

Bakalárska práca



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Monitorovacia jednotka prostredia s Wi-Fi rozhraním

Milan Zongor

Vedúci: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
Študijný program: Kybernetika a robotika
Máj 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zongor** Jméno: **Milan** Osobní číslo: **465883**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Monitorovací jednotka prostředí s Wi-Fi rozhraním

Název bakalářské práce anglicky:

Environment Monitoring Unit with Wi-Fi Interface

Pokyny pro vypracování:

- Na platformě ESP32 navrhnete, realizujete a otestujete modul pro monitorování těchto parametrů: interní a externí teplota, vlhkost, úroveň CO₂, atmosferický tlak, kvalita atmosféry.
- Data budou prezentována na nízkopříkonovém grafickém displeji a pomocí web stránky (WiFi AP).
- Integrujte senzor pohybu, který bude aktivovat podsvětlení displeje jen v přítomnosti uživatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Heath, Steve: Embedded Systems Design, Newnes 2003
- [2] Fraden, Jacob: Handbook of Modern Sensors, Springer 2004
- [3] Montrose, Mark I.: EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple, IEEE 1999
- [4] Záhlava, Vít: Návrh a konstrukce DPS, Ben 2010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:
do konce letního semestru 2019/2020

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Podakovanie

V prvom rade by som sa rád poďakoval vedúcemu svojej bakalárskej práce Ing. Vojtěchovi Petruchovi, Ph.D. za vedenie, odbornú pomoc ale hlavne obrovskú podporu pri tvorbe bakalárskej práce.

Zároveň by som sa chcel poďakovať svojej rodine a kamarátom za dôveru a podporu počas celého štúdia.

Prehlásenie

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

V Prahe, 24. mája 2019

Abstrakt

Cieľom tejto práce bolo navrhnutie a realizácia vstavanej platformy na monitorovanie kvality vnútorného prostredia. Zariadenie dokáže merať vnútornú a vonkajšiu teplotu, relatívnu vlhkosť, atmosferický tlak, koncentráciu oxidu uhličitého a horľavých plynov. Jeho výstup je možné sledovať na grafickom displeji alebo pomocou web rozhrania (Wi-Fi Access Point).

V tejto práci je možné nájsť prehľad súčasných konkurenčných výrobkov a ich porovnanie s našou meracou jednotkou. Ďalej je tu uvedený hardwarový a softwarový návrh doplnený o testovacie meranie a jeho analýzu.

Kľúčové slová: kvalita vnútorného ovzdušia, CO_2 , ESP32

Vedúci: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
Praha, Technická 2, B3-73

Abstract

Aim of this thesis was to design and realize embedded platform for monitoring indoor environment. The device can measure indoor and outdoor temperature, relative humidity, atmospheric pressure, concentration of carbon dioxide and other flammable gasses. Its output can be viewed on a graphic display or via web interface (Wi-Fi Access Point).

In this thesis you can find an overview of current competing products and their comparison with our measuring unit. Furthermore, a hardware and software design is added here along with the testing measurement and its analysis.

Keywords: indoor air quality, CO_2 , ESP32

Title translation: Environment Monitoring Unit with Wi-Fi Interface

Obsah

1 Úvod	1	4 Návrh plošného spoja	23
1.1 Motivácia	1	4.1 Vrchná vrstva	24
2 Analýza dostupných nástrojov a monitorovacích systémov	3	4.2 Spodná vrstva	25
2.1 BigClown CO ₂ monitor kit	3	5 Firmware monitorovacej jednotky	27
2.2 MCO HOME CO ₂ monitor MH9	4	5.1 Framework	27
2.3 Protronix školské čidlo NLII-CO2-R-5-A	4	5.2 Kompilátor	27
2.4 Porovnanie	5	5.3 Textový editor	27
3 Konceptia systému	7	5.4 Knižnice	28
3.1 Mikrokontrolér ESP32-WROOM-32U	8	5.5 Pred spustením programu	29
3.2 Zdroj napájania	9	5.6 Štruktúra hlavného programu	29
3.2.1 Spínaný regulátor	9	5.7 Web stránka	31
3.2.2 Lineárny regulátor	10	6 Overenie funkčnosti zariadenia	33
3.2.3 Napätové výstupy a ich využitie	10	6.1 Zber dát	33
3.3 Grafický displej RX240128A-FHW	10	6.2 Zobrazenie dát	34
3.3.1 Komunikácia s displejom	11	7 Záver	37
3.4 Senzor teploty a vlhkosti Chip Cap 2-sip	12	A Zoznam skratiek a symbolov	39
3.4.1 Čítanie dát zo senzoru	13	B Obrázky	41
3.4.2 Výpočet hodnôt	13	C Literatúra	43
3.5 Senzor tlaku MPL115A2	14		
3.5.1 Komunikácia so senzorom	14		
3.5.2 Výpočet hodnôt	15		
3.6 Senzor kvality vzduchu MiCS-6814	16		
3.6.1 Kalibrácia senzoru	17		
3.7 Senzor vonkajšej teploty	18		
3.7.1 Odporový teplotný senzor PT100	18		
3.7.2 Konvertor odporu na digitál MAX31865	18		
3.8 Senzor oxidu uhličitého Sensirion SCD30	20		
3.8.1 NDIR technológia detekcie plynov	20		
3.8.2 Komunikácia so senzorom	21		
3.9 Senzor pohybu Ks0052	22		
3.9.1 PIR technológia na detekciu pohybu	22		
3.10 Schéma zapojenia	22		

Obrázky

2.1 CO_2 monitor kit od firmy BigClown [2]	3	5.1 Vývoj aplikácie pre ESP32 [6] ..	28
2.2 CO_2 monitor MH9 od firmy MCO HOME [13]	4	5.2 Diagram pre spustenie zariadenia	29
2.3 Školské čidlo NLII-CO2-R-5-A od firmy Protronix [19]	4	5.3 Štruktúra hlavného programu ..	30
3.1 Principiálna schéma monitorovacej jednotky	7	5.4 Vzhľad webového rozhrania monitorovacej jednotky na mobilnom zariadení	32
3.2 Porovnanie parametrov ESP266 a ESP32 [3]	8	6.1 Výsledný vizuál monitorovacej jednotky prostredia s Wi-Fi rozhraním	33
3.3 Schematické zapojenie ESP32-WROOM-32U	9	6.2 Graf závislosti koncentrácie oxidu uhličitého v miestnosti na čase ...	35
3.4 Schematické zapojenie zdroja napájania	9	6.3 Graf závislosti relatívnej vlhkosti v miestnosti na čase	35
3.5 Schéma zapojenia displeja	11	6.4 Graf závislosti teploty v miestnosti na čase	35
3.6 Vzhľad a presnosť senzoru Chip Cap 2-sip	12	B.1 Vrchná vrstva PCB	41
3.7 Štartovací a merací cyklus senzora Chip Cap 2-sip [25]	13	B.2 Spodná vrstva PCB	41
3.8 Zloženie meracieho paketu senzora Chip Cap 2-sip [25]	13	B.3 Celková schéma zapojenia monitorovacej jednotky prostredia	42
3.9 Blokový diagram senzoru MPL115A2 [16]	14		
3.10 Vzhľad a schéma meracieho cyklu senzoru MPL115A2	15		
3.11 Schéma zapojenia MiCS-6814 .	16		
3.12 Graf závislosti odporu na koncentrácií plynov pre CO senzor [24]	17		
3.13 Aparatúra na presné meranie koncentrácie plynu vo vzduchu ...	17		
3.14 Schéma zapojenia MAX31865 .	18		
3.15 Priebeh komunikácie MAX31865 v 4-drátovom SPI zapojení [12] ...	19		
3.16 Vzhľad senzoru SCD30 [21] (upravené)	20		
3.17 Princíp detekcie CO_2 pomocou NDIR metódy [9]	21		
4.1 Fotografia plošného spoja s osadenými komponentami	23		
4.2 Blokový diagram rozloženia PCB modulov	24		
4.3 Vizualizácia vrchnej vrstvy PCB	25		
4.4 Vizualizácia spodnej vrstvy PCB	25		

Tabuľky

2.1 Tabuľka porovnania nášeho zariadenia so zariadeniami dostupnými na trhu	5
3.1 Energetické hodnoty displeja RX240128A-FHW [20].....	10
3.2 Plyn detekovateľný senzorom MiCS-6814 [24]	16
3.3 Nastavenie konfiguračného registra MAX31865 [12]	19

Kapitola 1

Úvod

Technológie boli v počiatkoch určené výhradne pre priemyselné použitie. Postupne však začali zjednodušovať prácu jednotlivcom, stali sa súčasťou našich osobných vecí a dnes začínajú uľahčovať a prinášať väčší komfort aj v našich domácnostiach.

Inteligentné budovy či domácnosti sa stávajú viac rozšírenými a okrem kvalitných služieb nám čoraz častejšie poskytujú aj veľkú energetickú úsporu. Samotná smernica Európskeho parlamentu nás zaväzuje, aby všetky novopostavené budovy od roku 2020 mali takmer nulovú spotrebu energie [7].

Nízka spotreba energie však veľakrát spôsobí nepriedušnosť budov, a preto je potrebné dbať na kvalitu vzduchu nachádzajúceho sa vo vnútornom prostredí. Prieskum vytvorený v USA ukázal, že bežný človek strávi až 87% času počas dňa vnútri [11]. Ak sa teda nachádzame väčšinu dňa v nekvalitnom prostredí, môže to na nás mať nežiadúce účinky ako zníženie sústredenosti, či vyššiu mieru únavy a v extrémnych prípadoch až následky na zdraví.

Cieľom tejto bakalárskej práce je vytvoriť platformu na detekciu fyzikálnych veličín vnútorného prostredia. Monitorované veličiny sú vnútorná a vonkajšia teplota, relatívna vlhkosť, atmosferický tlak a zastúpenie plynov CO_2 , CO , NH_3 , NO_2 vo vnútornej atmosfére.

Na túto aplikáciu navrhne plošný spoj s procesorom a Wi-Fi modulom *ESP32-WROOM-32U*. Na plošnom spoji budú osadené meracie senzory, zdroj napájania a displej. Zariadenie bude schopné merať požadované hodnoty z okolitého prostredia, vykresľovať ich na displeji a takisto ich zobrazovať na stránke načítanej po pripojení na vlastný Wi-Fi Access Point.

1.1 Motivácia

Monitorovacia jednotka prostredia s Wi-Fi rozhraním bude slúžiť na monitorovanie vnútornej kvality vzduchu v laboratóriu senzorov a magnetických meraní MAGLAB na Fakulte elektrotechnickej, ČVUT v Prahe. Takisto bude využitá ako učebná pomôcka pri predmete B3B38SME - Senzory a měření. Je možné na nej demonštrovať funkciu viacerých senzorov, vysvetliť rozdiely merania tých istých veličín rôznymi spôsobmi, ukázať chyby vznikajúce pri

meraní a vysvetliť ako im predchádzať.

Túto tému bakalárskej práce som si vybral, pretože sa na nej môžem naučiť a vyskúšať si viacero oblastí. Počínajúc rozborom potrebných hardwarových komponentov a prieskumom ich dostupnosti na trhu. Pokračujúc schémou zapojenia, návrhu plošného spoja a osadenia komponentov. Následne sa v implementačnej časti zoznámim s prostredím rozvíjajúcej sa low-cost platformy Espressif IoT Development Framework (ďalej ESP-IDF). Takisto si počas implementácie budem môcť vyskúšať čítanie informácií pomocou viacerých zberníc ako aj možnosť komunikácie pomocou Wi-Fi rozhrania. Všetky tieto časti sú využívané v oblasti Internetu vecí, kam by som sa chcel do budúcnosti kariérne smerovať.

Kapitola 2

Analýza dostupných nástrojov a monitorovacích systémov

Monitorovacích jednotiek a senzorov, ktoré merajú kvalitu vnútorného prostredia, je mnoho. Líšia sa komunikačným rozhraním, meranými veličinami, ich meracím rozsahom, ale samozrejme aj cenovou dostupnosťou.

V tejto kapitole porovnáme tri produkty dostupné na českom trhu podobné našej monitorovacej jednotke.

2.1 BigClown CO₂ monitor kit

BigClown je inteligentná IoT stavebnica vyvinutá firmou Hardwario v Liberci v Českej republike. Vďaka tejto stavebnici si sami dokážete vyskladať napríklad nástroj na meranie kvality ovzdušia doma, v kancelárii alebo v škole. Jeden z ponúkaných modulov je CO₂ monitor kit, ktorý okrem množstva CO₂ vie merať aj vnútornú teplotu, atmosferický tlak a relatívnu vlhkosť. Kit dokáže byť napájaný zo 4 štandardných alkalických AAA batérií až po dobu 1 roku. Po dokúpení rádiového modulu je s kitom možné komunikovať pomocou dvoch rádiových frekvencií nachádzajúcich sa vo voľnom rádiovom pásme a to 868 MHz alebo 915 MHz. Oficiálna cena kitu sa ku dňu 4.5.2019 drží na 4089CZK [2].



Obrázok 2.1: CO₂ monitor kit od firmy BigClown [2]

2.2 MCO HOME CO₂ monitor MH9

CO₂ monitor MH9 je detektor kvality vzduchu od čínskej značky MCO HOME. Zariadenie monitoruje množstvo CO₂, vnútornú teplotu a relatívnu vlhkosť okolitého vzduchu. Dokáže ovládať klimatizáciu pomocou vstavaných výstupov a komunikovať s ďalšími certifikovanými zariadeniami Z-wave. Napájané je zo sieťového adaptéru 12 VDC [13]. Jeho cena sa na českom trhu ku dňu 4.5.2019 pohybuje okolo 5000CZK.



Obrázok 2.2: CO₂ monitor MH9 od firmy MCO HOME [13]

2.3 Protronix školské čidlo NLII-CO2-R-5-A

Od českej firmy Protronix vyrábajúcej v Chrudime si môžeme kúpiť viacero produktov merných kvalitu vnútorného vzduchu a riadenia výkonu ventilačných zariadení. Jedným z nich je školské čidlo NLII-CO2-R-5-A. Okrem ovládania ventilácie obsahuje indikačnú LED pre zobrazenie kvality vzduchu a integruje aj alarm na upozornenie pri prekročení koncentrácie CO₂ v miestnosti [19]. Čidlo je ku dňu 4.5.2019 dostupné vo viacerých konfiguráciách s cenou od 5000 do 10 000CZK.



Obrázok 2.3: Školské čidlo NLII-CO2-R-5-A od firmy Protronix [19]

2.4 Porovnanie

V tabuľke 2.1 môžeme vidieť jednoduché porovnanie vlastností nášho zariadenia so podobnými zariadeniami dostupnými na trhu. Je možné si všimnúť, že sa pohybuje v podobnej cenovej kategórii ako ostatné produkty, ale v porovnaní s týmito 3 produktami toho poskytuje viac. Výhodou je kombinácia grafického displeja s bezdrôtovým rozhraním. Ak by sme sa bližšie pozreli na presnosti a rozsahy senzorov v jednotlivých zariadeniach, tak by taktiež naša platforma obsadila prvé miesto.

Kategória	Naše zar.	BigClown	MH9	NLII-R5A
displej	áno	nie	áno	nie
komunikácia	Wi-Fi AP	radio dongle	Z-wave	IQRF
CO_2 [ppm]	400–10000	0–10000	0–2000	0–5000
vnútorná teplota [$^{\circ}C$]	-40–125	-40–125	-9–50	0–40
vonkajšia teplota	-40–80	–	–	–
relatívna vlhkosť [%]	0–100	0–100	0–99	0–100
atm. tlak [kPa]	50–115	20–110	–	–
iné plyny	áno	nie	nie	nie
cena [CZK]	~ 3500	~ 4000	~ 5000	~ 5000

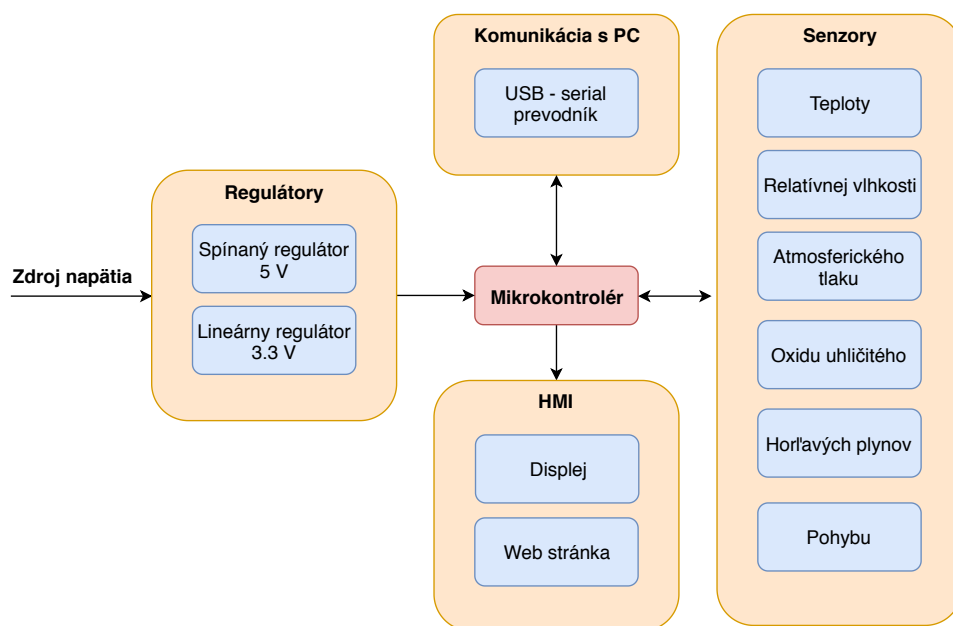
Tabuľka 2.1: Tabuľka porovnania nášho zariadenia so zariadeniami dostupnými na trhu

Niekoľko zariadení na monitoring a vyhodnocovanie kvality vnútorného prostredia bolo vytvorených aj v rámci ČVUT. Jedno z najrozpracovanejších a v praxi využitých je čidlo vyvinuté v Univerzitnom centre energeticky efektívnych budov ČVUT. Zariadenie dokáže merať teplotu, relatívnu vlhkosť, oxid uhličitý, prchavé organické látky a prach. Obsahuje širokú škálu bezdrôtového komunikačného rozhrania doplnenú o okamžitú indikáciu stavu pomocou LED diódy [28].

Kapitola 3

Koncepcia systému

Na začiatku tejto kapitoly popíšeme blokovú štruktúru monitorovacej jednotky. Neskôr budú opísané jednotlivé hardwarové komponenty použité v našej platforme.



Obrázok 3.1: Principiálna schéma monitorovacej jednotky

Schéma sa skladá z 5-tich základných častí. Obsahuje skupinu použitých senzorov, zdroj napájania, komunikáciu s počítačom pomocou prevodníka USB - serial a zobrazovacie rozhranie pomocou web stránky alebo displeja. Jadrom celého projektu je procesorová jednotka ESP32-WROOM-32U.

Na návrh elektrického zapojenia a dizajn plošného spoja sme použili open source EDA software zvaný KiCad. V nasledujúcich podkapitolách rozoberieme jednotlivé časti našej platformy.

3.1 Mikrokontrolér ESP32-WROOM-32U

Jeden z najdôležitejších logických blokov nášho projektu, s ktorým sú prepojené všetky ostatné bloky, je mikrokontrolér. V našom zadaní sme sa rozhodli použiť cenovo dostupný a nízko-odberový vývojový kit ESP-WROOM-32 od firmy Espressif. ESP-WROOM-32 je doska navrhnutá pre užívateľov, ktorí si chcú vyskúšať nové koncepty a postaviť prototypy s dvojjadrovým mikroprocesorom Xtensa® 32-bit LX6.

Oproti svojej predchádzajúcej verzii ESP8266 má viacero vylepšení. Procesor obsahuje dve výpočetné jadrá, SRAM pamäť má veľkosť 512kB a taktiež obsahuje Bluetooth vo verzii 4.2 s podporou BLE. GPIO portov má 36 a taktiež boli rozšírené počty pinov s podporou zberníc I2C, SPI a UART [5].

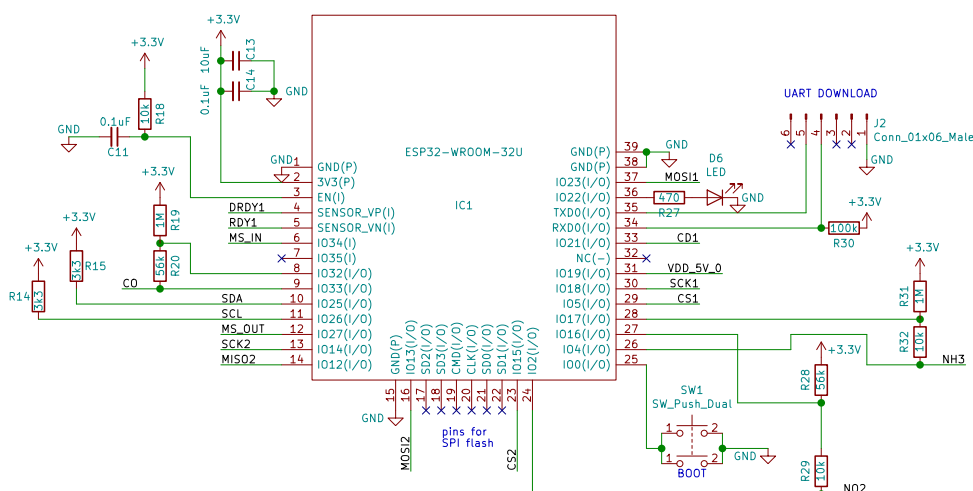
Specifications	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa® Single-Core 32-bit L106	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 600 DMIPS
802.11 b/g/n Wi-Fi	Yes, HT20	Yes, HT40
Bluetooth	None	Bluetooth 4.2 and below
Typical Frequency	80 MHz	160 MHz
SRAM	160 kBytes	512 kBytes
Flash	SPI Flash , up to 16 MBytes	SPI Flash , up to 16 MBytes
GPIO	17	36
Hardware / Software PWM	None / 8 Channels	1 / 16 Channels
SPI / I2C / I2S / UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10-bit	12-bit
CAN	None	1
Ethernet MAC Interface	None	1
Touch Sensor	None	Yes
Temperature Sensor	None	Yes
Working Temperature	- 40°C ~ 125°C	- 40°C ~ 125°C

Obrázok 3.2: Porovnanie parametrov ESP266 a ESP32 [3]

Na obrázku 3.3 môžeme vidieť zapojenie nášho MCU. Najprv sme podľa katalógu [5] pridali blokovacie kondenzátory napájania, BOOT tlačítko, uzemnili potrebné piny a umiestnili kondenzátor a referenčný odpor na Enable pin. Aby sme mohli s procesorom komunikovať a nahrávať program, tak sme na piny RX a TX zapojili výstup jednotky TTL-232R, ktorá slúži ako prevodník medzi USB a sériovým rozhraním.

Obzvlášť pozornosť sme museli venovať pinom GPIO6 až GPIO11, pretože sú napojené na vnútornú flash pamäť a teda tieto piny nemožno využiť v našom projekte.

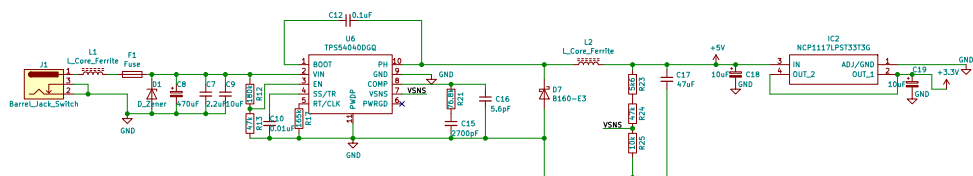
Z dôvodu indikácie prekročenia zdravej koncentrácie CO_2 a jednoduchšieho odlaďovania programu sme pridali LED diódu na GPIO22. Zvyšné voľné piny sme využili na pripojenie meracích senzorov a displeja na zobrazovanie nameraných hodnôt.



Obrázok 3.3: Schematické zapojenie ESP32-WROOM-32U

3.2 Zdroj napájania

Zdroj napájania je kľúčová časť, ktorá zabezpečuje, že všetky komponenty našej monitorovacej jednotky majú dostupné ich požadované napätie. Tento blok by sme mohli rozdeliť na dve časti. Jednou by bol spínaný a druhou lineárny regulátor, ktoré zabezpečujú vhodné vstupné napätie jednotlivých komponent. Napätie je do obvodu privedené pomocou 9 V sieťového adaptéra, ktorý je s obvodom spojený pomocou DC jack konektora.



Obrázok 3.4: Schematické zapojenie zdroja napájania

3.2.1 Spínaný regulátor

Základným prvkom tohto obvodu je step-down DC/DC konvertor TPS54040. Jeho vstupné napätie môže byť v intervale od 3.5 V do 42 V [27]. Avšak v našom prípade, kedy požadujeme výstupné napätie 5 V, môže byť rozsah vstupného napätia od 5.5 V do 35 V.

Náš obvod takisto poskytuje dostatok ochrany pred škodlivými prvkami z elektrickej siete. Na jeho začiatok sme pridali 0.5 A poistku, ktorá v prípade vyššieho vstupného prúdu z adaptéra rozpojí obvod, čím sa predíde zničeniu ostatných častí.

Taktiež sme pred TPS54040 umiestnili kondenzátory, ktoré zabezpečia ochranu pred špičkami a náhlymi zmenami vstupného napätia. Pri vytváraní schémy sme sa riadili podľa odporúčaného zapojenia z datasheetu [27].

Napätový výstup tohto DC/DC meniča je určený deličom napätia, konkrétne podľa vzorca 3.1. Za R_2 výrobca odporúča dať rezistor s odporom $10\text{ k}\Omega$ a hodnota V_{out} značí výstupné napätie.

$$R_1 = R_2 \cdot \left(\frac{V_{out} \cdot 0.8}{0.8} \right) \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Naše požadované výstupné napätie z meniča je 5 V a po dosadení do rovnice 3.1 dostaneme, že výsledná hodnota $R_1 = 52500\ \Omega$. Tú sme dosiahli sériovou kombináciou dvoch štandardne vyrábaných rezistorových hodnôt 47k a $5\text{k}6$.

3.2.2 Lineárny regulátor

Za 5 V výstupom spínaného regulátora nasleduje lineárny regulátor NCP1117LP. Jeho výhodou je, že nepotrebuje žiadne externé nastavenie výstupného napätia, keďže bol vyrobený na reguláciu na 3.3 V [18].

3.2.3 Napätové výstupy a ich využitie

- 3.3 V výstup lineárneho regulátora NCP1117LP je veľmi dôležitý, keďže poskytuje napätie hlavne pre digitálnu časť nášho obvodu. Toto napätie je potrebné pre ESP32-WROOM-32U, logickú časť displeja a väčšinu senzorov.
- 5 V výstup zo spínaného regulátora TPS54040 sa využíva v dvoch energeticky náročnejších častiach obvodu. Túto hodnotu napätia vyžaduje podsvietenie displeja a senzor plynov MiCS-6814.

3.3 Grafický displej RX240128A-FHW

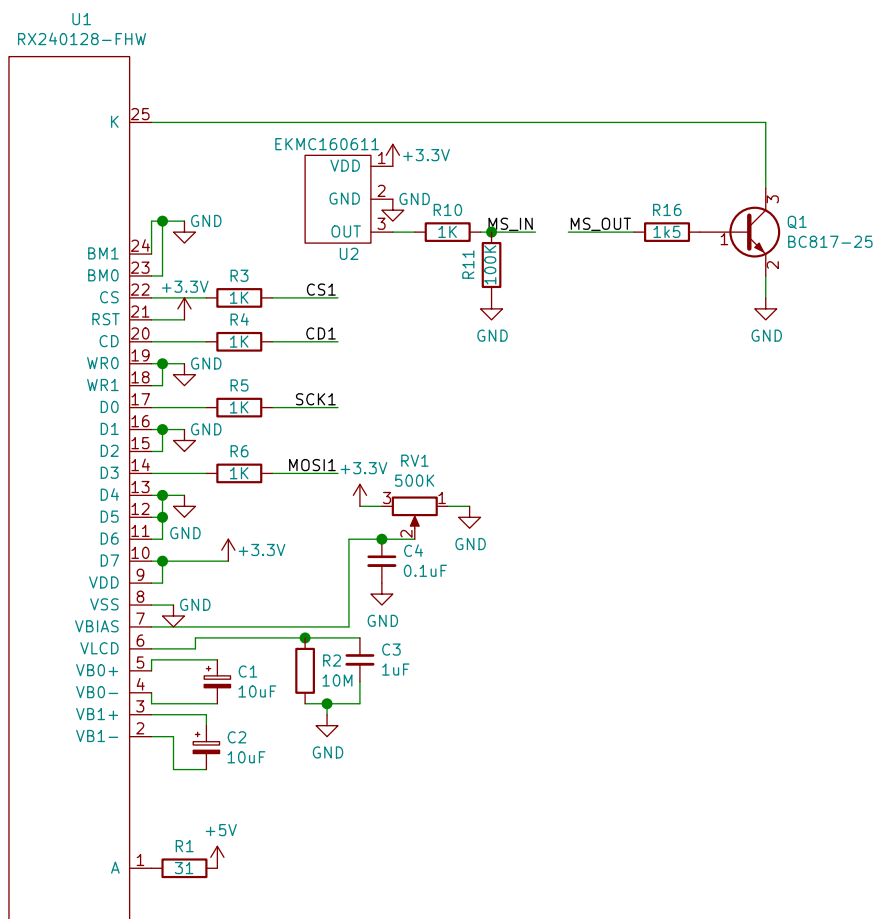
Na zobrazenie meraných dát sme si vybrali cenovo dostupný displej RX240128A-FHW od firmy RAYSTAR. Je to nízko-odberový, monochromatický displej s rozlíšením 240×128 pixelov a rozmermi až $98.7 \times 67.7 \times 9.5\text{ mm}$. Na jeho ovládanie a komunikáciu používa CMOS integrovaný obvod UC1608 [20].

Z tabuľky 3.1 môžeme vyčítať energetickú náročnosť podsvietenia a logickej časti displeja.

Položka	Min	Typ	Max	Jednotky
Napájacie napätie pre logiku	2.7	2.8 ~ 3.3	3.6	V
Napájacie napätie pre podsvietenie	3.3	3.5	3.7	V
Napájací prúd pre logiku	-	1.1	-	mA
Napájací prúd pre podsvietenie	86.4	96	120	mA

Tabuľka 3.1: Energetické hodnoty displeja RX240128A-FHW [20]

Na obrázku 3.5 je vidieť naše zapojenie displeja. Komunikácia prebieha pomocou 4 drátovvej SPI zbernice. Kontrast je riadený 500 k Ω trimrom pripojeným na pin V_{BIAS} . Podsvietenie displeja sa zas aktivuje pomocou MCU, keď senzor pohybu zaznamená zmenu stavu.



Obrázok 3.5: Schéma zapojenia displeja

3.3.1 Komunikácia s displejom

Na komunikáciu s displejom a možnosť grafického vykreslenia sme použili 2 voľne dostupné knižnice (U8G2, u8g2_esp32_hal), ktoré sú bližšie popísané v kapitole 5.

Funkčnosť displeja sme najskôr testovali na nepájavom poli. Po zapojení sme sa ho snažili spojzdníť v prostredí ESP-IDF s knižnicou U8G2. Samotná knižnica však nepodporuje platformu ESP32, a tak sme ešte museli pridať HAL knižnicu na prepojenie prostredia ESP-IDF a knižnice U8G2. Aj napriek vyskúšaniam rôznych postupov nebolo možné displej ani inicializovať. Preto sme sa rozhodli, že displej spojzdníme najskôr v Arduino IDE prostredí a následne v ESP-IDF. Tým by sme mohli vylúčiť chyby vzniknuté v hardwarovom zapojení. V Arduino IDE sa nám podarilo inicializovať a komunikovať s

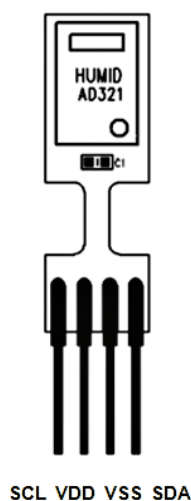
displejom pomerne rýchlo. Následne sme sa vrátili do prostredia ESP-IDF, kde sme zopakovali všetky kroky, ktoré sme použili Arduino IDE knižnice na jeho inicializáciu. Aj napriek zreprodukovaní týchto krokov sa nám displej nepodarilo sfunkčnit.

Nasledovala analýza signálov posielaných po zbernici SPI pomocou osciloskopu. Po nej sme zistili, že signál chip select mal v prostredí ESP-IDF inverznú logiku oproti prostrediu Arduino IDE. Po zmenení tohto príznaku v HAL knižnici `u8g2_esp32_hal` sa nám podarilo zahájiť inicializáciu a následnú komunikáciu s displejom RX240128A-FHW.

3.4 Senzor teploty a vlhkosti Chip Cap 2-sip

Na meranie teploty a relatívnej vlhkosti ovzdušia sme si vybrali senzorový modul Chip Cap 2-sip od firmy Telsire. Senzor AD321 je osadený v jednoduchom tele obsahujúcom jeden riadok pinov so 4 vývodmi. Chip Cap 2-sip integruje meracie elementy spojené s elementami spracovania signálu v kompaktnom formáte a poskytuje plne kalibrovaný digitálny výstup. Teplotu dokáže merať s presnosťou $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ a relatívnu vlhkosť zas s presnosťou $\pm 2.0\%$ [26].

Táto kombinácia individuálnej presnosti kalibrácie, pamäti vyhradenej na kalibráciu a I2C rozhrania na komunikáciu zabezpečuje najlepšiu variantu pre jednoduché a rýchle implementácie do systémov. Rozhranie I2C je optimalizované pre čítanie hodnôt zo senzoru a takisto výhodné pre efektívnu spotrebu energie. Chip Cap 2-sip obsahuje pin pre hodinový signál (SCK), napájanie (VDD), uzemnenie (VSS) a pre dátový signál (SDA).



(a) : Vzhľad Chip Cap 2-sip senzoru [26]

Temperature (°C)

Resolution	14 bit (0.01°C)
Accuracy ²	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (Figure 2)
Repeatability	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Response time	5.0 sec (63%)
Operating range	- 40 ~ 125 °C
Long term drift	<0.05 °C/yr (Normal condition)

Relative Humidity (RH%)

* Custom Accuracy Tolerance Available

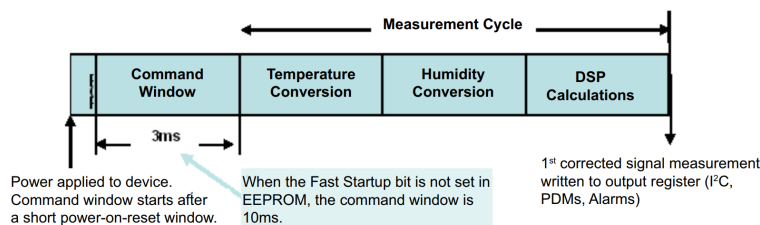
Resolution	14 bit (0.01%RH)
Accuracy ¹	$\pm 2.0\%$ RH (20~80%RH)*
Repeatability	$\pm 0.2\%$ RH
Hysteresis	$\pm 2.0\%$ RH
Linearity	<2.0 %RH
Response time ²	7.0 sec (63%)
Temp Coefficient	Max 0.13 %RH/°C (at 10~60°C, 10~90%RH)
Operating range	0 ~ 100 %RH (Non-Condensing)
Long term drift	<0.5 %RH/yr (Normal condition)

(b) : Tabuľka presností Chip Cap 2-sip senzoru [26]

Obrázok 3.6: Vzhľad a presnosť senzoru Chip Cap 2-sip

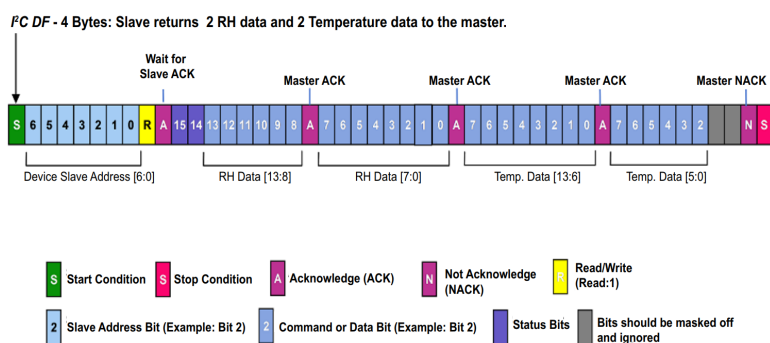
3.4.1 Čítanie dát zo senzoru

Po pripojení napájania je komunikácia započatá poslaním štartovacej sekvencie. Následne prebehne merací cyklus, v ktorom sa najskôr zmeria teplota vzduchu, relatívna vlhkosť a potom sa signál digitálne spracuje 3.7.



Obrázok 3.7: Štartovací a merací cyklus senzora Chip Cap 2-sip [25]

Meranie môže prebiehať v dvoch módoch - spánkovom alebo aktualizovacom móde [25]. Pre naše použitie sme požili aktualizovací mód. V ňom sa prevedie meranie a dáta čakajú pripravené v data fetch registri na príkaz od mastra.



Obrázok 3.8: Zloženie meracieho paketu senzora Chip Cap 2-sip [25]

K adrese senzora posunutú o 1 bit doľava pridáme čítací bit a pošleme na I2C zbernicu. Pokiaľ bol príkaz prijatý, dostaneme od senzora potvrdenie a následne môžeme prečítať 4 bajty. V prvých dvoch bitoch sú dva status bity, ktoré indikujú aktuálny stav dát. V nasledujúcich 14-tich bitoch je zakódovaná hodnota relatívnej vlhkosti. V druhej dvojici bajtov je v 14 bitoch zakódovaná hodnota teploty a zvyšné dva bity sú nepotrebné 3.8.

3.4.2 Výpočet hodnôt

Pokiaľ pomocou status bitov zistíme, že sú dáta validné, môžeme zahájiť konverziu. Na dosiahnutie plnej presnosti senzora sa odporúča previezť prečítané bity vlhkosti nasledujúcim vzorcom.

$$RH = (RH_High[5 : 0] \cdot 256 + RH_Low[7 : 0]) / 2^{14} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

Aby sme z prečítaných bitov dostali požadovanú hodnotu teploty, tak

použijeme nasledujúci vzorec z datasheetu [25].

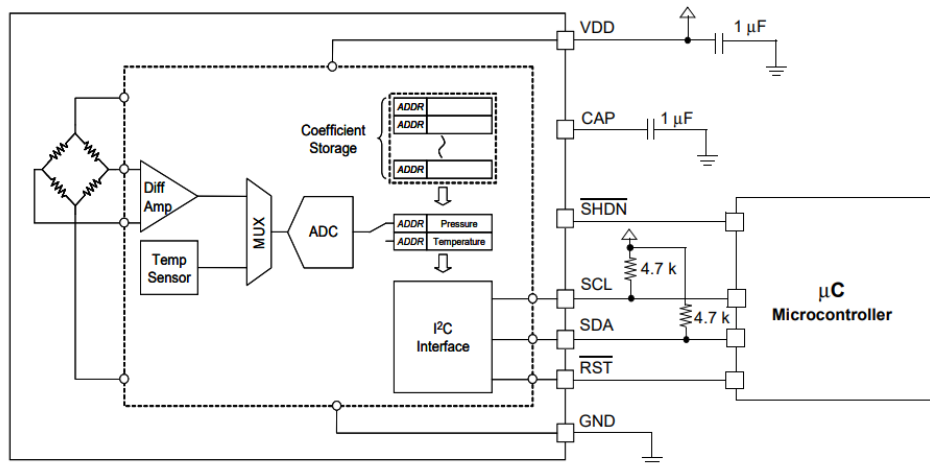
$$T = (Temp_High[7 : 0] \cdot 64 + Temp_Low[7 : 2] / 4) / 2^{14} \cdot 165 - 40 \quad [^{\circ}C] \quad (3.3)$$

3.5 Senzor tlaku MPL115A2

Na meranie atmosferického tlaku sme si vybrali senzor MPL115A2 od spoločnosti NXP. MPL115A2 obsahuje MEMS tlakový modul s integrovaným obvodom s cieľom zabezpečiť presné merania tlaku od 50 do 115 *kPa*. Vstavaný analógovo-číslcový prevodník slúži na konverziu hodnôt tlaku a teploty na digitálny výstup do I2C portu. Kalibračné dáta sú pri výrobe uložené do internej ROM pamäti [16].

Využívajúc surového snímacieho výstupu a kalibračných dát, mikrokontrolér vykoná kompenzačný algoritmus, aby presnosť výsledného kompenzovaného absolútneho tlaku bola ± 1 *kPa* [16].

Senzor je umiestnený v malom kovovom puzdre s rozmermi $5.0 \times 3.0 \times 1.2$ *mm*. Kvôli jeho miniatúrnym rozmerom a umiestnením kontaktných plôch na spodnej strane senzora, bolo jeho osadenie pomerne náročné. Plôšky sme museli predom zaliat cínom, senzor sme uložili na jeho riadne miesto na plošnom spoji a následne sme teplovzdušnou pištoľou ohrievali spodnú stranu plošného spoja. Celý tento proces musel trvať tak dlho, aby mali kontakty dobré vodivé spojenie a cín sa rozliat po vodivých plochách na PCB. Zároveň doba ohrevu nemohla byť príliš dlhá, aby sme prúdom teplého vzduchu neznížili plošný spoj alebo elektroniku vnútri senzora.

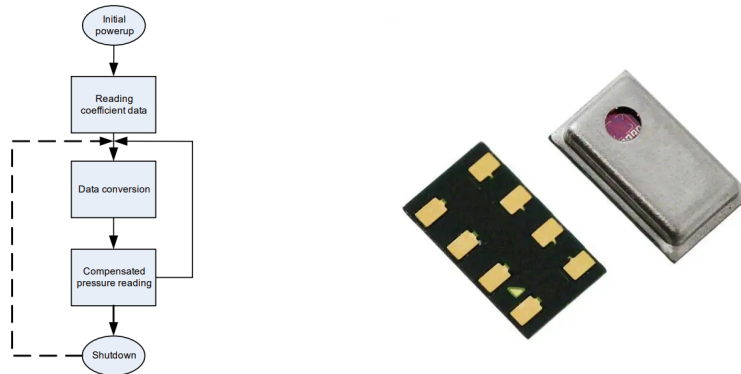


Obrázok 3.9: Blokový diagram senzora MPL115A2 [16]

3.5.1 Komunikácia so senzorom

S MPL115A2 je možné komunikovať pomocou I2C zbernice a to rýchlosťou hodinového signálu až 400 *kHz*. Po privedení napájania je potrebné prečítať

kalibračné dáta. Následne na rad príde merací cyklus. V ňom sa pošle príkaz na konverziu dát, ktorá prebehne maximálne v čase 3 ms. Potom sa pošle príkaz na čítanie a master prečíta 2 bajty teploty a 2 bajty tlaku.



(a) : Schéma meracieho cyklu MPL115A2 [16]

(b) : Vzhľad senzoru MPL115A2 [4]

Obrázok 3.10: Vzhľad a schéma meracieho cyklu senzoru MPL115A2

Meranie môže byť prevedené v dvoch módoch - aktívnom a spánkovom. V našej implementácii sme použili aktívny mód, pri ktorom má senzor spotrebu $5 \mu A$ [16].

3.5.2 Výpočet hodnôt

Ak prečítanie dát prebehlo bez problémov, môžeme začať s konverziou. Najprv prevedieme prečítanú hodnotu teploty do ADC jednotiek pomocou nasledujúceho vzorca.

$$temp_adc = (temp_msb \cdot 256 + (temp_lsb \ \& \ 0xC0))/64 \quad (3.4)$$

Hodnotu vypočítanú v 3.4 použijeme v nasledujúcom vzorci, čím dostaneme výslednú teplotu.

$$temperature = ((temp_adc - 498)/(-5.35) + 25.0) \quad [^{\circ}C] \quad (3.5)$$

Pri výpočte tlaku použijeme totožný vzorec na prevod do ADC jednotiek.

$$pres_adc = (pres_msb \cdot 256 + (pres_lsb \ \& \ 0xC0))/64 \quad (3.6)$$

Aplikujeme kompenzáciu za pomoci kalibračných konštánt A_0, B_0, B_1, C_{12} .

$$pres_comp = A_0 + (B_1 + C_{12} \cdot temp_adc) \cdot pres_adc + B_2 \cdot temp_adc \quad (3.7)$$

Kompenzačnú hodnotu pre tlak použijeme v nasledujúcej rovnici, čím dostaneme výslednú hodnotu tlaku.

$$pressure = (65.0/1023.0) \cdot pres_comp + 50.0 \quad [kPa] \quad (3.8)$$

3.6 Senzor kvality vzduchu MiCS-6814

MiCS-6814 je robustný MEMS senzor vyrobený na detekciu znečistenia z automobilových spalín, poľnohospodárskeho alebo priemyselného zápachu. Senzor dokáže detekovať a merať až 8 rôznych plynov - viď tabuľka 3.2.

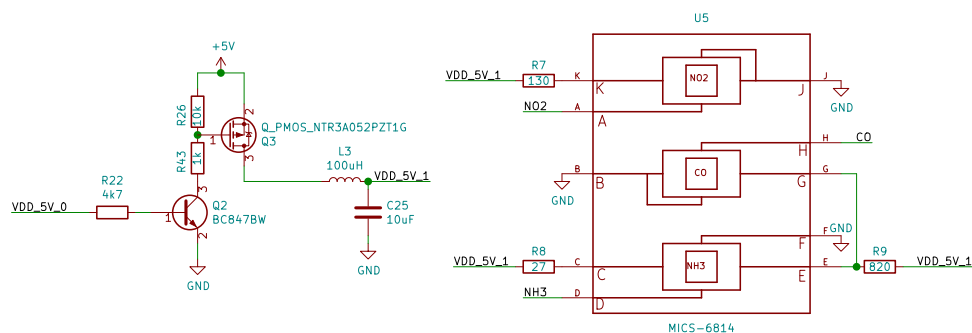
Názov plynu	Chemická značka	Rozsah [ppm]
oxid uhoľnatý	CO	1-1000
oxid dusičitý	NO_2	0.05-10
etanol	C_2H_5OH	10-500
vodík	H_2	1-1000
amoniak	NH_3	1-500
metán	CH_4	>1000
propán	C_3H_8	>1000
izobután	C_4H_{10}	>1000

Tabuľka 3.2: Plyny detekovateľné senzorom MiCS-6814 [24]

MiCS-6814 je jediný senzor použitý v našom projekte, ktorý je napájaný z napätia 5 V. ESP32-WROOM-32U pracuje na napätí 3.3 V a ak by pri chybe v obvode dostalo na vstup 5 V, mohlo by to spôsobiť jeho trvalé poškodenie. Na bezpečné spínanie sme preto pridali predradný tranzistor, ktorý pri otvorení pustí 5 V napájanie do MiCS-6814.

Vnútri MiCS-6814 sa nachádzajú tri ohrievacie časti. Aby sme na nich dosiahli správnu teplotu, musíme pred ich napájanie pridať 3 rezistory s presnou hodnotou. Hodnota rezistoru pri časti NO_2 musí byť 130 Ω , pri časti CO sa musí rovnať 820 Ω a pri NH_3 sa zas rovná 27 Ω - viď obrázok 3.11.

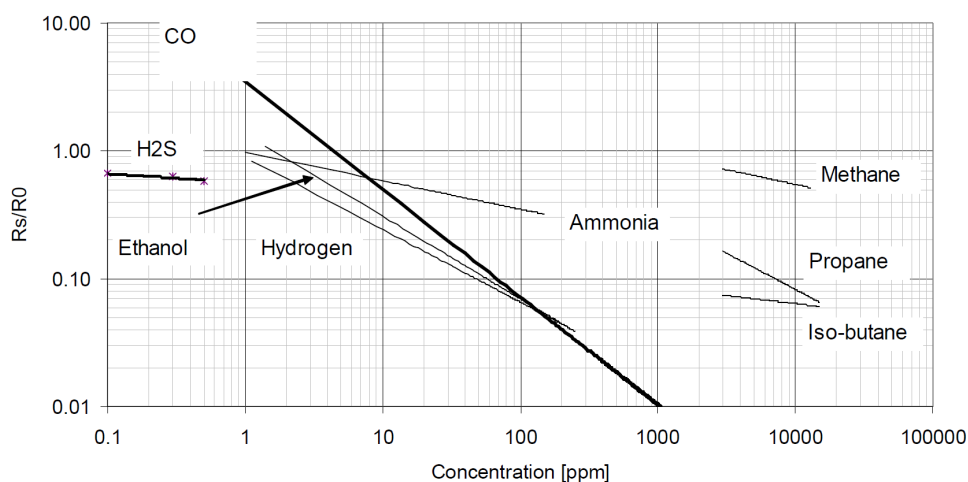
Čítanie hodnoty v prípade tohto senzoru prebieha pomocou čítania hodnoty analógových napätí jednotlivých ohrievačov. Tieto napätia sme priviedli na piny ESP32-WROOM-32U, ktoré podporujú analógovo-číslcový prevod. Z hodnoty napätia potom dopočítame množstvo ppm, častíc meraného plynu na milión častíc vzduchu.



Obrázok 3.11: Schéma zapojenia MiCS-6814

3.6.1 Kalibrácia senzoru

Na získanie správnych hodnôt zo senzoru je nutné zistiť odpor senzoru R_0 , ktorý je meraný v špeciálnych podmienkach podľa datasheetu [24]. Ako referenčné médium sme si zvolili etanol. Následne sme previedli meranie, kde sme pre hodnoty koncentrácie 20 ppm a 200 ppm zaznamenali odpor. Z grafických údajov 3.12 sme potom dopočítali hodnotu $R_0 = 1.21 M\Omega$.



Obrázok 3.12: Graf závislosti odporu na koncentracii plynov pre CO senzor [24]

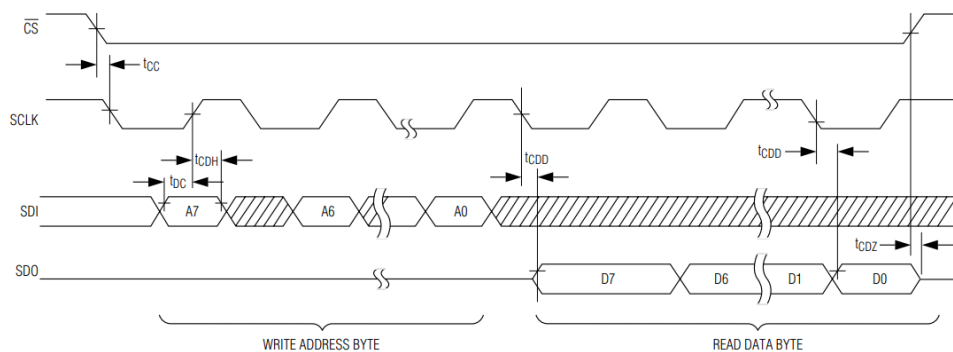
Na presné meranie prchavých látok vo vzduchu sme použili návod a aparatúru 3.13 z laboratórnej úlohy Chemické senzory vyučovanú v predmete Moderní senzory (B3M38MSE). Chyby pri meraní boli spôsobené nedokonalým zatvorením sústavy z dôvodu nutnosti priviesť napájací a komunikačný kábel. Aj z tohto dôvodu sme sa následne rozhodli senzory NO_2 a NH_3 v našej práci nepoužiť.



Obrázok 3.13: Aparatúra na presné meranie koncentrácie plynu vo vzduchu

Komunikácia s MAX31865

Na komunikáciu s RTD konvertorom používame 4-drátovú SPI zbernicu, ktorej rýchlosť hodinového signálu môže byť až 5 MHz . Priebeh komunikácie a polaritu signálov môžeme vidieť na obrázku 3.15.



Obrázok 3.15: Priebeh komunikácie MAX31865 v 4-drátovom SPI zapojení [12]

Na počiatku je nutné nastaviť konfiguračný register $0x00$ do požadovanej konfigurácie. Tá v našom prípade predstavuje 4. stĺpec tabuľky 3.3.

Číslo bitu	Definícia bitu	Význam bitu	
D7	V_{BIAS}	1 - zapnuté 0 - vypnuté	1
D6	konverzný mód	1 - automatický 0 - vypnutý	1
D5	1 meranie	1 - zapnuté 0 - vypnuté	0
D4	SPI mód	1 - 3-drátový 0 - 2/4-drátový	0
D3	detekcia chyby	00 - žiadna	0
D2		01 - s automatickým oneskorením 10 - s manuálnym oneskorením 11 - vypnúť s manuálnym oneskorením	0
D1	chybový status	1 - vymazať 0 - vypnuté	1
D0	filter	1 - 50Hz 0 - 60Hz	1

Tabuľka 3.3: Nastavenie konfiguračného registra MAX31865 [12]

Po nastavení môžeme prejsť do cyklu, v ktorom čítame 2 bajtovú hodnotu RTD. Z tej dostaneme odpor R_t a na základe toho dopočítame teplotu podľa

vzorca 3.9, kde $A = 3.9083 \cdot 10^{-3}$, $B = -5.7750 \cdot 10^{-7}$ a $R_0 = 100 \Omega$.

$$temperature = \frac{-R_0 \cdot A + \sqrt{R_0^2 \cdot A^2 - 4 \cdot R_0 \cdot B \cdot (R_0 - R_t)}}{2 \cdot R_0 \cdot B} \quad [^{\circ}C] \quad (3.9)$$

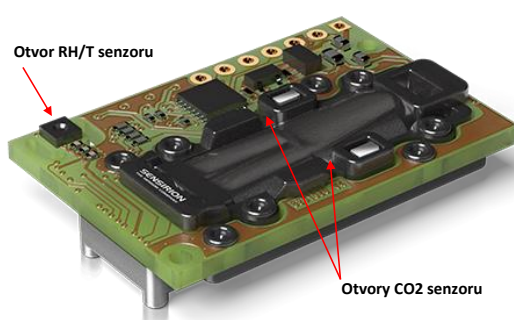
3.8 Senzor oxidu uhličitého Sensirion SCD30

Hodnota CO_2 v miestnosti je jednou z kľúčových hodnôt, ktorú chceme v našom projekte pozorovať. Napriek jej dôležitosti väčšina vnútorných meteostaníc neobsahuje senzor CO_2 . Dôvodom bude práve jeho cena, ktorá by pri lacnejších meteostaniciach mohla predstavovať cenu celej meteostanice a napríklad v porovnaní s CO senzorom je o rád vyššia.

Vonkajšia hodnota CO_2 sa pohybuje od 400 do 500 *ppm* [1]. V školách sa odporúča, aby hodnota CO_2 neprekračovala 1000 *ppm* a v kanceláriách 800 *ppm*. Pričom vzduch vydychovaný ľuďmi obsahuje 25000 *ppm* až 30000 *ppm* [9]. Jeho zvýšené hodnoty sú časté hlavne v open-space kanceláriách a školských triedach. Pri nedostatočnom vetraní sa hodnota oxidu uhličitého vo vzduchu zvyšuje. Časté vetranie však vyžaduje veľkú energetickú náročnosť pri ohreve alebo ochladzovaní nového vzduchu. Optimálne je teda túto hodnotu priebežne sledovať a na jej základe ovládať vetranie priestoru.

Nami vybraný modul SCD30 od firmy Sensirion, je schopný detekovať hodnotu oxidu uhličitého od 400 do 10000 *ppm* a to s presnosťou $\pm(30 \text{ ppm} + 3\%)$ [22].

Senzor je plne kalibrovaný a linearizovaný. Pracuje pri napätí 3.3 V a komunikácia s ním je možná pomocou UART alebo I2C zbernice. Meranie koncentrácie oxidu uhličitého pritom môže prebehnúť najčastejšie každé 2 sekundy. Pri správnej funkcii merania si možno všimnúť rozsvietenie žiarovky na bočnej strane senzoru. Na detekciu CO_2 používa známu NDIR technológiu.

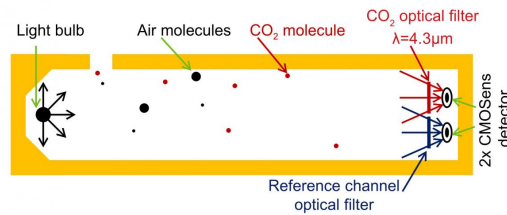


Obrázok 3.16: Vzhľad senzoru SCD30 [21] (upravené)

3.8.1 NDIR technológia detekcie plynov

NDIR je priemyselná skratka pre "NonDispersive InfraRed", čo v preklade znamená "nedisperzívne infračervené". Tá v sebe skrýva spôsob fungovania

senzoru. Princíp detekcie je zobrazený na obrázku 3.17. Zdroj infračerveného svetla umiestnený na začiatku tuby vysiela lúče cez tubu naplnenú okolitým vzduchom smerom k dvom detektorom infračerveného svetla, ktoré sú umiestnené na konci tuby. Jeden detektor má filter prepúšťajúci žiarenie v pásme $4.3 \mu\text{m}$, čo je pásmo absorpcie IR svetla CO_2 molekulami. Druhý má filter prepúšťajúci v pásme $4.0 \mu\text{m}$, ktoré je minimálne absorbované plynmi obsiahnutými vo vzduchu. Oba tieto senzory merajú intenzitu dopadajúceho žiarenia. Na základe týchto dvoch hodnôt je možné zistiť množstvo oxidu uhličitého obsiahnutého v okolitom vzduchu [9].



Obrázok 3.17: Princíp detekcie CO_2 pomocou NDIR metódy [9]

3.8.2 Komunikácia so senzorom

Senzor SCD30 komunikuje pomocou I2C zbernice a priebeh tejto komunikácie je podrobne opísaný v datasheete [23]. Preto sme predpokladali, že komunikácia s ním bude jednoduchá, no v priebehu implementácie nastali dva problémy.

Po prečítaní datasheetu a implementovaní počítačového nastavenia a komunikácie sme od senzoru nedostávali žiadne odpovede. Priebeh signálov sme preto pozreli na osciloskope. Všimli sme si, že prvýkrát sa pošle adresa senzoru a následne príkaz na čítanie dát, no druhýkrát iba adresa. Bolo to spôsobené tým, že mikroprocesor nedostal potvrdenie o prijatí. Po znížení rýchlosti hodinového signálu sa táto chyba opravila. Napriek tomu, že v datasheete je uvedená rýchlosť hodinového signálu 100 kHz , sme túto rýchlosť museli znížiť na to, aby posielanie dát prebehlo korektne.

Po vyladení tejto chyby sa príkazy posielali bezchybne, no zo senzora sme nedostávali namerané hodnoty. Ak sme sa však spýtali na verziu alebo nastavenia, hodnoty sme boli schopný prijať a prečítať korektne. Pozreli sme si preto na osciloskope napájanie SCD30 a všimli sme si, že pri započatí merania výrazne klesne napätie, čo spôsobilo reset senzora. Po analyzovaní tohto problému sme dospeli k tomu, že napätový pokles bol spôsobený prechodovými odpormi v nepájavom kontaktnom poli, kde bola funkčnosť senzoru testovaná. Po pripojení napájania senzoru priamo na napájanie NodeMCU a pridaní 1 mF kondenzátora sa táto chyba odstránila a meranie prebehlo v poriadku. Toto zistenie sme si zaznamenali a pri návrhu plošného spoja sme dávali obzvlášť pozor, aby napájanie SCD30 bolo kvalitné a dostatočné. Očakávaná koncentrácia oxidu uhličitého vo vonkajšom prostredí bola 400 ppm . Hodnotu sa nám podarilo namerať a tým sme overili správnu funkčnosť senzoru.

■ 3.9 Senzor pohybu Ks0052

Jedným zo zadaných bodov bakalárskej práce bola možnosť automatického podsvietenia displeja pri pohybe. Kvôli tomu sme do nášho projektu pridali senzor pohybu Ks0052 od firmy Keyestudio. Jedná sa o veľmi jednoduchý a lacný senzor pracujúci na princípe PIR. Obsahuje iba 3 piny. Dva slúžia ako napájanie (GND, 3.3 V) a tretí je ako signálový výstup. Ten je v prípade pokoja v napäťovej úrovni 0 V. Ak senzor zaznamená pohyb, stav signálového pinu sa zmení z 0 V na 3.3 V [10]. Preto komunikácia s ním je veľmi jednoduchá a stačí nám na jednom pine mikrokontroléru čítať jeho logickú úroveň.

■ 3.9.1 PIR technológia na detekciu pohybu

Detektory pohybu PIR sa stali veľmi populárnymi hlavne v oblasti bezpečnosti a energetického manažmentu. Skratka PIR znamená "Passive Infra Red", čo môžeme preložiť ako "pasívne infračervené". Skrýva v sebe princíp fungovania senzoru. Snímací prvok PIR reaguje na infračervené žiarenie v rozsahu 4 až 20 μm , kde je koncentrovaná väčšina tepelného výkonu vyžarovaná ľuďmi [8]. Nevýhodou senzoru je, že detekuje iba zmenu v signále, nie jeho absolútne hodnoty. Teda zaznamená moment príchodu, no keď zostaneme pred ním nehybne stáť, tak zostane v pokoji.

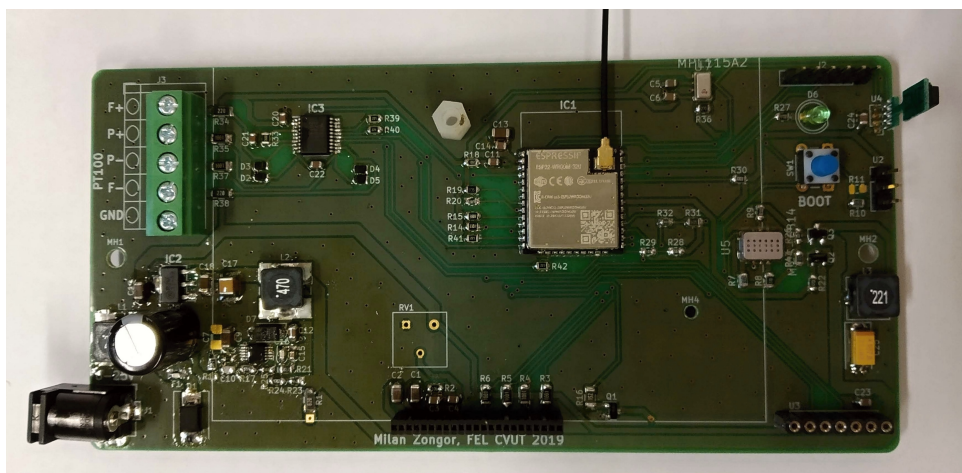
■ 3.10 Schéma zapojenia

Vyššie spomenuté súčasti ako mikrokontrolér, blok napájania, displej a senzory sme spojili a vytvorili tak kompletnú schému zapojenia. Na jej zostrojenie sme použili voľne dostupný program KiCad. Návrh kompletnej schémy zapojenia je dostupný v prílohe B.3.

Kapitola 4

Návrh plošného spoja

Jedným z hlavných cieľov pre výrobu našej monitorovacej jednotky bola jej cenová dostupnosť. Vďaka pomerne veľkej ploche displeja a ochrannéj krabičky pre naše zariadenie sme si mohli dovoliť mať menšiu hustotu osadených súčiastok. S touto hustotou sa nám zjednodušil dizajn plošného spoja, ktorý sme mohli navrhnuť na rozšírenú, ale hlavne cenovo priaznivú variantu - plošný spoj s dvoma vrstvami. Jeho finálne rozmery sú $145 \times 70 \text{ mm}$.



Obrázok 4.1: Fotografia plošného spoja s osadenými komponentami

Preferovanou voľbou komponentov boli hlavne súčiastky Surface Mount Devices (SMD) aj keď v špeciálnych prípadoch sme použili súčiastky Through-Hole Technology (THT). Voľba týchto komponentov nám umožnila zmenšiť rozmery plošného spoja. Keďže naše zariadenie nie je primárne určené na sériovú výrobu, všetky komponenty sme si museli pripájkovať ručne. Preto väčšina našich SMD súčiastok boli typu 0603 alebo 0805, ktoré sme boli schopní osadiť ručne v rámci nášho laboratória.

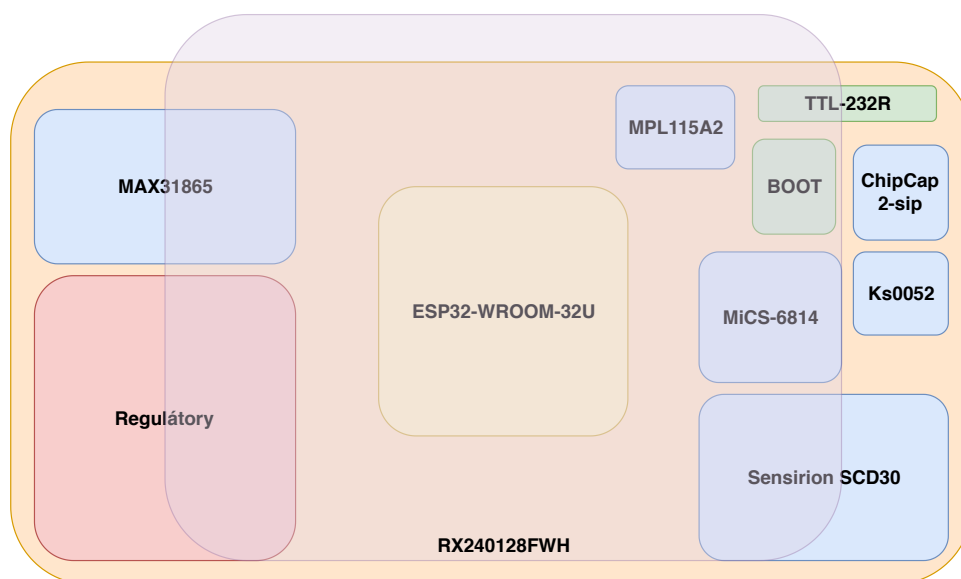
Zmyslom vrchnej vrstvy PCB je hlavne osadenie súčiastok a ich prepojenie pomocou vodivých ciest. V prípade, že je ťažké nájsť vodivú cestu alebo je to dokonca nemožné, tak sa snažíme využiť spodnú vrstvu. Tá v našom prípade slúži ako oblasť napätovej úrovne GND.

Pri návrhu plošného spoja sme sa snažili dodržať princípy opísané v knihe "Návrh a konstrukce desek plošných spojů"[29]. Blokovacie kondenzátory sme umiestnili vždy, čo najbližšie k príslušnému pinu, ako to len bolo možné. Cesty s napájacím napätím zas konštruovali hrubšie, aby sa v prípade očakávaných väčších prúdových odberov zabránilo stratám energie. Pre rýchlo meniace sa signály sme zas naopak dizajnovali užšie dráhy. Pritom sme sa snažili dĺžky vodičov a prúdové slučky minimalizovať.

Pripojenie na GND sme sa vo všetkých prípadoch, kde to bolo možné, snažili pripojiť vo viac ako jednom spoji a tým zaručili dobré spojenie so zemniacou vrstvou. Tieto prepojenia sme robili pomocou vias, čo sú cestičky vytvárajúce vodivé spojenie medzi vrchnou a spodnou vrstvou. Pokiaľ sme boli nútení dráhu viesť po spodnej vrstve, tak sme sa jej dĺžku snažili minimalizovať, aby zemniaca vrstva bola, čo najviac celistvá.

4.1 Vrchná vrstva

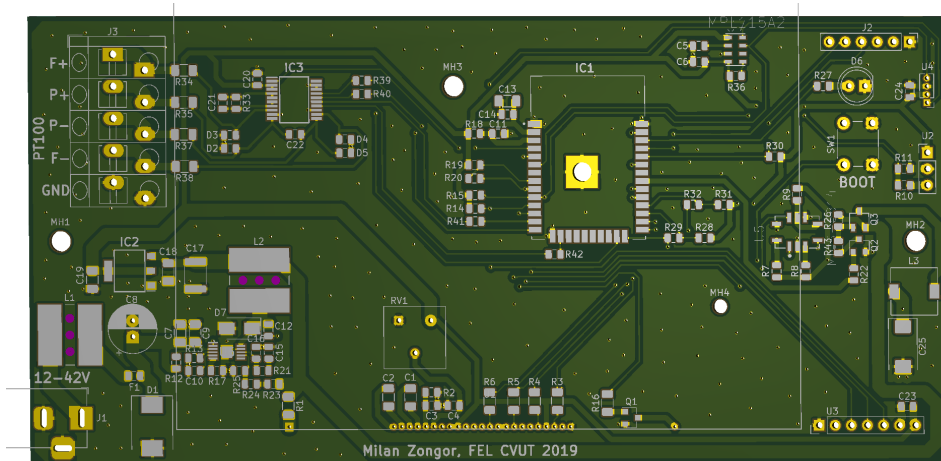
Všetky komponenty sú osadené na vrchnej vrstve a takisto je tadiaľ vedená väčšina dráh. Rozloženie do funkčných blokov, ako možno vidieť na obrázku 3.1, bolo pomerne zachované. To môžeme vidieť v nasledujúcom diagrame 4.2, ktorý zobrazuje rozloženia PCB modulov.



Obrázok 4.2: Blokový diagram rozloženia PCB modulov

Dané rozloženie bolo určené viacerými faktormi. MCU sme umiestnili približne do stredu plošného spoja, keďže s týmto blokom sú spojené všetky ostatné a môžeme tým doceliť minimalizáciu jednotlivých dráh. Poloha napájacieho zdroja je približená k bočnej strane plošného spoja, aby pin konektora mohol prechádzať cez stenu krabičky a tým zabezpečili pohodlné zapojenie adaptéra. Pomerne veľký displej prekrýva veľkú časť plošného spoja a preto sme sa snažili meracie senzory umiestniť tak, aby ich časť bola

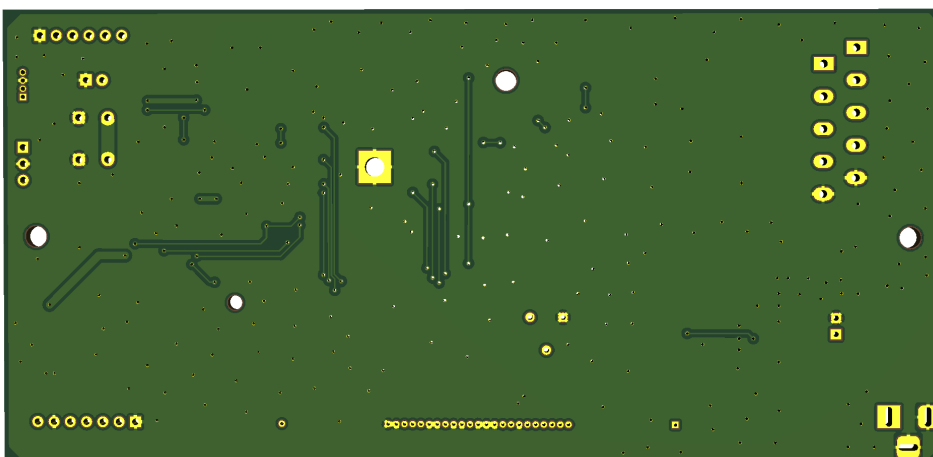
čo najmenej prekrytá displejom a tým dosiahli presnejšie meranie lepším prístupom k okolitému vzduchu. Na minimalizáciu rušivých vplyvov je takisto dôležitá vzdialenosť senzorov od výkonnej časti zariadenia, kde by rolu mohol hrať ich stratový výkon premenený na teplo. Ďalším faktorom rozmiestnenia senzorov bola vzdialenosť pinov MCU. Displej kvôli jeho veľkosti a obalu krabičky musí mať presne danú polohu - horizontálne vycentrovaný a uchytený na dolnej časti plošného spoja. Zvyšok hornej vrstvy je vyplnený GND oblasťami husto prepojenými pomocou vias so spodnou vrstvou.



Obrázok 4.3: Vizualizácia vrchnej vrstvy PCB

4.2 Spodná vrstva

Spodná vrstva, tak ako už bolo spomenuté, je vyplnená referenčnou zemou. Taktiež ňou prechádzajú cesty, ktoré nebolo možné viesť vrchnou vrstvou. Jej kompletný návrh môžete vidieť na nasledujúcom obrázku 4.4.



Obrázok 4.4: Vizualizácia spodnej vrstvy PCB

Kapitola 5

Firmware monitorovacej jednotky

V tejto kapitole sa budeme zaoberať softwarovým vybavením nášho projektu. Opíšeme prostredie a programy, ktoré sme využili a takisto priblížime blokovú schému logickej časti programu.

5.1 Framework

Platforma ESP podporuje mnoho programovacích frameworkov. Z tých najznámejších sú to napríklad Arduino IDE, MicroPython alebo Espruino. Náš firmware je napísaný v jazyku C vo frameworku ESP-IDF (IoT development framework). Vybrali sme si ho kvôli tomu, že je to oficiálny vývojový framework od firmy Espressif a obsahuje množstvo open-source knižníc na prácu s perifériami.

Nevýhodou tohto frameworku je relatívne malá používanosť medzi developerami. Veľká časť developerov používa Arduino IDE, kvôli jeho jednoduchosti, veľkej škále knižníc a vzorových programov.

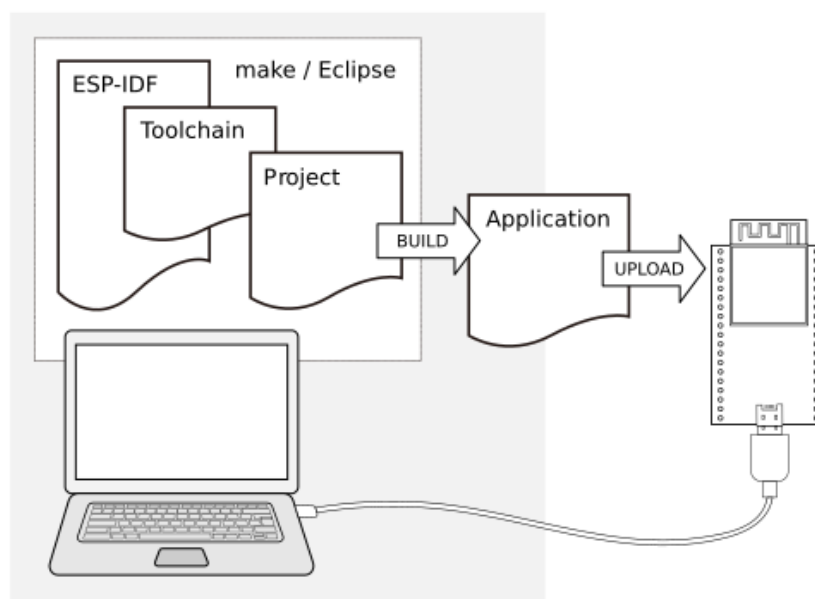
Pri rozbiehaní rôznych periférií sme preto najskôr vyskúšali funkčnosť periférie s Arduino IDE kódom. Tým sme minimalizovali chybu v kóde a overili si, že v projekte nemáme hardwarovú chybu spojenú s perifériou. Následne sme napísali kód pre danú perifériu v prostredí ESP-IDF.

5.2 Kompilátor

Na kompiláciu kódu sme použili taktiež odporúčaný nástroj od Espressifu - toolchain. Jeho úlohou je transformácia zdrojového kódu do spustiteľného programu pre ESP32 [6]. Vývoj aplikácií pre ESP32 je zobrazený na obrázku 5.1.

5.3 Textový editor

Ako textový editor na písanie zdrojového kódu je odporúčaný Eclipse. Po viacerých problémoch s týmto editovacím prostredím sme prešli do prostredia CLion od firmy JetBrains. Použili sme licenciu dostupnú pre študentov FEL ČVUT. Výhodou prostredia CLion je hlavne smart editor a statická analýza



Obrázok 5.1: Vývoj aplikácie pre ESP32 [6]

kódu, ktorá nás v prípade napísania logických alebo syntaktických nezmyslov na ne upozornila ešte pred kompiláciou kódu.

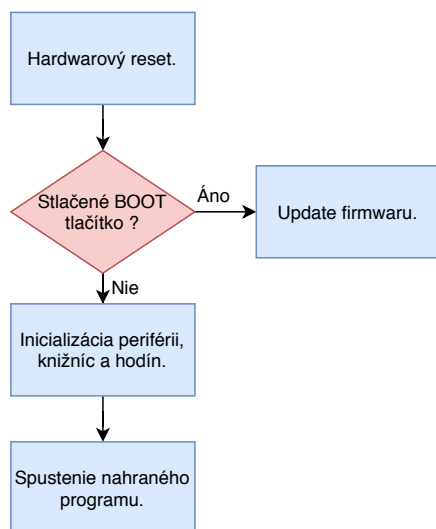
5.4 Knižnice

Prostredie ESP-IDF obsahuje viacero open-source knižníc a vzorových príkladov ich použitia. Mnohé z nich sú v projekte použité, no okrem nich sme použili aj ďalšie voľne dostupné knižnice a niekoľko knižníc na prácu so senzormi bolo aj v rámci tejto bakalárskej práce napísaných.

- **U8G2** - je voľne dostupná knižnica pre ovládanie monochromatických displejov. Vďaka nej je možné jednoducho vykresliť, resp. napísať, požadované hodnoty na náš displej [17].
- **u8g2_esp32_hal** - úlohou tejto knižnice je poskytnúť prepojenie medzi vrstvou ESP32 a knižnicou U8G2 [15], ktorá je pôvodne napísaná pre Arduino IDE.
- **max31865_lib**, **mpl115a2_lib**, **scd30_lib**, **chip_cap_2_lib**, **mics6814_lib** - sú knižnice, ktoré boli kvôli bakalárskej práci vyvinuté v prostredí ESP-IDF. Slúžia na inicializáciu, komunikáciu a spracovanie dát zo senzorov.

5.5 Pred spustením programu

Po pripojení zariadenia do siete sa vykoná zopár jednoduchých rutín. Tie možno vidieť na diagrame 5.2.



Obrázok 5.2: Diagram pre spustenie zariadenia

V momente, kedy sa zariadenie zapína prebieha kontrola hodnoty na pine GPIO0. Ak je táto hodnota logická 1, teda BOOT tlačítko nie je stlačené, začne sa prehrávať nahratý firmware. V opačnom prípade sa MCU prepne do programovacieho módu, v ktorom je užívateľom možné nahráť nový firmware. Na jeho spustenie je nutné zariadenie opäť resetovať.

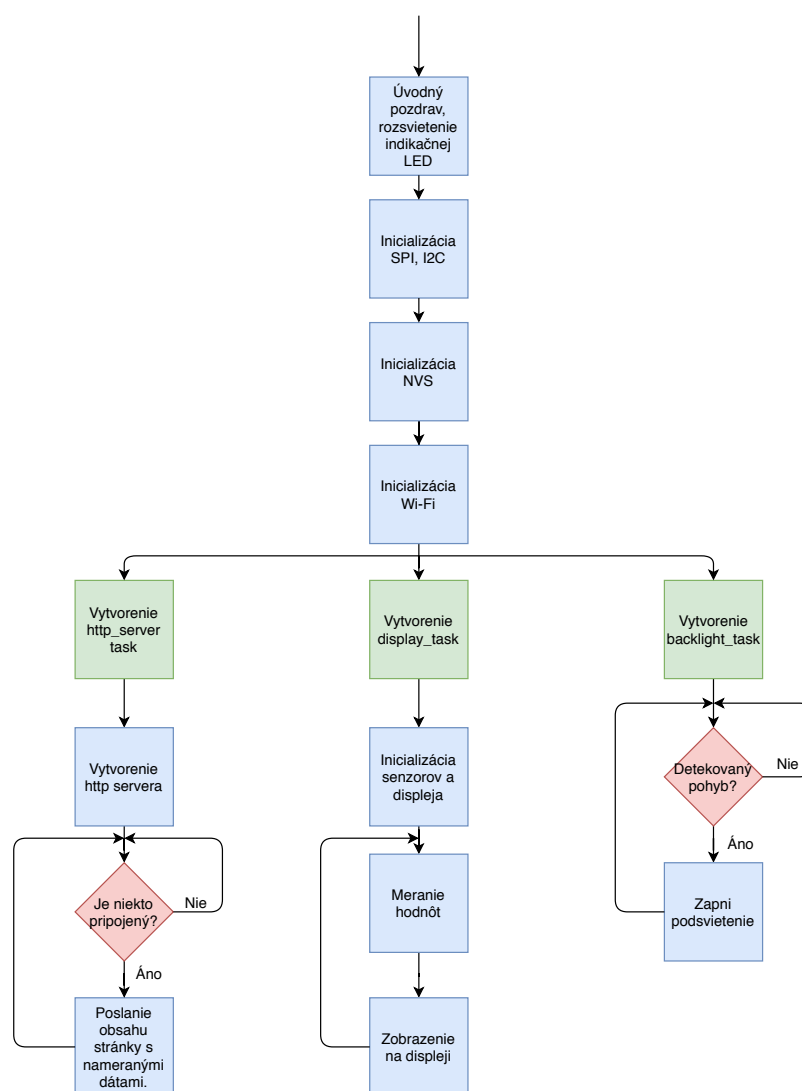
5.6 Štruktúra hlavného programu

Po vykonaní počiatkovej sekvencie je na rade spustenie hlavného programu. Jeho štruktúru je možné vidieť na diagrame 5.3.

Hneď po spustení hlavného programu sa na sériový port pošle úvodný pozdrav a rozsvieti sa užívateľská LED dióda. Užívateľ tak môže vidieť, že spustenie programu prebehlo v poriadku.

Následne prebehne inicializácia komunikačných rozhraní I2C a SPI. Pri nich sa nastaví mód komunikácie, polarita signálu, rýchlosť hodinového signálu a priradia sa im GPIO piny. Potom začne inicializácia non-volatile storage, čo je pamäť, ktorá zachová hodnoty v nej uložené aj po reštarte zariadenia. Ďalej prebehne konfigurácia Wi-Fi do módu Access Point. V tomto móde je vytvorená bezdrôtová sieť, na ktorú je možné sa pripojiť z laptopu alebo mobilného zariadenia a po napísaní adresy 192.168.4.1 do browsera je možné vidieť stránku s aktuálnymi meranými hodnotami.

Program pokračuje na vytvorenie troch vlákien, ktoré sú prevedené za pomoci jednoduchého operačného systému pre embedded zariadenia FreeRTOS.



Obrázok 5.3: Štruktúra hlavného programu

- **http_server_task** - Na počiatku tohto vlákna sa vytvorí HTTP sever a následne sa čaká na pripojenie užívateľa. Ak sa užívateľ pripojí, pošle sa mu stránka s nameranými hodnotami, ktoré sa pravidelne v intervale 5 sekúnd aktualizujú.
- **display_task** - V tomto tasku sa na začiatku inicializujú všetky používané senzory a displej. Potom vlákno prejde do nekonečnej slučky, kde postupne prebehnú všetky merania, dáta sa spracujú a zobrazia na displeji. V prípade koncentrácie oxidu uhličitého vyššej ako 1200 ppm sa zapne zapne indikačná LED. Následne sa cyklus opakuje.
- **backlight_task** - Je jednoduché vlákno, ktoré v cykle číta výstup zo senzoru pohybu a podľa zaznamenaného pohybu zapne alebo vypne podsvietenie displeja.

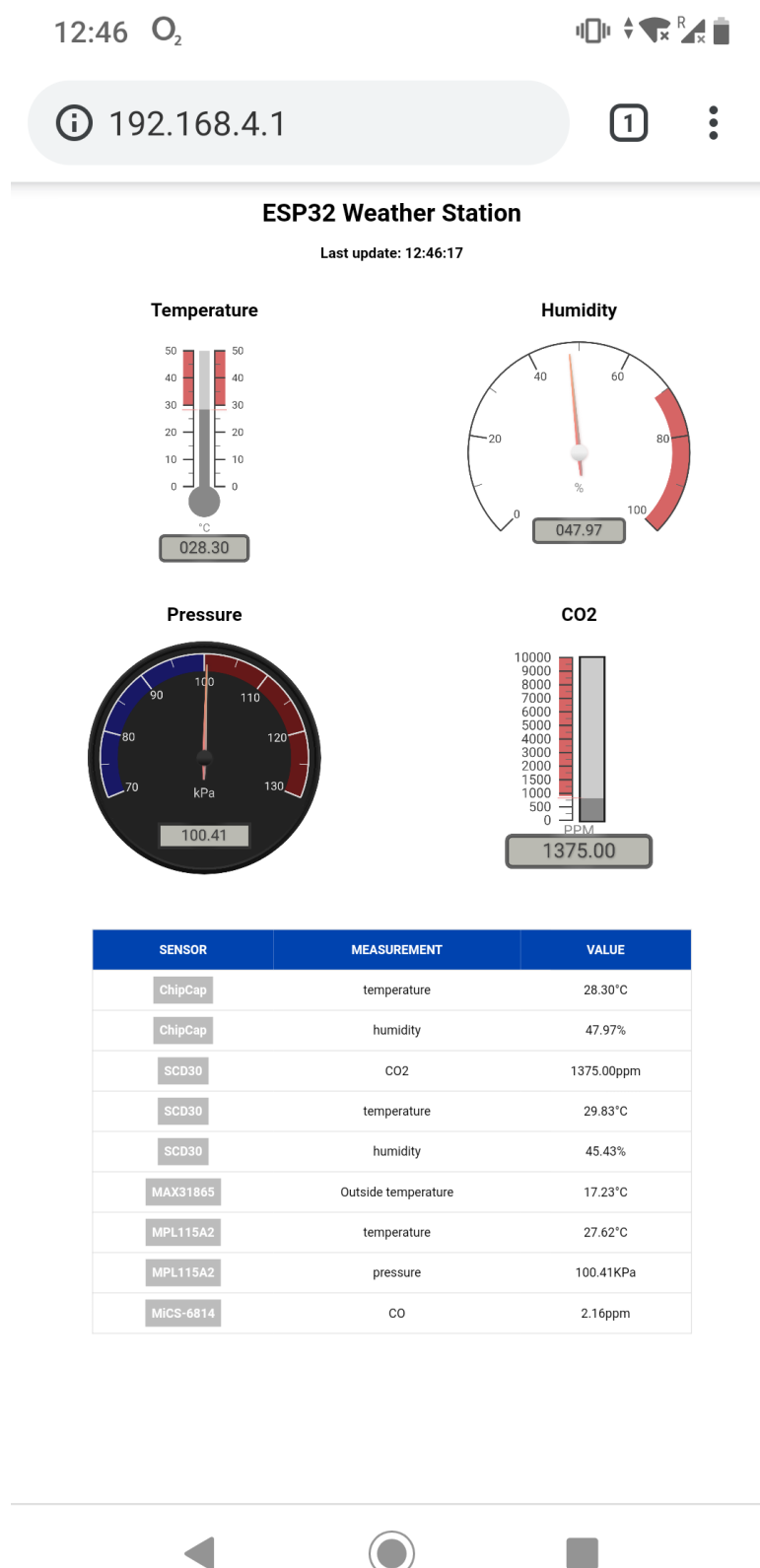
■ 5.7 Web stránka

Hlavnou úlohou našej web stránky je zobrazenie aktuálnych meraných veličín. Užívateľ si tak po pripojení na Wi-Fi môže dáta pohodlne pozrieť na svojom zariadení. Vizuál web rozhrania na mobilnom telefóne je možné vidieť na obrázku 5.4. Stránka bola napísaná kombináciou jazykov HTML, CSS a JavaScript.

Na jej začiatku je možné vidieť štvoricu budíkov interaktívne zobrazujúcu hodnotu vnútornej teploty, relatívnej vlhkosti, atmosférického tlaku a množstva CO_2 v miestnosti. Tieto budíky sú vytvorené pomocou voľne dostupnej HTML knižnice Canvas Gauges [14].

Za štvoricou budíkov nasleduje tabuľka zobrazujúca všetky merané veličiny. Z tabuľky možno vyčítať názov veličiny, jej hodnotu a názov senzora, na ktorom bola hodnota nameraná.

5. Firmware monitorovacej jednotky

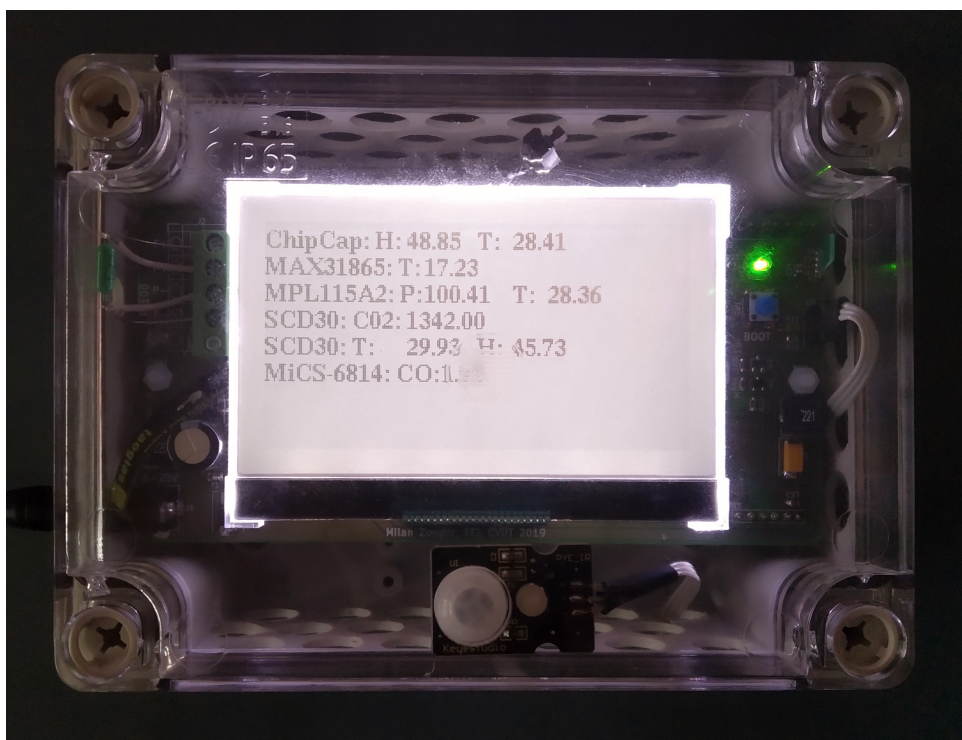


Obrázok 5.4: Vzhľad webového rozhrania monitorovacej jednotky na mobilnom zariadení

Kapitola 6

Overenie funkčnosti zariadenia

V tejto kapitole opíšeme priebeh testovania, zberu dát a ich následné spracovanie do grafov. Vysvetlíme závislosti medzi veličinami a zhrnieme zaujímavé pozorovania.



Obrázok 6.1: Výsledný vizuál monitorovacej jednotky prostredia s Wi-Fi rozhraním

6.1 Zber dát

Meranie prebehlo dňa 10.-11. mája 2019 na študentskej izbe v internátoch Koleje Strahov. Počas merania sa v miestnosti nachádzal maximálne jeden človek. Monitorovacia jednotka bola umiestnená staticky v strede miestnosti. Dáta boli zbierané pomocou sériového portu a uložené v súbore typu CSV.

6.2 Zobrazenie dát

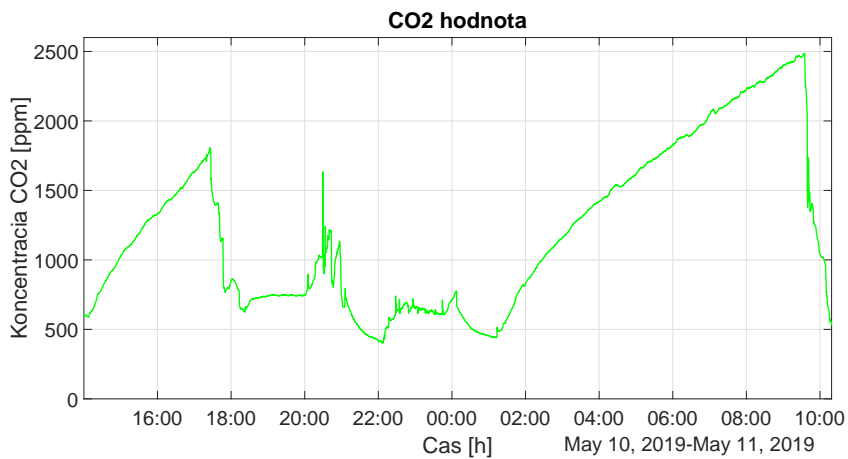
Následne boli dáta spracované a vykreslené do grafov v prostredí Matlab R2017b. Na grafe 6.2 sú znázornené namerané hodnoty koncentrácie CO_2 pomocou senzoru SCD30. Na grafoch 6.3 a 6.4 sú znázornené hodnoty relatívnej vlhkosti a vnútornej teploty zmerané senzorom Chip Cap 2-sip.

Na začiatku merania boli okná aj dvere miestnosti uzatvorené. Možno si všimnúť rastúce krivky všetkých troch veličín. V čase 17:25 bolo okno otvorené na vetrací režim po dobu 1 hodiny. Tam si môžeme všimnúť značný pokles hladiny oxidu uhličitého z hodnoty 1800 *ppm* na 600 *ppm*. Následne sa proces niekoľkokrát opakoval. Väčšie rozkmity v strednej časti grafu možno vysvetliť zvýšeným pohybom v miestnosti a teda aj zvýšeným pohybom vnútorného vzduchu. Od 1:00 do 9:30 možno vidieť skoro lineárne rastúcu koncentráciu CO_2 v miestnosti. Tento rast je spôsobený počas spánku, kedy bola miestnosť uzatvorená, nachádzal sa v nej jeden človek a nebol v nej žiaden pohyb.

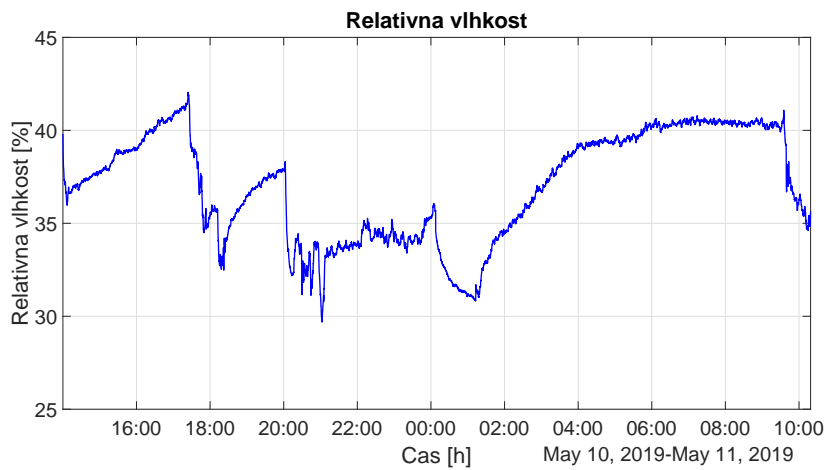
Možno si všimnúť podobnosť kriviek grafov relatívnej vlhkosti a koncentrácie oxidu uhličitého. Túto závislosť možno odôvodniť tým, že vydychovaný vzduch okrem veľkej koncentrácie CO_2 obsahuje aj významné množstvo vodných pár.

Zaujímavé je, že krivka vnútornej teploty počas noci takmer vôbec nerástla, ba zostala priam konštantná. Tento fakt možno odôvodniť malou mernou tepelnou kapacitou vzduchu oproti hodnotám tepelných kapacít stien a predmetov nachádzajúcich sa v miestnosti.

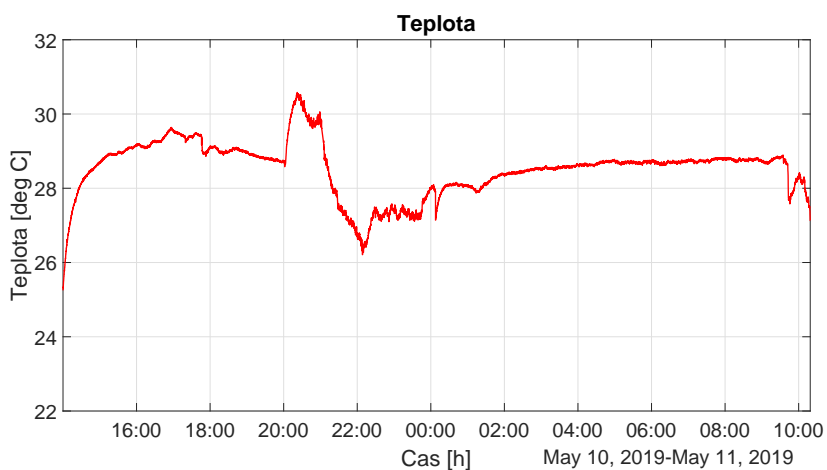
Ďalšie zaujímavé pozorovanie je strmá klesajúca koncentrácia oxidu uhličitého v miestnosti po otvorení okna. Očakávali sme, že množstvo CO_2 rapídne klesne za dobu približne 10 minút a vzduch v miestnosti vtedy môžeme považovať za kvalitný. Pravdou je, že pri našom meraní táto hodnota klesala približne 400 *ppm* za 10 minút a rástla rýchlosťou 80 *ppm* za 10 minút. Teda pokiaľ je hodnota CO_2 v miestnosti značne vysoká, jej zníženie môže trvať až niekoľko desiatok minút. Toto tvrdenie sa však nedá zovšeobecniť. Každá miestnosť má iné podmienky na vetranie, rozdielny objem, v rôznom období je rôzne veľký rozdiel vnútornej a vonkajšej teploty, tlaku a ďalších faktorov, o ktorých zatiaľ nemáme vedomosť.



Obrázok 6.2: Graf závislosti koncentrácie oxidu uhličitého v miestnosti na čase



Obrázok 6.3: Graf závislosti relatívnej vlhkosti v miestnosti na čase



Obrázok 6.4: Graf závislosti teploty v miestnosti na čase

Kapitola 7

Záver

Cieľom bakalárskej práce a súvisiaceho bakalárskeho projektu bolo skonštruovať monitorovaciu jednotku vnútorného prostredia, ktorá je schopná konkurovať momentálne dostupným produktom na trhu nielen kvalitou merania, ale aj interakciou s užívateľom pomocou displeja alebo Wi-Fi rozhrania.

Celkový vývoj tejto práce trval takmer rok a všetky jej ciele boli splnené. Na počiatku bol vyhotovený trhový rozbor komponent a senzorov potrebných na stavbu zariadenia. Funkčnosť displeja a niektorých senzorov bola otestovaná v nepájavom kontaktnom poli. Následne bola vyhotovená schéma zapojenia a návrh plošného spoja. Po obdržaní vyrobeného plošného spoja boli naň ručne osadené komponenty a prebehol test hardwarovej funkčnosti. V rámci implementačnej časti bolo v prostredí rozvíjajúcej low-cost platformy ESP-IDF vyvinutých 5 knižníc na inicializáciu a komunikáciu so senzormi. Merané hodnoty sú zobrazené pomocou grafického displeja a rozhrania Wi-Fi AP.

Stále však existuje množstvo spôsobov na jej zlepšenie. Napríklad dáta nezobrazovať pomocou Wi-Fi v móde Access Point, ale pridať posielanie dát na server, odkiaľ by boli dostupné aj z väčšej vzdialenosti. Jedno z najinovatívnejších riešení by bolo merané dáta posielat Facebook Messenger botovi, a teda užívateľ by sa vedel priamo v aplikácii Messenger dostať k meraným dátam z jeho miestnosti. V spojení s týmto vylepšením sme oslovili českú spoločnosť Amio, ktorá poskytuje časť tohto rozšírenia týkajúceho sa Messenger bota, no žiaľ z časových dôvodov sa nám toto rozšírenie nepodarilo realizovať.

Zariadenie bude okrem monitorovania vnútorného prostredia v laboratóriu senzorov a magnetických meraní MAGLAB slúžiť aj ako učebná pomôcka pri predmete B3B38SME - Sensory a měření. Je možné na ňom demonštrovať funkciu viacerých senzorov, vysvetliť rozdiely merania tých istých veličín rôznymi spôsobmi, ukázať chyby vznikajúce pri meraní a vysvetliť ako im predchádzať.

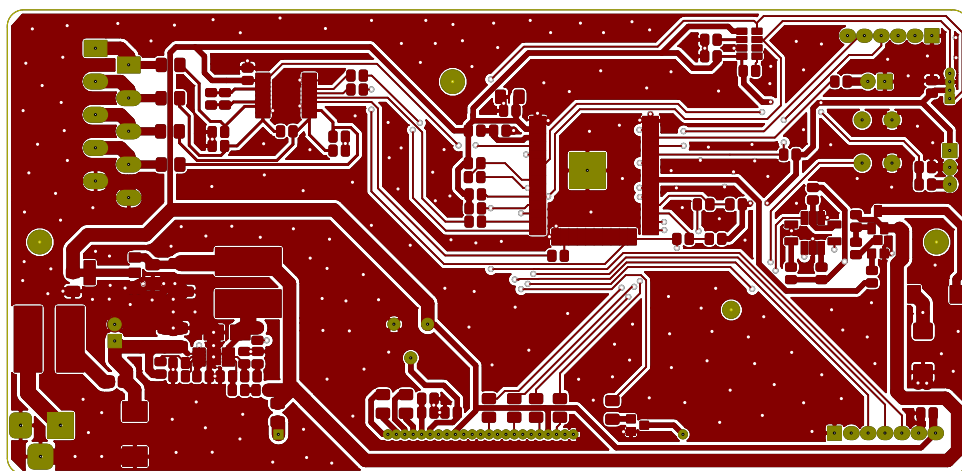
Dodatok A

Zoznam skratiek a symbolov

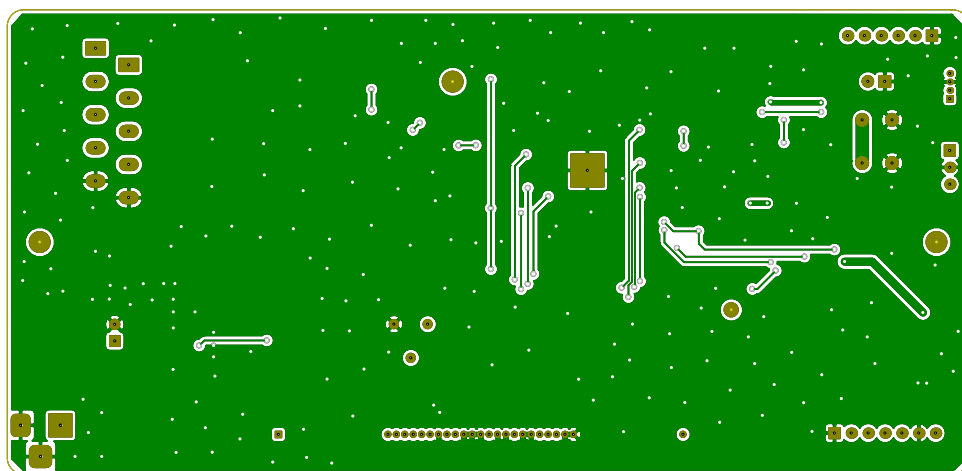
Skratka/symbol	Význam
AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
AP	Access Point
CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma-Separated Values
CZK	Česká koruna
DC	Direct Current
EDA	Electronic Design Automation
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
GND	GrouND
GPIO	General-Purpose Input/Output
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	HyperText Transport Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IR	InfraRed
LSB	Least Significant Bit
MCU	MicroController Unit
MEMS	MicroElectroMechanical System
MSB	Most Significant Bit
NDIR	NonDispersive InfraRed
NVS	Non-Volatile Storage
PCB	Printed Circuit Board
PIR	Passive InfraRed
RH	Relative Humidity
RTD	Resistance Temperature Detector
RX	Receiver
SPI	Serial Peripheral Interface
T	Temperature
TX	Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Dodatok B

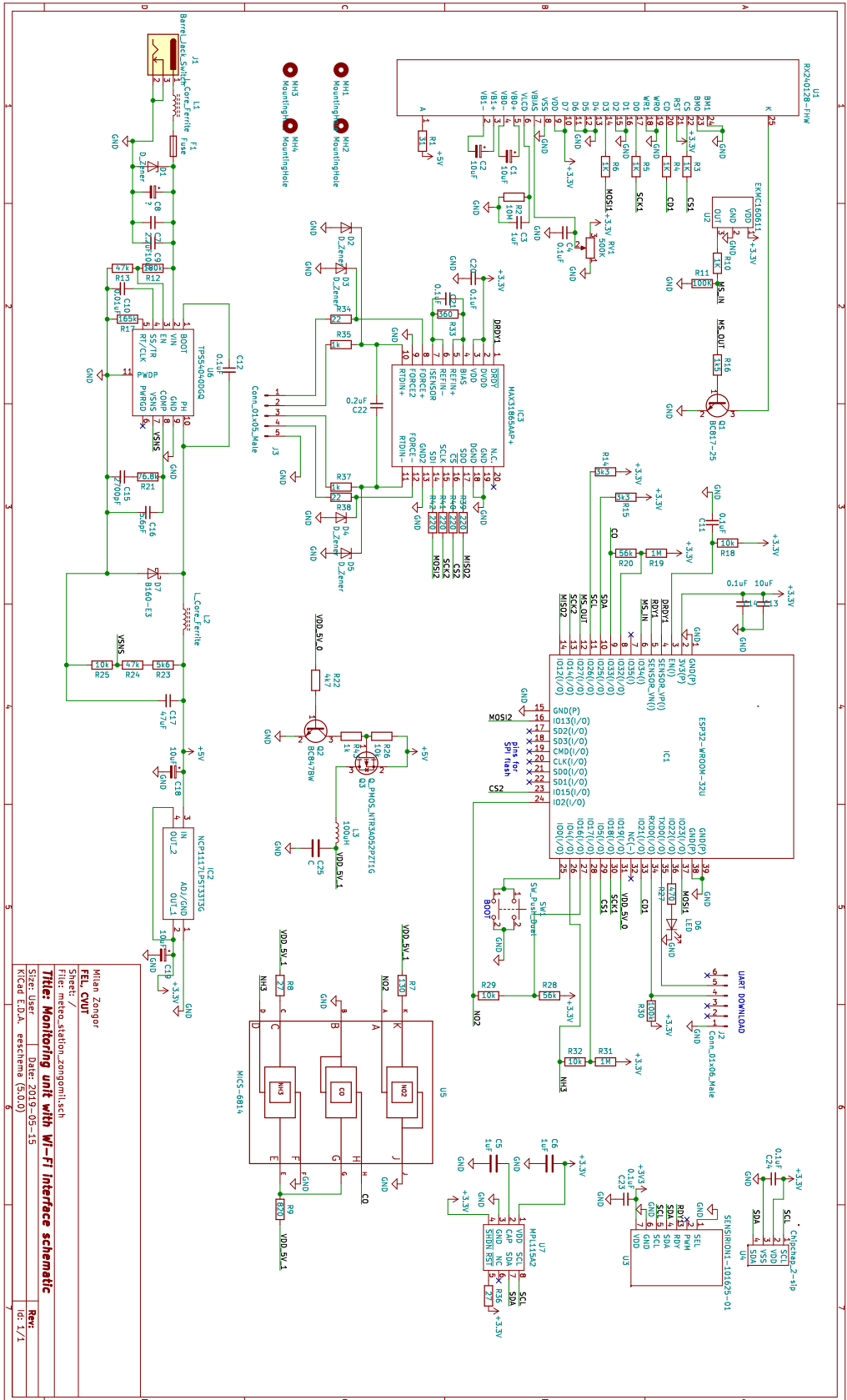
Obrázky



Obrázok B.1: Vrchná vrstva PCB



Obrázok B.2: Spodná vrstva PCB



Obrázok B.3: Celková schéma zapojenia monitorovacej jednotky prostredia

Dodatok C

Literatúra

- [1] AIRTEST TECHNOLOGIES, *CO2 Ventilation Control And Measurement Of Outside Air*. <https://www.airtesttechnologies.com/support/datasheet/CO2MeasurementAndOutsideAir.pdf> [Online; Navštívené: 2019-04-24].
- [2] BIGCLOWN, *CO2 Monitor Kit*. <https://shop.bigclown.com/co2-monitor-kit/> [Online; Navštívené: 2019-05-04].
- [3] CNX SOFTWARE, *ESP8266 and ESP32 Differences in One Single Table*. <https://www.cnx-software.com/2016/03/25/esp8266-and-esp32-differences-in-one-single-table/> [Online; Navštívené: 2019-04-08].
- [4] DIGI-KEY, *MPL115A2T1 NXP USA Inc*. <https://www.digikey.ca/product-detail/en/nxp-usa-inc/MPL115A2T1/MPL115A2T1CT-ND/2214799> [Online; Navštívené: 2019-05-07].
- [5] ESPRESSIF, *ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf [Online; Navštívené: 2019-04-14].
- [6] ESPRESSIF, *Set up the Toolchain*. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/get-started/index.html> [Online; Navštívené: 2019-05-05].
- [7] EURÓPSKY PARLAMENT, *Smernica európskeho parlamentu a rady 2010/31/EÚ z 19. mája 2010 o energetickej hospodárnosti budov*, (2010).
- [8] J. FRADEN, *Handbook of Modern Sensors*, Springer, 2004.
- [9] HW, *SCD30 je více než NDIR CO2 senzor*. <https://vyvoj.hw.cz/scd30-je-vice-nez-ndir-co2-senzor.html> [Online; Navštívené: 2019-05-07].
- [10] KEYESTUDIO, *Ks0052 keyestudio PIR Motion Sensor*. https://wiki.keyestudio.com/index.php/Ks0052_keyestudio_PIR_Motion_Sensor [Online; Navštívené: 2019-05-04].

- [24] SGX SENSORTECH, *MiCS-6814 datasheet*. https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf [Online; Navštívené: 2019-04-22].
- [25] TELAIRE, *ChipCap 2 Application Guide*. <https://www.amphenol-sensors.com/en/component/edocman/397-telaire-chipcap2-humidity-and-temperature-sensor-application-guide/viewdocument?Itemid=> [Online; Navštívené: 2019-04-08].
- [26] TELAIRE,, *ChipCap 2-SIP Humidity and Temperature Sensor*. <https://www.amphenol-sensors.com/en/component/edocman/220-chipcap-2-sip-datasheet/viewdocument?Itemid=> [Online; Navštívené: 2019-04-08].
- [27] TEXAS INSTRUMENTS, *TPS54040 0.5-A, 42-V Step Down DC/DC Converter with Eco-Mode*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54040.pdf> [Online; Navštívené: 2019-05-07].
- [28] J. VČELÁK ET AL., *Platforma pro monitoring vnitřního prostředí*, TZB-info, (2017).
- [29] V. ZÁHLAVA, *Návrh a konstrukce desek plošných spoju*, BEN, 2010.