EPA. 2015, 2024-11-26. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. [cit. 2024-12-25].
- [2] *Carbon Dioxide*. Online. In: WISCONSIN DEPARTMENT OF HEALTH SERVICES. Carbon Dioxide | Wisconsin Department of Health Services. [2018], 2023-03-29. Dostupné z: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>. [cit. 2024-12-25].
- [3] HADDRELL, Allen; OSWIN, Henry; OTERO-FERNANDEZ, Mara; ROBINSON, Joshua F.; COGAN, Tristan et al. *Ambient carbon dioxide concentration correlates with SARS-CoV-2 aerostability and infection risk*. Online. Nature Communications. 2024, roč. 15, č. 1. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47777-5>. [cit. 2024-12-25].
- [4] PARK, Sowoo a SONG, Doosam. *CO2 concentration as an indicator of indoor ventilation performance to control airborne transmission of SARS-CoV-2*. Online. Journal of Infection and Public Health. 2023, roč. 16, č. 7, s. 1037-1044. ISSN 18760341. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2023.05.011>. [cit. 2024-12-25].
- [5] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE Standard 62.1, *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. 2022.
- [6] COOPER, Jim. *CO2 concentration and pH control in the cell culture laboratory*. Online. In: Culture Collections. August 2019. Dostupné z: <https://www.culturecollections.org.uk/culture-collection-news/co2-concentration-and-ph-control-in-the-cell-culture-laboratory/>. [cit. 2024-12-25].
- [7] BALLESTEROS, M. A. *The Living Tank: Article - The CO2 Drop Checker - The Ultimate Guide*. In: *thelivingtank.co.uk* Online. 2 July 2016 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.thelivingtank.co.uk/2016/07/article-co2-drop-checker-ultimate-guide.html>.
- [8] WANG, Jacob Y. a ANDERSON, Roy L. *Non-Dispersive Infrared Gas Measurement*. Barcelona, Spain: International Frequency Sensor Association Publishing, 2012. ISBN 978-84-615-9512-9.

- [9] ČÁCHA, M. *Charakterizace elektrochemických senzorů plynů*. Online. Plzeň, 2020 [cit. 2024-12-01]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/40677/1/DP_Martin_Cacha.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Ing. Petr Kuberský, PhD.
- [10] *Tunable Diode Lasers: Comprehensive Guide*. Online. In: FINDLIGHT BLOG. Tunable Diode Lasers: Comprehensive Guide. 2024. Dostupné z: <https://www.findlight.net/blog/comprehensive-guide-to-tunable-diode-lasers/>. [cit. 2024-12-31].
- [11] *NDIR Gas Sensing: Improve your detection design*. Online. www.hamamatsu.com, 2023 [cit. 2024-12-06]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/21_HPE/featured-products-and-technologies/mid-ir-leds-for-ndir-gas-sensing.pdf
- [12] EL-SAFOURY, Mahmoud; WEBER, Christian; YASSINE, Hassan; WÖLLENSTEIN, Jürgen a SCHMITT, Katrin. *Towards a Miniaturized Photoacoustic Sensor for Transcutaneous CO₂ Monitoring*. Online. *Sensors*. 2024, roč. 24, č. 2. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s24020457>. [cit. 2024-12-06].
- [13] ZHOU, Libing; HE, Yaoyi; ZHANG, Qing a ZHANG, Lei. *Carbon Dioxide Sensor Module Based on NDIR Technology*. Online. *Micromachines*. 2021, roč. 12, č. 7. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi12070845>. [cit. 2024-12-06].
- [14] KASAP, Safa O.. *THERMOELECTRIC EFFECTS IN METALS: THERMOCOUPLES*. Online. In: UNIVERSITY OF MISSISSIPPI. THERMOELECTRIC EFFECTS IN METALS: THERMOCOUPLES. 2001. Dostupné z: <https://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/Thermoelectric%20Effec%2338D8EF.pdf>. [cit. 2024-12-31].
- [15] MARTIN, Cory R.; ZENG, Ning; KARION, Anna; DICKERSON, Russell R.; REN, Xinrong et al. *Evaluation and environmental correction of ambient CO₂ measurements from a low-cost NDIR sensor*. Online. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017, roč. 10, č. 7, s. 2383-2395. ISSN 1867-8548. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-10-2383-2017>. [cit. 2024-12-30].
- [16] *What is NDIR?* Online. In: ASAHI KASEI MICRODEVICES. What is NDIR? [2021]. Dostupné z: <https://www.akm.com/global/en/products/co2-sensor/tutorial/what-is-ndir/>. [cit. 2024-12-25].

- [17] *Sensor Element*. Online. ASAHI KASEI MICRODEVICES. Sensor Element. [2021]. Dostupné z: <https://www.akm.com/global/en/products/co2-sensor/lineup-co2-sensor/sensor-element/>. [cit. 2024-12-25].
- [18] *AK9700AE English Datasheet*. Online. ASAHI KASEI MICRODEVICES. AK9700AE English Datasheet. 2017. Dostupné z: <https://www.akm.com/content/dam/documents/products/gas-sensing/infrared-led-element-for-ndir-gas-sensor/ak9700ae/ak9700ae-en-datasheet.pdf>. [cit. 2024-12-25].
- [19] *Gas Sensors Types and Mechanism*. Online. ASAHI KASEI MICRODEVICES. Gas Sensors Types and Mechanism. [2021]. Dostupné z: <https://www.akm.com/global/en/products/co2-sensor/tutorial/types-mechanism/>. [cit. 2024-12-28].
- [20] STMICROELECTRONICS. *Datasheet - STPS2L40 - 40 V, 2 A low drop power Schotky rectifier*. Online. www.st.com, 2019 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stps2l40.pdf>
- [21] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi Pico W Datasheet: An RP2040-based microcontroller board with wireless*. Online. www.raspberrypi.com, 2022 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>
- [22] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi Pico-series C/C++ SDK: Libraries and tools for C/C++ development on Raspberry Pi microcontrollers*. Online. www.raspberrypi.com, 2022 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/raspberry-pi-pico-c-sdk.pdf>
- [23] ANALOG DEVICES. *DS3231.pdf*. Online. www.analog.com, 2015 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf>
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. *PCA9546A Low Voltage 4-Channel I²C and SM-Bus Switch with Reset Function*. Online. www.ti.com, 2005 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pca9546a.pdf>
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. *TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I²C Switch with Reset* Online. www.ti.com, 2005 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>
- [26] STMICROELECTRONICS. *Datasheet - M24M02-DR M24M02-R - 2-Mbit serial I²C bus EEPROM*. Online. www.st.com, 2010 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m24m02-dr.pdf>

- [27] TEXAS INSTRUMENTS. *PCF8574A Remote 8-Bit I/O Expander for I²C Bus*. Online. www.ti.com, 2001 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574a.pdf>
- [28] TE CONNECTIVITY. *PMS5607-02BA03 Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap*. Online. www.te.com, 2020 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5607-02BA03%7FB2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5607-02BA03_B2.pdf%7FCAT-BLPS0035
- [29] INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY. *HYT 271/939/221 - Digital modules for low humidity and temperature*. Online. www.ist-ag.com, 2022 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: https://www.ist-ag.com/sites/default/files/downloads/DHHYT-LowHumidityModules_E.pdf
- [30] ANALOG DEVICES. *ADG821/ADG822/ADG823 (Rev. A)*. Online. www.ad.com, 2002 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG821_822_823.pdf
- [31] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS6293x 3.8-V to 30-V, 2-A, 3-A Synchronous Buck Converters in a SOT583 Package datasheet (Rev. D)*. Online. www.ti.com, 2021 [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62933.pdf>
- [32] STMICROELECTRONICS. *Datasheet - SM6TxxA, SM6TxxCA - 600 W TVS in SMB*. Online. www.st.com, 2001 [cit. 2024-12-21]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/sm6t100a.pdf>
- [33] NEXPERIA. *BZV55 series Voltage regulator diodes*. Online. www.nexperia.com, 1996 [cit. 2024-12-21]. Dostupné z: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/BZV55_SER.pdf
- [34] *Pico GFX Pack*. Online. In: PIMORONI - THE ULTIMATE MAKER STORE. Pico GFX Pack. [2022]. Dostupné z: <https://shop.pimoroni.com/products/pico-gfx-pack>. [cit. 2024-12-25].
- [35] *How To Program A Microcontroller: An Application Note*. Online. In: COLLEGE OF ENGINEERING | MICHIGAN STATE UNIVERSITY. How To Program A Microcontroller. [2015]. Dostupné z: https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/spring15/group13/assets/app_note_john_foxworth.docx.pdf. [cit. 2024-12-25].

- [36] GONZÁLES, Antonio. *pico-ds3231*. [Source code] In: Pico-ds3231. [2023]. Dostupné z: <https://github.com/antgon/pico-ds3231>. [cit. 2024-12-25].
- [37] NXP. *I2C-bus specification and user manual*. Online. www.nxp.com, 1982 [cit. 2024-12-30]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [38] COMET SYSTEM, S.R.O. *Sonda řady CO2G-xx pro měření koncentrace CO2 ve vzduchu*. Online. Sonda řady CO2G-xx pro měření koncentrace CO2 ve vzduchu. 2023. Dostupné z: https://www.cometsystem.cz/userfiles/dokumenty_menu/53/i-snd-co2g-03.pdf. [cit. 2024-12-31].
- [39] COMET SYSTEM, S.R.O. *Comet Database: Databázový systém pro COMET zařízení*. Online. Comet Database. 2021. Dostupné z: https://www.cometsystem.cz/userfiles/dokumenty_menu/70/cometdatabase_manual_cz.pdf. [cit. 2024-12-31].
- [40] COMET SYSTEM, S.R.O. *Technical specifications of COMET Cloud service*. Online. Technical specifications of COMET Cloud service. 2023. Dostupné z: https://cometsystem.cloud/assets/documents/en/comet_cloud_service-v2.pdf. [cit. 2024-12-31].
- [41] E+E ELEKTRONIK. *User Manual EE895: Miniature Sensor Module for CO2, Temperature and Barometric Pressure*. Online. User Manual EE895. 2023. Dostupné z: https://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee895/BA_EE895.pdf. [cit. 2025-05-27].
- [42] FIGARO. *TENTATIVE TECHNICAL INFORMATION FOR CDM7162*. Online. CDM7162-C00 FIGARO CO2 MODUL | Unitronic GmbH. 2023. Dostupné z: https://www.unitronic.de/wp-content/uploads/2025/05/29868_DB_CDM7162C00.pdf. [cit. 2025-05-27].
- [43] SENSEAIR. *Senseair Sunrise: Product Specification*. Online. Sunrise | Air quality & Gas sensing technology from Senseair. 2024. Dostupné z: <https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/Dev/publicerat/PSP12440.pdf>. [cit. 2025-05-27].
- [44] SENSEAIR. *Senseair Sunlight CO2: Product Specification*. Online. Sunlight CO2 | Air quality & Gas sensing technology from Senseair. 2025. Dostupné z: <https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/Dev/publicerat/PSP12930.pdf>. [cit. 2025-05-27].

- [45] SENSIRION. *Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module: CO₂, humidity, and temperature sensor*. Online. SCD30 CO₂ and RHT Sensor Datasheet. 2020. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf. [cit. 2025-05-27].
- [46] SENSIRION. *SCD4x Data Sheet*. Online. SCD4x Data Sheet. 2025. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/67FE0194/CD_DS_SCD4x_Datasheet_D1.pdf. [cit. 2025-05-27].
- [47] GAS SENSING SOLUTIONS. *CozIR®-LP Series: Ultra Low Power CO₂ Sensor*. Online. COZIR-LP-2-Series-Datasheet-Ver-4.0. 2023. Dostupné z: <https://www.gassensing.co.uk/wp-content/uploads/2023/12/COZIR-LP-2-Series-Datasheet-Ver-4.0.pdf>. [cit. 2025-05-27].
- [48] CUBIC SENSOR AND INSTRUMENT. *Dual Beam NDIR CO₂ Sensor Module CM1107N Specification*. Online. Dual Beam NDIR CO₂ Sensor Module CM1107N Specification. 2023. Dostupné z: https://en.gassensor.com.cn/Product_files/Specifications/CM1107N%20Dual%20Beam%20NDIR%20CO2%20Sensor%20Module%20Specification.pdf. [cit. 2025-05-27].
- [49] SENSEAIR. *Sunrise Guideline*. Online. Sunrise Guideline. 2023. Dostupné z: <https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/Market/publicerat/TDE7318.pdf>. [cit. 2025-05-28].
- [50] VAISALA. *Vaisala: How to Measure Carbon Dioxide*. Online. Vaisala. 2019. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-How-to-measure-CO2-Application-Note-B211228EN.pdf>. [cit. 2025-05-28].
- [51] GAS SENSING SOLUTIONS. *AN001: Pressure Compensating of a CO₂ Sensor*. Online. AN001 Pressure Compensating of a CO₂ Sensor. 2021. Dostupné z: <https://sstensing.com/wp-content/uploads/2021/05/AN001-Pressure-Compensating-of-a-CO2-Sensor.pdf>. [cit. 2025-05-28].

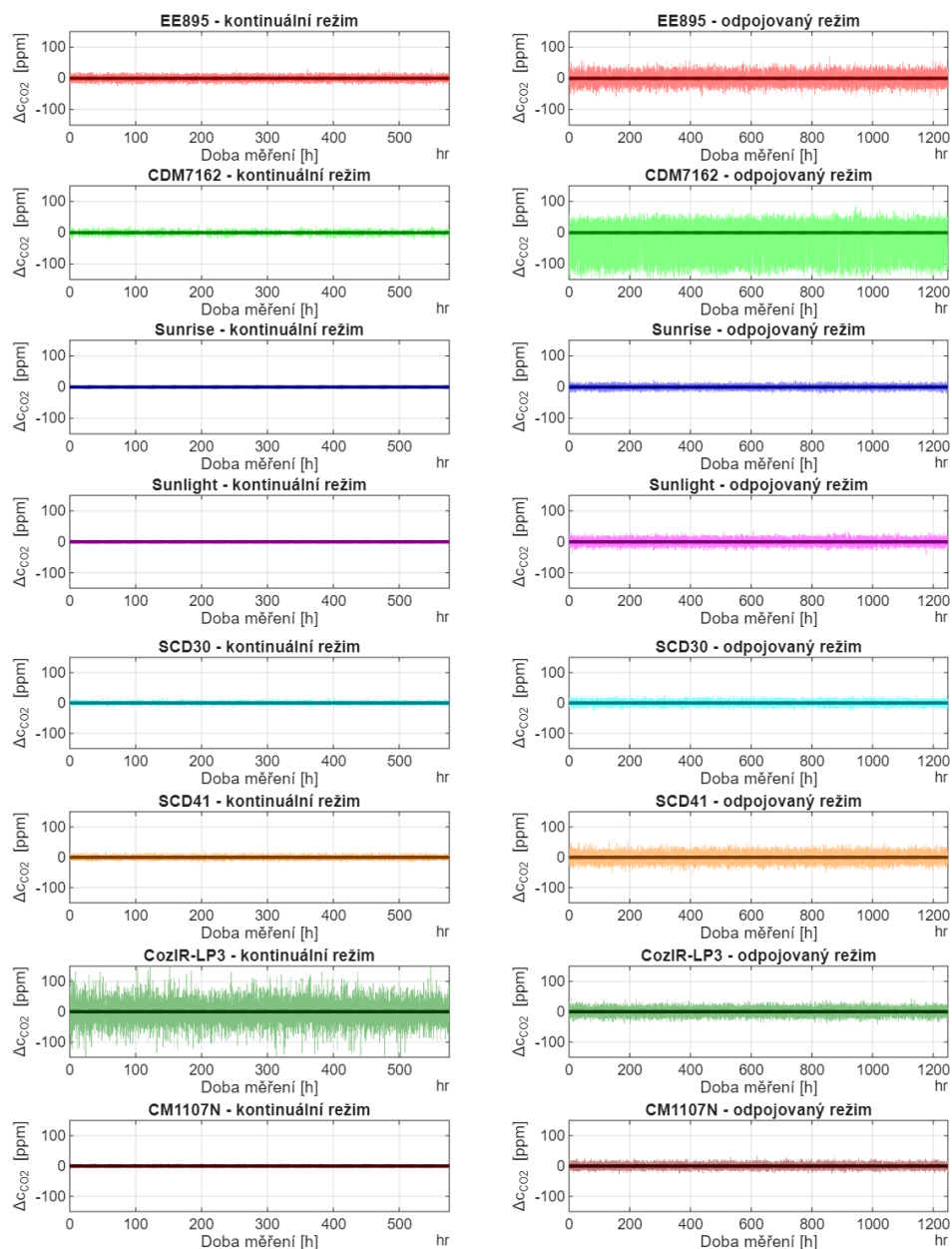
Seznam symbolů a zkratek

COVID-19	Světová pandemie koronaviru SARS-CoV-2 v roce 2019 – Coronavirus Disease 2019
DC	Stejnosměrný proud – Direct Current
DPS	Deska plošných spojů – Printed Circuit Board
EEPROM	Typ paměťového média – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
FW	Firmware – Firmware
GPIO	Vstupní/výstupní pin pro obecné použití – General-Purpose Input/Output
I²C	Dvoudrátová sériová komunikační sběrnice [37] – Inter-Integrated Circuit
IP	Protokol síťové vrstvy – Internet Protocol
IR	Infračervený – Infrared
ILED	Infračervená dioda – Infrared Emitting Diode
LCD	Displej z tekutých krystalů – Liquid Crystal Display
MCU	Mikrokontrolerová jednotka – Microcontroller Unit
MEMS	Mikroelektromechanické systémy – Micro-Electro-Mechanical Systems
MUX	Multiplexor – Multiplexer
MV	Měřená hodnota – Measured Value
NDIR	Nedisperzní infračervená analýza – Non-Dispersive Infrared
PAS	Fotoakustická spektroskopie – Photo-Acoustic Spectroscopy
PIN dioda	Dioda s rozšířenou depleční oblastí – Positive-Intrinsic-Negative Diode
RAM	Paměť s náhodným přístupem pro čtení i zápis – Random Access Memory
RTC	Hodiny reálného času – Real-Time Clock

SDK	Sada vývojových nástrojů – Software Development Kit
SOAP	Protokol pro výměnu zpráv přes síť – Simple Object Access Protocol
SPI	Sériové periferní rozhraní – Serial Peripheral Interface
TCP	Protokol transportní vrstvy zajišťující spolehlivý přenos dat – Transmission Control Protocol
TDLAS	Laditelná laserová absorpční spektroskopie – Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
UART	Univerzální asynchronní přijímač a vysílač – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Univerzální sériová sběrnice – Universal Serial Bus
UV	Ultrafialový – Ultraviolet
VOC	Těkavé organické látky – Volatile Organic Compounds

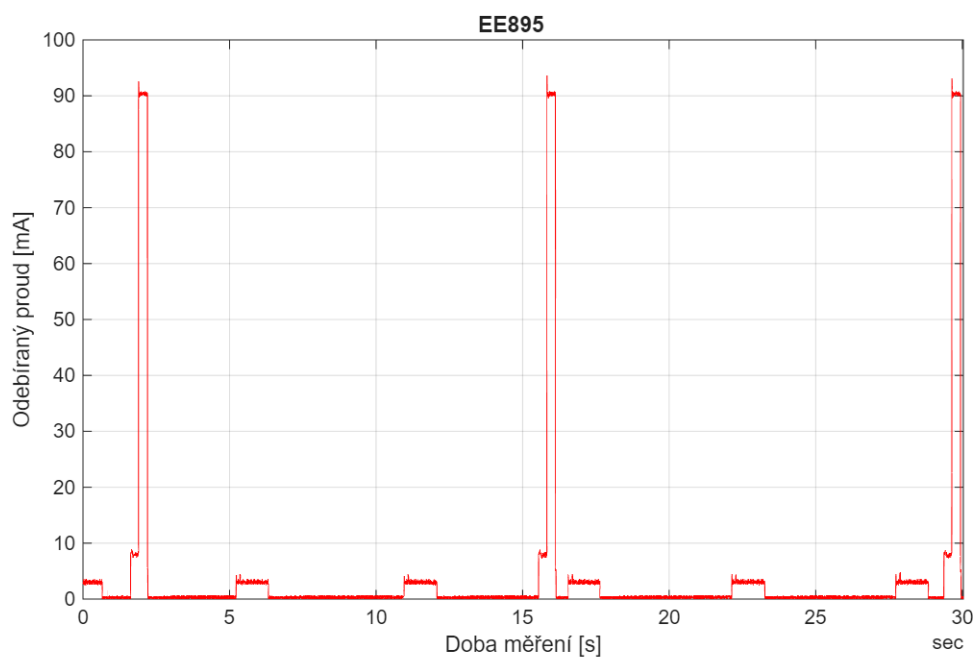
A Grafické průběhy vybraných měření

A.1 Grafické průběhy krátkodobé stability senzorů

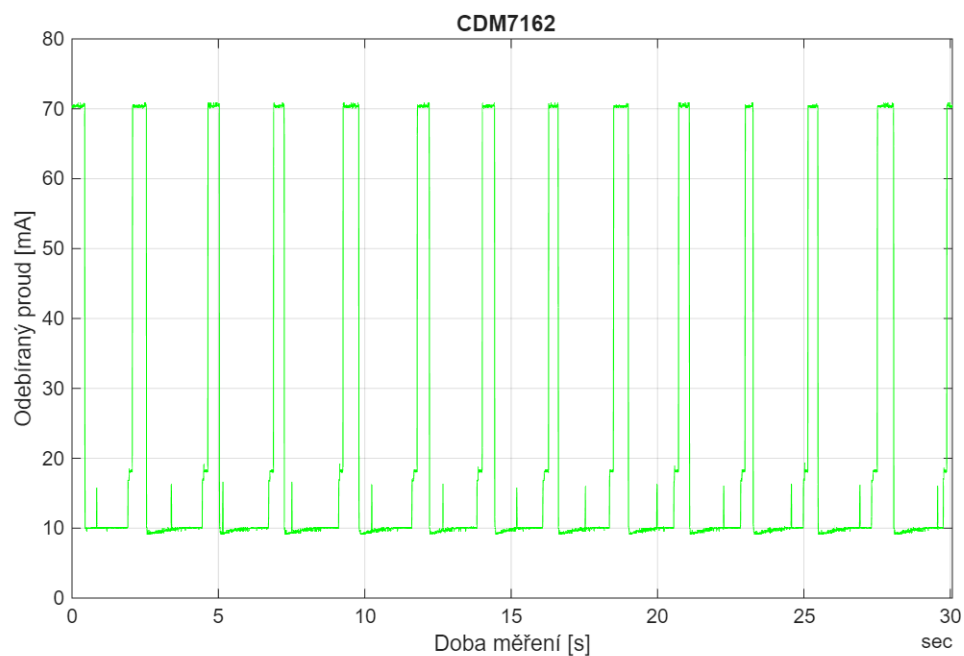


Obr. A.1: Graf časového průběhu odchylky naměřené hodnoty od klouzavého průměru pro vybrané senzory – kontinuální režim napájení (vlevo), odpojovaný režim napájení (vpravo)

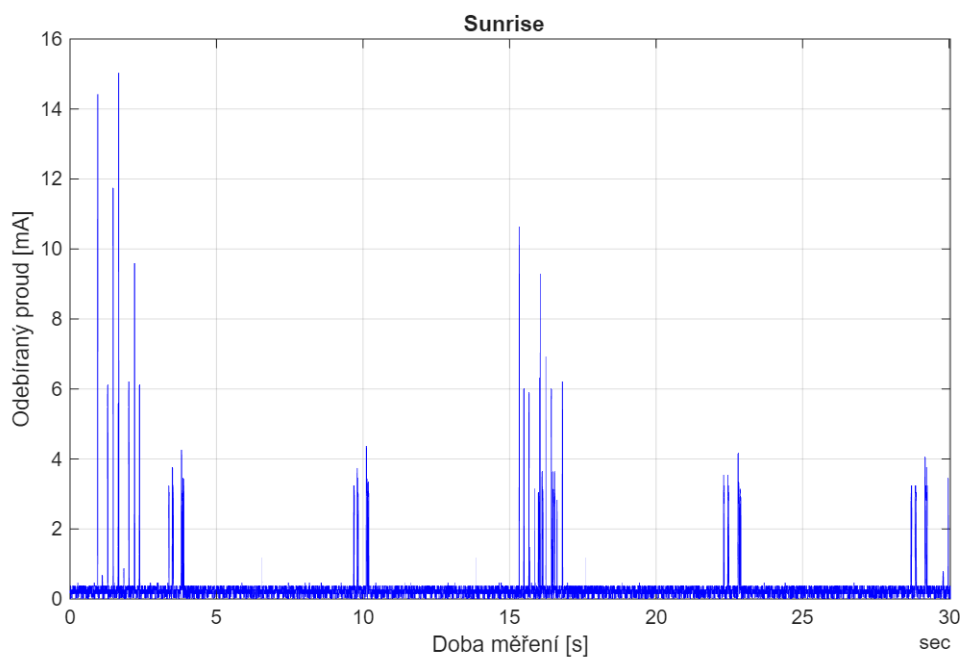
A.2 Grafické průběhy proudového odběru senzorů



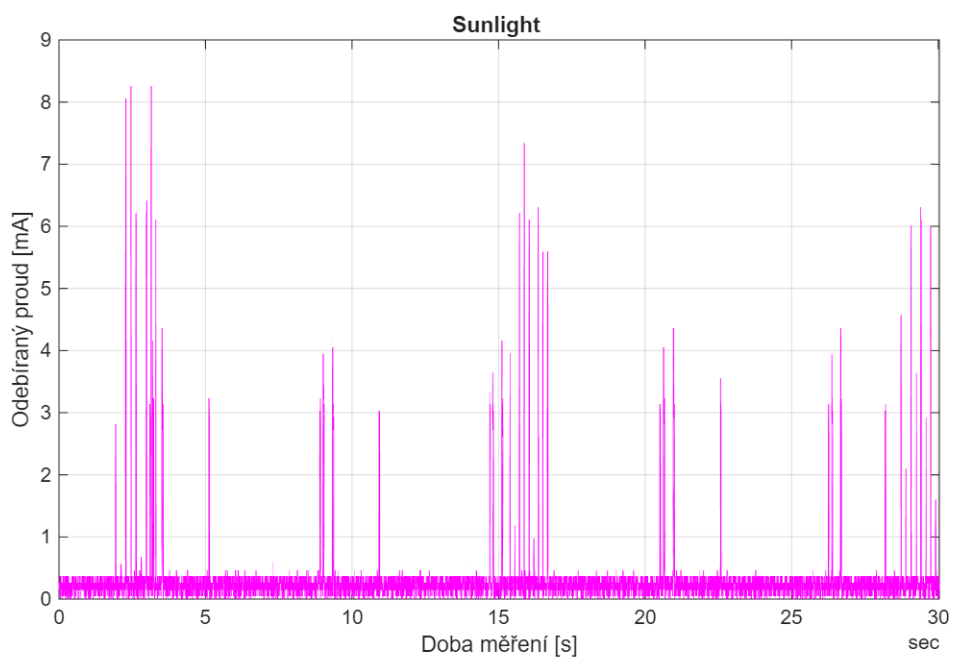
Obr. A.2: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru EE895



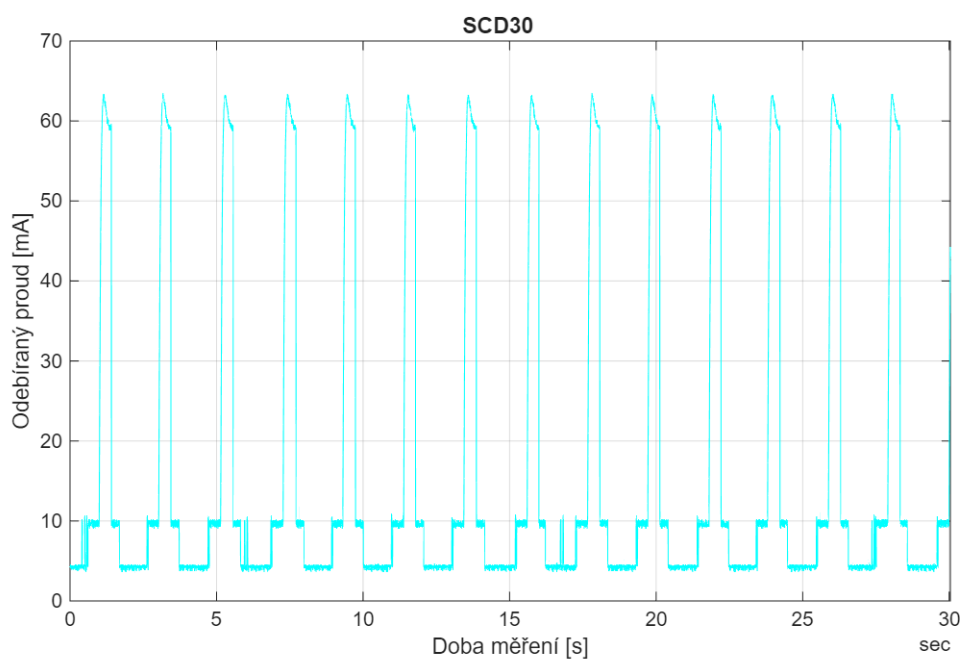
Obr. A.3: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CDM7162



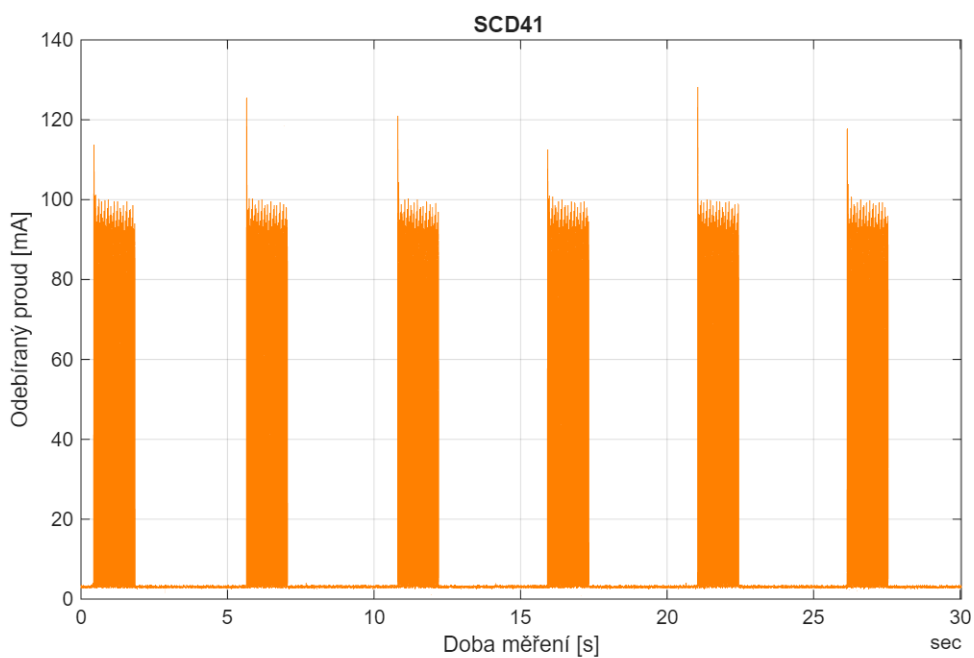
Obr. A.4: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru Sunrise



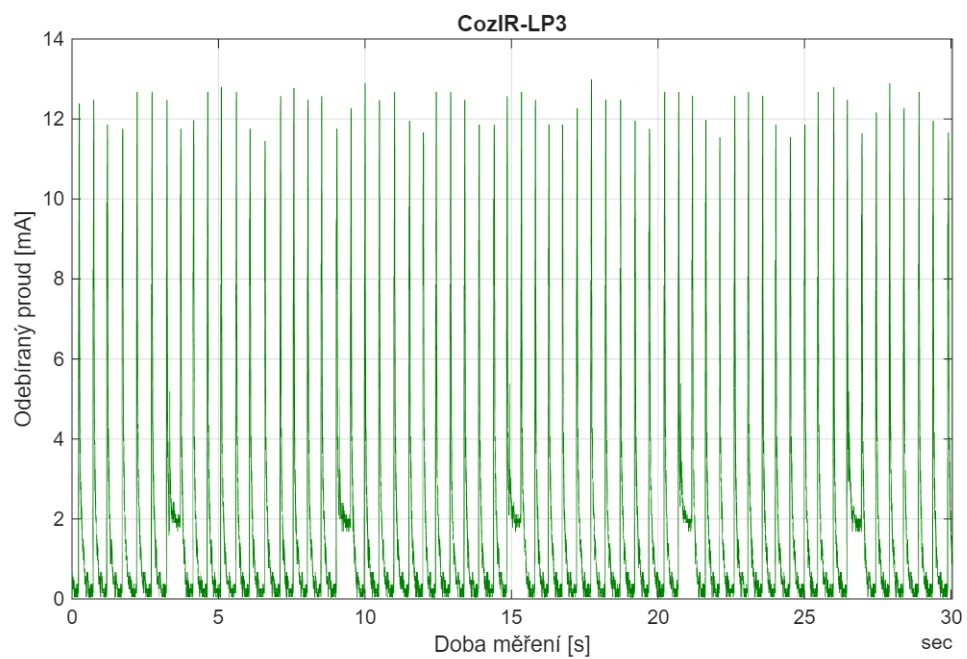
Obr. A.5: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru Sunlight



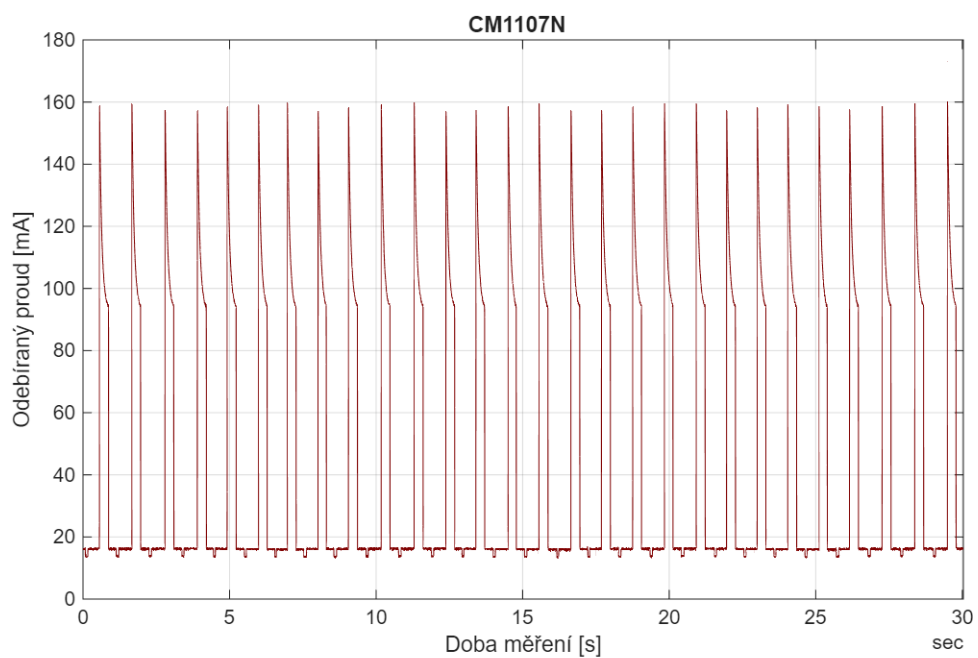
Obr. A.6: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru SCD30



Obr. A.7: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru SCD41



Obr. A.8: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CozIR-LP3



Obr. A.9: Průběh odebíraného elektrického proudu senzoru CM1107N

B Obsah elektronické přílohy

/	.....	kořenový adresář přiloženého archivu
├	C02 Tester FW	..... firmware testovacího zařízení
│	├ doc.zip	..... dokumentace zdrojového kódu
│	└ src.zip	..... zdrojový kód firmware
├	C02 Tester HW	..... podklady pro DPS testovacího zařízení
│	├ EAGLE.zip	..... podklady testovacího zařízení pro program EAGLE 6.6.0
│	├ parts.txt	..... seznam součástek pro testovací zařízení
│	├ testerC02 BOT motiv.pdf	... motiv DPS testovacího zařízení, spodní strana, zrcadlově otočené
│	├ testerC02 BOT.pdf	osazení DPS testovacího zařízení, spodní strana, zrcadlově otočené
│	├ testerC02 schema.pdf	..... schéma testovacího zařízení
│	├ testerC02 TOP motiv.pdf	... motiv DPS testovacího zařízení, vrchní strana
│	└ testerC02 TOP.pdf	..... osazení DPS testovacího zařízení, vrchní strana
└	Konfigurace senzorů.xlsx	..... Konfigurace senzorů během měření