

Bakalárska práca



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Návrh senzoru pro měření kvality vnitřního prostředí s LCD displejem a externím bezdrátovým čidlem

Martin Faltus

Vedúci: Ing. Jan Včelák, Ph.D.

Odbor: Kybernetika a robotika

Študijný program: Systémy a řízení

Máj 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Faltus** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **452770**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systemy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh senzoru pro měření kvality vnitřního prostředí s LCD displejem a externím bezdrátovým čidlem.

Název bakalářské práce anglicky:

IAQ sensor design with LCD display and wireless remote sensor

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navrhněte senzor kvality vnitřního prostředí, složený z upravené centrální jednotky IAQ_03 a dalšího externího čidla teploty a vlhkosti. Centrální jednotka bude vybavena LCD displejem a bezdrátovým rozhraním WiFi společně s dalším bezdrátovým IoT rozhraním s dlouhým dosahem.
- 2) Senzorovou platformu realizujte pomocí procesoru ESP32. Pro připojení externího senzoru ověřte možnost použití rozhraní ESP NOW.
- 3) Navrhněte potřebný HW a SW externího senzoru, navrhněte hardwarové a softwarové úpravy centrální jednotky IAQ_03 a zrealizujte a demonstруйте prototyp zařízení. Při návrhu externího senzoru berte na vědomí, že senzor bude napájen z baterie.

Seznam doporučené literatury:

Neil Kolban: Kolban's Book on ESP32, <https://leanpub.com/kolban-ESP32>
ESP32 - datasheet a specifikace
ESP-NOW examples a demo

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Včelák, Ph.D., UCEEB

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2019/2020

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

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
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

Chcel by som sa poďakovať predovšetkým môjmu školiteľovi Ing. Janovi Včelákovi, Ph.D. za poskytnuté konzultácie, cenné rady a možnosť realizovať moju prácu v UCEEB. Vďaka patrí aj Ing. Marekovi Maškovi a Ing. Alešovi Vodičkovi za mnoho nápadov a ochotu diskutovať o vylepšeniach systému. Ďakujem aj mojej rodine a kamarátom, ktorí ma podporovali počas štúdia.

Prehlásenie

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

V Prahe, 20. mája 2019

Abstrakt

Táto bakalárska práca pozostáva z dvoch hlavných častí.

Prvá časť sa venuje úprave centrálnej jednotky IAQ slúžiacej na monitorovanie kvality vnútorného ovzdušia (teploty, tlaku, relatívnej vlhkosti, koncentrácie CO₂, koncentrácie prchavých organických látok). Predmetom úpravy je vybavenie centrálnej jednotky farebným dotykovým LCD displejom a naprogramovanie obsluhy tohto displeja vrátane vytvorenia dizajnu užívateľského rozhrania.

Druhá časť obsahuje návrh technického riešenia a konštrukciu externého čidla na monitorovanie teploty a vlhkosti. Súčasťou práce je aj program externého čidla, ktorý zabezpečuje samotné meranie a tiež odosielanie nameraných dát do centrálnej jednotky IAQ. Externé čidlo je napájané dvomi batériami typu AA. Preto je kladený dôraz na minimalizáciu spotreby tohto zariadenia. V pravidelných časových intervaloch posiela bezdrôtovo, na frekvencii 2,4 GHz, namerané údaje prostredníctvom protokolu ESP-NOW do centrálnej jednotky IAQ. Bola vyhotovená funkčná vzorka externého čidla, na ktorej sa robili skúšobné merania.

Kľúčové slová: meranie kvality ovzdušia, ESP32, ESP-NOW, LCD displej, externé čidlo

Vedúci: Ing. Jan Včelák, Ph.D.

Abstract

The bachelor thesis consists of two parts.

The first part focuses on a modification of an IAQ central unit monitoring indoor air quality (temperature, pressure, relative humidity, CO₂ concentration, concentration of volatile organic compounds). The modification involves equipping the central unit with colour LCD touch display as well as programming the display along with designing its user interface.

The second part contains design of technical solution and construction of an external sensor for monitoring the temperature and humidity. The thesis also includes a program for an external sensor which takes care of measuring data and sending them to the IAQ central unit. The external sensor is powered by two AA batteries. Therefore, we focus on minimizing its energy consumption. The sensor utilizes ESP-NOW protocol for regular and wireless transmission of the data to the IAQ central unit at 2.4 GHz frequency. We develop a working sample of the external sensor for a demonstration.

Keywords: air quality measurement, ESP32, ESP-NOW, LCD display, external sensor

Title translation: IAQ sensor design with LCD display and wireless remote sensor

Obsah

1 Úvod	1		
2 Senzorická platforma IAQ	3		
2.1 Počiatočný stav centrálnej jednotky	3		
2.2 Motivácia ku zmenám senzorickej platformy	4		
3 Sensory dostupné na trhu	5		
3.1 NETATMO - Smart Home Weather Station	5		
3.2 HONEYWELL - IAQPoint2	5		
3.3 ARCHOS - Weather Station	6		
3.4 IQAir - AirVisual Pro	7		
3.5 Air Mentor Intelligence - Air Mentor 2	7		
3.6 Porovnanie výrobkov	8		
4 Implementácia displeja	9		
4.1 Hardvér	9		
4.1.1 Použitý displej	9		
4.1.2 Overenie funkčnosti displeja	9		
4.2 Vyhodnocovanie dotykov	10		
4.3 Firmvér obsluhy displeja	12		
4.3.1 Použitá knižnica	12		
4.3.2 Popis firmvéru	13		
4.4 Uživatelské rozhranie	14		
5 Externé čidlo	17		
5.1 Výber komponent	17		
5.1.1 Senzor teploty a vlhkosti	17		
5.1.2 Mikrokontrolér	18		
5.1.3 Výber modulu	18		
5.1.4 Napájací zdroj	18		
5.1.5 Minimalizácia spotreby externého čidla IAQ	19		
5.2 Výber krabičky	19		
5.3 Návrh schémy	20		
5.3.1 Prepäťová a nadprúdová ochrana	20		
5.3.2 Spínaný zdroj	21		
5.3.3 Časovač	22		
5.3.4 Snímač teploty a vlhkosti	23		
5.3.5 Modul ESP-WROOM-32	23		
5.3.6 Obvod na snímanie napätia batérií	24		
5.3.7 Kompletná schéma zapojenia	25		
5.4 Návrh plošného spoja	25		
5.4.1 Spodná strana plošného spoja	25		
5.4.2 Vrchná strana plošného spoja	25		
5.4.3 Elektromagnetická kompatibilita	26		
5.4.4 Výsledný plošný spoj	26		
5.5 Firmvér	28		
5.5.1 Komunikácia	28		
5.5.2 Firmvér centrálnej jednotky	30		
5.5.3 Firmvér externého čidla	30		
5.5.4 Proces párovania zariadení	32		
5.6 Uživatelské rozhranie	33		
5.7 Overenie funkčnosti senzora	34		
5.7.1 Párovanie a prenos údajov protokolom ESP-NOW	34		
5.7.2 Meranie teploty a vlhkosti	35		
5.7.3 Meranie spotreby energie	35		
5.7.4 Odhad výdrže na batérie	38		
5.8 Odporúčania pre ďalší vývoj	40		
6 ESP32	41		
6.1 Základná vlastnosti	41		
6.2 Bližší popis dôležitých častí	42		
6.2.1 Pamäť	42		
6.2.2 RTC blok	43		
6.2.3 GPIO	44		
7 ESP-NOW	45		
7.1 Popis rámca protokolu ESP-NOW	45		
7.2 Použitie protokolu ESP-NOW	46		
7.3 Obmedzenia	47		
8 Záver	49		
A Literatúra	51		
B Kompletná schéma externého čidla	55		
C Obsah priloženého CD	57		

Obrázky

2.1	Centrálna jednotka IAQ zvnútra	4	5.16	Výsledná podoba externého čidla v krabičke	34
3.1	Smart Home Weather Station	6	5.17	Graf porovnania teploty a vlhkosti	36
3.2	IAQPoint2	6	5.18	Priebeh spotreby prúdu v aktívnom stave	37
3.3	ARCHOS Weather Station	7	5.19	Priebeh napätia v aktívnom stave	38
3.4	AirVisual Pro	7	5.20	Napätie batérie externého čidla	39
3.5	Air Mentor 2	8	5.21	Vybíjacia charakteristika	39
4.1	Displejový modul	10	6.1	Bloková schéma ESP32	43
4.2	Štruktúra rezistívnej dotykovej plochy	11	7.1	Štruktúra rámca ESP-NOW	46
4.3	Princíp určovania polohy dotykov	11			
4.4	Bloková schéma firmvéru obsluhy displeja	13			
4.5	Výsledná podoba centrálnej jednotky IAQ s LCD displejom	14			
4.6	Ukážka užívateľského rozhrania displeja	15			
5.1	Krabička externého čidla po úpravách	20			
5.2	Schéma zapojenia ochranných prvkov	21			
5.3	Schéma zapojenia spínaného zdroja	22			
5.4	Schéma zapojenia externého časovača	23			
5.5	Schéma zapojenia senzora SHT31	23			
5.6	Schéma zapojenia modulu ESP-WROOM-32	24			
5.7	Schéma zapojenia napätového deliča	25			
5.8	Vrchná strana spojov	26			
5.9	Spodná strana spojov	27			
5.10	Vizualizácia výsledného plošného spoja	27			
5.11	Výsledná podoba plošné spoja	28			
5.12	Štruktúra správy na posielanie zmeraných údajov	29			
5.13	Štruktúra správy určenej na párovanie	30			
5.14	Zjednodušená logická schéma firmvéru centrálnej jednotky pre obsluhu externého čidla	31			
5.15	Blokové schéma firmvéru externého čidla	33			

Tabuľky

3.1 Základné parametre senzorov dostupných na trhu	8
---	---

Kapitola 1

Úvod

V dnešnej dobe sa stále častejšie začína riešiť nielen znečistenie vonkajšieho prostredia ale aj kvalita vnútorného prostredia v budovách. Hlavným dôvodom je predovšetkým fakt, že mnohí ľudia strávia až 90% života vo vnútornom prostredí [1]. Preto sa kvalita vnútorného prostredia môže výrazne prejavíť na zdravotnom stave jedinca.

Zdravotné problémy spôsobené nevhodnou kvalitou vnútorného prostredia sa zvyknú označovať spoločným názvom Syndróm nezdravých budov („Sick Building Syndrome“ SBS). Na základe tvrdení Svetovej Zdravotníckej Organizácie (WHO) trpelo týmito problémami vo vyspelých krajinách v roku 2014 približne 80% populácie [2].

Medzi základné parametre, ktoré ovplyvňujú kvalitu vnútorného prostredia sa zvyknú zaraďovať akustické a svetelné podmienky, kvalita vnútorného ovzdušia, ale aj samotná dispozícia budovy. Pre dosiahnutie maximálneho komfortu je potrebné tieto parametre udržiavať v určitých rozsahoch.

Na výslednom komforte sa významne podieľa kvalita vnútorného ovzdušia ktorá pozostáva z viacerých zložiek ako napríklad teploty, vlhkosti, koncentrácie CO₂ a koncentrácie prachových častíc. Väčšina týchto veličín sa vďaka moderným technológiám dá pomerne ľahko merať a následne vhodne regulovať [3].

K zhoršeniu kvality vnútorného ovzdušia často dochádza po rekonštrukciách budov, kedy sa kladie hlavný dôraz na znižovanie energetickej náročnosti, ale neberie sa do úvahy, že týmito opatreniami sa zníži prirodzená výmena vzduchu vo vnútri budov.

Zvýšený dôraz na kvalitu vnútorného ovzdušia by sa taktiež mal klásť v moderných (kancelárskych) budovách, kde často pracuje veľké množstvo ľudí v jednom spoločnom priestore (tzv. „openspace“). V takýchto priestoroch je častokrát jediný spôsob výmeny vnútorného vzduchu zabezpečený prostredníctvom vzduchotechniky. Táto vzduchotechnika by mala byť vhodne navrhnutá, aby ľudí neobmedzovala, ale zároveň dokázala udržať všetky potrebné parametre v komfortných medziach. Pre účinné a energeticky efektívne fungovanie výmeny vzduchu je potrebné vedieť nielen parametre vnútorného, ale aj vonkajšieho ovzdušia. Tieto informácie sú využiteľné aj v priestoroch bez vzduchotechniky, kedy môžu slúžiť na upozornenie ľudí nachádzajúcich sa v takomto prostredí na nevhodné parametre vnútorného ovzdušia.

Kapitola 2

Senzorická platforma IAQ

Na monitorovanie parametrov vnútorného ovzdušia vznikla v UCEEB (Univerzitné Centrum Energeticky Efektívnych Budov) Senzorická platforma IAQ (Indoor Air Quality), ako reakcia na potrebu mať k dispozícii vyhovujúci a cenovo dostupný prístroj na monitorovanie ovzdušia, ktorý by zároveň dokázal komunikovať s okolím a prípadne ovládať zariadenia na úpravu ovzdušia. Prvá verzia tohto zariadenia vznikla ako výsledok diplomovej práce Ing. Vojtěcha Skřivánka pod vedením Ing. Vladimíra Horyny v roku 2016 [4].

Moja bakalárska práca vychádza z najnovšej verzie senzorickej platformy kvality vnútorného ovzdušia IAQ (viz. obrázok 2.1), ktorá vznikla v roku 2018 ako výsledok diplomovej práce Ing. Jana Mrňu pod vedením Ing. Jana Včeláka, Ph.D. [5].

V nasledujúcom texte sa bude pre označenie Senzorickej platformy IAQ používať názov centrálna jednotka.

2.1 Počiatkový stav centrálnej jednotky

Jedná sa o samostatné zariadenie, ktoré disponuje senzormi na meranie parametrov kvality ovzdušia. Poskytuje komunikačné rozhrania, ako pre informovanie používateľa, tak aj na ovládanie zariadení regulujúcich vnútorné ovzdušie.

Zariadenie je vybavené senzorom na meranie teploty a vlhkosti vzduchu, optickým NDIR¹ senzorom koncentrácie CO₂, kombinovaným senzorom určeným primárne na meranie atmosférického tlaku a VOC² a senzorom intenzity okolitého svetla. Taktiež je zariadenie možné dovybaviť optickým senzorom na meranie koncentrácie prachových častíc PM₁₀ a PM_{2,5}³.

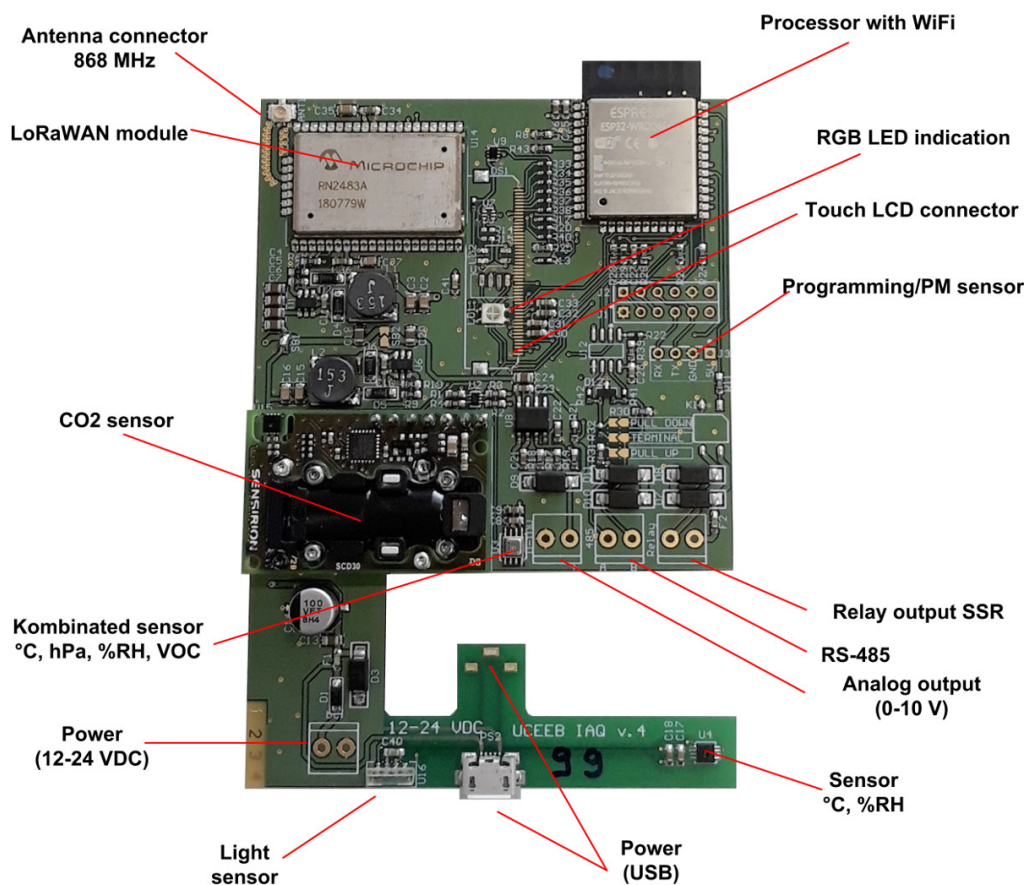
Ako hlavná riadiaca jednotka je použitý procesorový modul ESP-WROOM-32 so zabudovaným bezdrôtovým Wi-Fi rozhraním, pomocou ktorého sa zariadenie pripája do lokálnej siete a umožňuje užívateľovi prezeráť si merané dáta vo webovom rozhraní. Základný údaj o aktuálnej koncentrácii CO₂ v miestnosti je taktiež indikovaný pomocou zabudovanej RGB LED. Zariadenie môže byť vybavené LoRaWAN modulom s veľkým dosahom aby bolo možné

¹Nedisperzní infračervený (senzor)

²Prchavé organické zlúčeniny (Volatile organic compound)

³PM_{xx} Pevné častice (particulate matter) s rozmerom do xx μm

zbierať merané dáta nezávisle na kvalite Wi-Fi pokrytia. Medzi štandardné drôtové rozhrania zariadenia patrí analógový výstup 0-10V, sériové komunikačné rozhranie RS485 a výstup na spínanie relé. Napájanie je zabezpečené pomocou Micro USB konektora alebo externým napájaním 12-24 VDC.



Obrázok 2.1: Centrálna jednotka IAQ zvnútra. Zdroj: uceeb.cz

2.2 Motivácia ku zmenám senzorickej platformy

Z praktického hľadiska sa ukazuje výhodné vybaviť centrálnu jednotku IAQ dotykovým displejom aby bolo možné ľahko, rýchlo a exaktne prezeráť všetky namerané dáta bez nutnosti pripájať sa na webové rozhranie. Dotykové rozhranie displeja tiež umožňuje vykonávať základné nastavenia priamo na senzore. S osadením LCD dotykového displeja sa počítalo už od začiatku návrhu IAQ senzora, a preto po hardvérovej stránke konektor na pripojenie displeja na dosku už existoval, avšak nebol nikdy odskúšaný.

K vytvoreniu externého čidla teploty a vlhkosti vedie motivácia poskytnúť užívateľovi údaje aj o stave vonkajšieho prostredia. Tieto údaje sú rovnako nevyhnutné pre ekologické a energeticky efektívne riadenie vzduchotechniky budov.

Kapitola 3

Senzory dostupné na trhu

Na trhu dnes existuje veľké množstvo senzorov na meranie kvality vnútorného ovzdušia. Líšia sa veličinami, ktoré sú schopné merať, ale taktiež aj spôsobom interakcie s užívateľom, prípadne s ďalšími zariadeniami. Pre potreby následného porovnania v tejto kapitole uvediem niektoré aktuálne dostupné senzory na trhu.

3.1 NETATMO - Smart Home Weather Station

Zariadenie v základnej sade pozostáva z vnútornej a vonkajšej jednotky (viď obr. 3.1). Vnútrná jednotka meria teplotu, vlhkosť, atmosférický tlak, koncentráciu CO₂ a úroveň okolitého hluku. Pomocou zabudovanej LED je schopná farebne indikovať aktuálnu hladinu CO₂ v miestnosti. Disponuje Wi-Fi rozhraním pomocou ktorého sa pripája do lokálnej siete. Namerané dáta sa posielajú do cloudu výrobcu, kde si ich následne môže užívateľ prezerat pomocou mobilnej aplikácie alebo vo webovom rozhraní. Vonkajšia jednotka je schopná merať teplotu a vlhkosť. Zdrojom energie pre vonkajšiu jednotku sú 2 AA batérie. Jednotky navzájom komunikujú bližšie nešpecifikovaným bezdrôtovým rozhraním s deklarovaným dosahom 100 metrov na voľnom priestranstve. K základnej sade je možné dokúpiť ďalšie bezdrôtové jednotky na meranie teploty a vlhkosti, množstva zrážok a rýchlosti vetra [6].

3.2 HONEYWELL - IAQPoint2

Zariadenie pozostáva z jednej jednotky, ktorá sa vyrába vo viacerých vyhotoveniach. Jednotka štandardne meria teplotu, vlhkosť a jednu ďalšiu veličinu CO₂ alebo VOC index. Môže byť dodávaná s farebným LCD dotykovým displejom na ktorom sa zobrazujú namerané dáta alebo bez displeja (viď obr. 3.2). Okrem displeja je možné zariadenie vybaviť aj jedným z nasledujúcich komunikačných rozhraní: prúdový alebo napäťový analógový výstup, digitálne výstupy Modbus RTU/BACnet, LonWorks. Okrem týchto rozhraní je možný aj výstup zo spínacieho relé [7].



Obrázok 3.1: Smart Home Weather Station. Zdroj: netatmo.com



Obrázok 3.2: IAQPoint2. Zdroj: honeywellanalytics.com

3.3 ARCHOS - Weather Station

Zariadenie pozostávajúce z troch jednotiek a to z vnútornej, vonkajšej a jednotky na meranie stavu pôdy. Vnútorňá jednotka disponuje senzormi na meranie teploty, vlhkosti, atmosférického tlaku, koncentrácie CO₂ a úrovne okolitého hluku. Pomocou farebnej LED je schopná indikovať aktuálnu úroveň koncentrácie CO₂. Jednotka je pripojená do lokálnej siete pomocou Wi-Fi rozhrania. Nameraná dáta sa posielajú do cloudu výrobcu, kde si ich následne môže užívateľ prezerať pomocou mobilnej aplikácie. Vonkajšia jednotka je napájaná z dvoch AA batérii, má senzory na meranie teploty a vlhkosti. Jednotka na meranie stavu pôdy je napájaná pomocou dvoch CR2032 batérii, meria teplotu a vlhkosť pôdy. Vonkajšie jednotky komunikujú s centrálnou vnútornou jednotkou pomocou bližšie nešpecifikovaného bezdrôtového rozhrania [8].



Obrázok 3.3: ARCHOS Weather Station. Zdroj: archos.com

3.4 IQAir - AirVisual Pro

Zariadenie pozostáva z jednej jednotky ktorá je primárne určená na vnútorné použitie. Má zabudovanú batériu, ktorá slúži na preklenutie výpadkov elektriny. Štandardne je napájaná cez USB port. Je vybavená senzormi na meranie teploty, vlhkosti, koncentrácie CO₂ a množstva prachových častíc PM_{2,5}. Merané údaje sa zobrazujú na farebnom LCD displeji. Jednotka taktiež disponuje Wi-Fi rozhraním. Vďaka Wi-Fi pripojeniu je možné merané dáta sledovať aj v mobilnej aplikácii prípadne na počítači a taktiež umožňuje na displeji jednotky zobrazit údaje o stave vonkajšieho ovzdušia. Tieto údaje sa získavajú z komunitnej siete užívateľov, ktorí umiestnili svoje jednotky do vonkajšieho prostredia [9].



Obrázok 3.4: AirVisual Pro. Zdroj: airvisual.com

3.5 Air Mentor Intelligence - Air Mentor 2

Zariadenie pozostáva z jednej vnútornej jednotky, ktorá je vybavená senzormi na meranie teploty, vlhkosti, koncentrácie CO₂, TVOC a množstvo prachových častíc PM_{2,5} a PM₁₀. Aktuálny stav ovzdušia je indikovaný prostredníctvom zabudovanej farebnej LED. Zariadenie je vybavené komunikačnými rozhraniami Bluetooth a Wi-Fi, prostredníctvom ktorej odosiela namerané údaje do cloudu výrobcu kde si ich môže užívateľ následne zobrazit pomocou mobilnej aplikácie [10].



Obrázok 3.5: Air Mentor 2. Zdroj: air-mentor.eu

3.6 Porovnanie výrobkov

V nasledujúcej tabuľke sú prehľadne zobrazené základné vlastnosti senzorov dostupných na trhu.

	NETATMO	HONEY- WELL	ARCHOS	IQAir	Air Mentor
Teplota	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
Vlhkosť	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
Atmosféricky tlak	Áno	Nie	Áno	Nie	Nie
CO2	Áno	Áno*	Áno	Áno	Áno
VOC	Nie	Áno*	Nie	Nie	Áno
Prachové častice	Nie	Nie	Nie	Áno	Áno
Intenzita hluku	Áno	Nie	Áno	Nie	Nie
Wi-Fi	Áno	Nie	Áno	Áno	Áno
Modbus RTU	Nie	Áno	Nie	Nie	Nie
Relé výstup	Nie	Áno	Nie	Nie	Nie
Analógový výstup	Nie	Áno	Nie	Nie	Nie
Webové rozhranie	Áno	Nie	Áno	Áno	Áno
Displej	Nie	Áno	Nie	Áno	Nie
Externé čidlo	Áno	Nie	Áno	Nie	Nie
Približná cena	4 700 Kč	Od 9 202 Kč	Neznáma	6 921 Kč	9 314 Kč

* Zariadenie môže byť vybavené len jedným zo senzorov.

Ceny sú uvedené podľa kurzového prepočtu zo dňa 7. 5. 2019.

Tabuľka 3.1: Základné parametre senzorov dostupných na trhu

Kapitola 4

Implementácia displeja

Prvou časťou mojej bakalárskej práce je doplniť existujúcu centrálnu jednotku IAQ o farebný dotykový LCD displej, ktorý má slúžiť ako alternatíva k jednoduchšej indikácii stavu ovzdušia pomocou RGB LED. Užívateľovi by poskytoval presné informácie o stave ovzdušia a umožňoval vykonávať nastavenie zariadenia prostredníctvom dotykového rozhrania. S možnosťou rozšíriť senzorickú platformu IAQ o displej sa počítalo už pri prvotnom návrhu Ing. Jana Mrňu, ktorý vybral konkrétny typ displeja a taktiež zapracoval jeho zapojenie do hardvérového návrhu senzorickej platformy. Funkčnosť zapojenia displeja však nikdy nebola overená. Potrebné bolo teda overiť správnosť hardvérového zapojenia a napísať softvér k obsluhu LCD displeja.

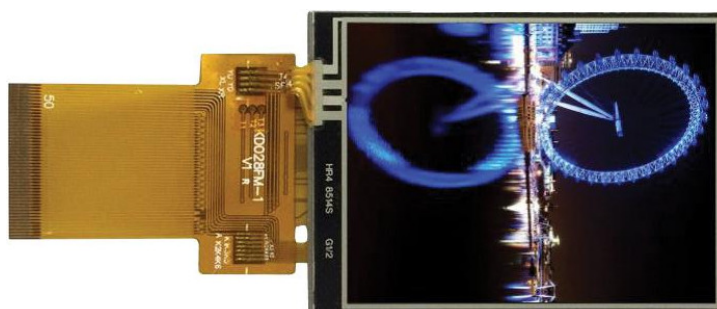
4.1 Hardvér

4.1.1 Použitý displej

Vybraný displej má typové označenie MCT028D0TW240320PMLIPS. Jedná sa o farebný TFT (Thin Film Transistor) LCD displej s veľkosťou 2,8" a rozlíšením 240 x 320 pixelov [11] (viď obr. 4.1). Súčasťou zobrazovacej jednotky je aj zabudovaný riadiaci integrovaný obvod ST7789V slúžiaci na samotnú obsluhu displeja [12]. Tento riadiaci obvod disponuje viacerými rozhraniami pre komunikáciu z ktorých už v pôvodnej verzii centrálnej jednotky bolo vybrané rozhranie SPI. Na účely podsvietenia zobrazovacej plochy je v displeji zabudovaných šesť bielych LED diód. Displej je na povrchu vybavený rezistívnou dotykovou plochou so štvor-vodičovým komunikačným rozhraním. Celá zobrazovacia jednotka sa pripája pomocou 50 vodičového flexibilného plochého kábla.

4.1.2 Overenie funkčnosti displeja

Ako prvé bolo potrebné overiť funkčnosť už existujúceho hardvérového zapojenia displeja. Samotná zobrazovacia časť komunikujúca cez SPI zbernicu fungovala bez problémov. Tento typ displeja neobsahuje integrovaný obvod na vyhodnocovanie dotykov, a teda túto funkčnosť musí zabezpečiť užívateľ externe. Pre vyčítanie dotyku sú potrebné štyri piny mikrokontroléra,



Obrázok 4.1: Displejový modul MCT028D0TW240320PMLIPS. Zdroj: far-nell.com

z ktorých musia aspoň 2 fungovať ako vstup pre AD prevodníky a zároveň všetky štyri ako digitálny výstup (bližšie viď vyhodnocovanie dotykov 4.2). Pri testovaní som zistil, že na pôvodnej verzii senzorickej platformy sú dva z použitých pinov mikrokontroléra iba vstupné a preto bolo nutné zabezpečiť pripojenie týchto vodičov na iné piny mikrokontroléra. Toto bolo zabezpečené pri plánovanom redizajne senzorickej platformy.

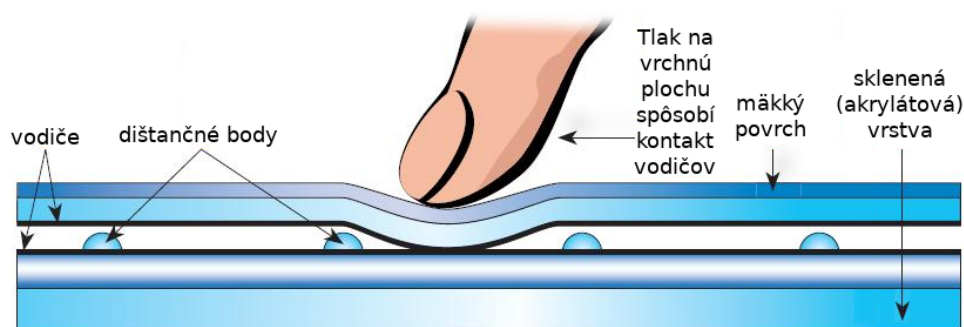
4.2 Vyhodnocovanie dotykov

Keďže tento displej neobsahuje integrovaný obvod na vyhodnocovanie dotykov, bolo potrebné túto časť implementovať do hlavnej riadiacej jednotky. Preto v nasledujúcej časti podrobnejšie popíšem ako prebieha proces vyhodnotenia dotyku na rezistívnom displeji a ako som tento proces implementoval v programe na obsluhu displeja.

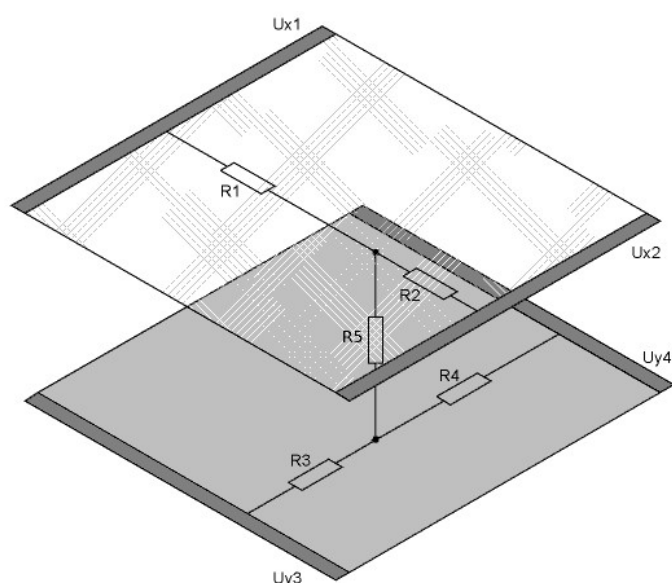
Rezistívna dotyková plocha pozostáva z dvoch priehľadných vrstiev, ktoré sú vzájomne oddelené vzduchovou medzerou. Obe vrstvy sú pokryté tenkou priehľadnou vodivou vrstvou s definovaným odporom, ktorý by mal byť rovnomerný naprieč celou plochou. Aby nedochádzalo k náhodnému spojeniu týchto vrstiev nachádzajú sa medzi nimi nevodivé zrnká oddelovača. Spodná vrstva pozostáva z neohybného materiálu zvyčajne skla alebo akrylátu. Vrchná vrstva musí byť vytvorená z ohybného plastu, ktorý sa dotykom deformuje a tak vytvorí vodivé spojenie medzi vrstvami (viď obrázok 4.2).

Použitý displej využíva štvor-vodičové zapojenie dotykovej plochy čo znamená, že každá vrstva má na dvoch protilahlých stranách elektródy z ktorých sú vyvedené vodiče. Na spodnej a vrchnej vrstve sú elektródy na stranách voči sebe otočených o 90° . Pri stlačení vrchnej vrstvy displeja dochádza k jej deformácii čím vzniká vodivé spojenie so spodnou vrstvou. V mieste dotyku horná vrstva rozdelí spodnú vrstvu na dva odpory v sérii a obdobne spodná vrchnú (viď obrázok 4.3)

Proces vyhodnocovania dotyku prebieha v dvoch častiach, kde je ako prvé potrebné vyhodnotiť či došlo k dotyku a následne určiť jeho polohu. Pri popise budem využívať označenia z obrázku 4.3. Pri procese určovania či došlo k dotyku sa nastaví napätie na elektróde U_{x1} na 0V a elektróda U_{y4} sa



Obrázok 4.2: Štruktúra rezistívnej dotykovej plochy. Zdroj: zive.cz



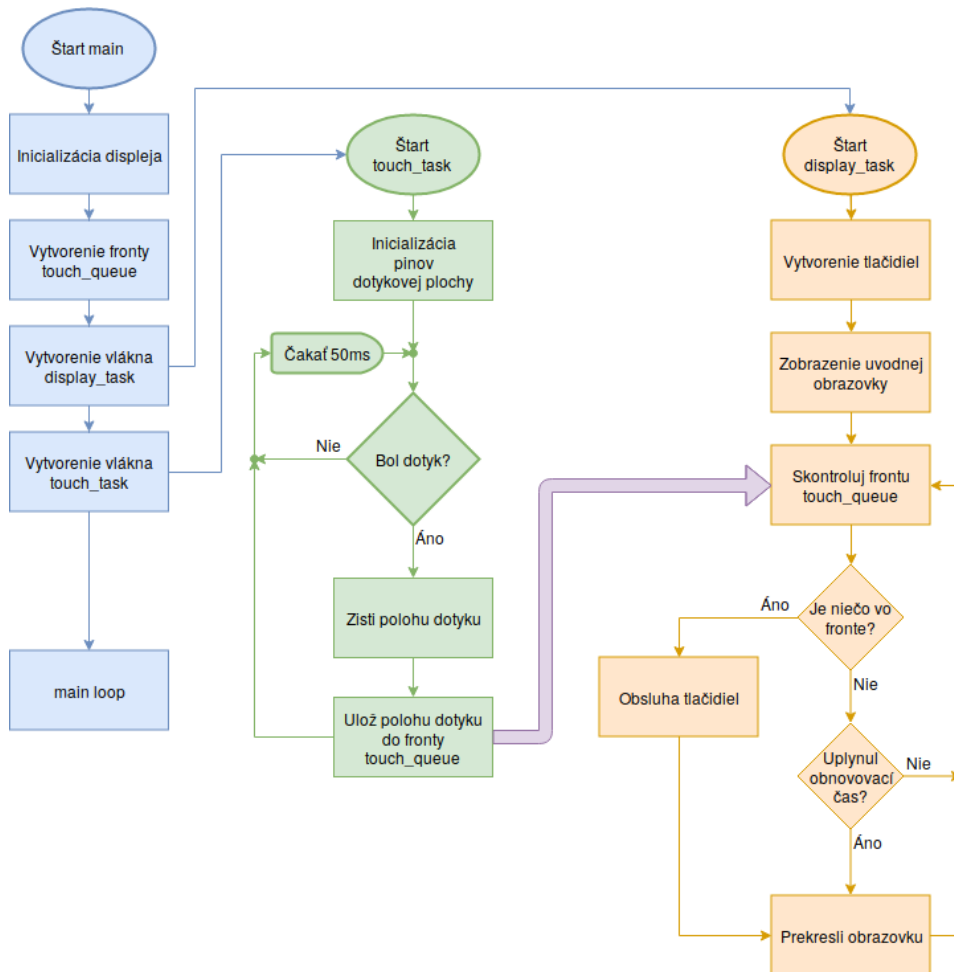
Obrázok 4.3: Princíp určovania polohy dotykov. Zdroj: wikipedia.org

nastaví na napätie logickej jednotky. Z elektród U_{x2} a U_{y3} sa pomocou AD prevodníkov sníma aktuálna hodnota napätia a matematicky sa vypočítava rozdiel $U_{y3} - U_{x2}$. Za predpokladu, že k dotyku nedošlo vypočítaná hodnota bude blízka logickej jednotke, lebo na elektróde U_{x2} bude napätie blízke 0V a na elektróde U_{y3} bude hodnota blízka logickej jednotke. Pri stlačení dotykovej plochy a vytvorení kontaktu medzi vrstvami sa napätia merané na elektródach U_{x2} a U_{y3} zmenia v pomere odporov R_1 , R_4 a R_5 , pričom odpor R_5 predstavuje prechodový odpor medzi vrstvami a jeho veľkosť závisí od sily stlačenia a plochy, na ktorej sa tieto dve vrstvy dotýkajú. Hodnoty odporov R_2 a R_3 je možné zanedbať lebo vstupný odpor AD prevodníkov je podstatne väčší. Rozdiel napätí U_{y3} a U_{x2} je priamo úmerný veľkosti odporu R_5 a teda indikuje prítomnosť dotyku ale aj jeho silu.

Určenie polohy miesta dotyku sa uskutočňuje v dvoch krokoch, pre každú súradnicu zvlášť. Pri zisťovaní X-ovej súradnice sa na elektródu U_{x1} privedie napätie 0V a na elektródu U_{x2} napätie logickej jednotky. Poloha v smere osi

4.3.2 Popis firmvéru

V nasledujúcom texte bližšie popíšem časť firmvéru, ktorá slúži na obsluhu displeja a jej zjednodušená bloková schéma je na obrázku 4.4. Pri štarte programu sa z hlavného vlákna najprv inicializuje displej, zobrazí sa na ňom logo inštitúcie a vytvorí sa fronta `touch_queue` na prenos dát medzi vláknami obsluhy displeja. Následne dochádza k samotnému vzniku vlákien obsluhy dotykovej plochy a zobrazovacej časti displeja.



Obrázok 4.4: Bloková schéma firmvéru obsluhy displeja

Vlákno obsluhy dotykovej plochy `touch_task` pri svojom vzniku inicializuje piny mikrokontroléra potrebné na obsluhu dotykovej plochy a začne v periodických intervaloch zisťovať či nedošlo k dotyku. Ak intenzita dotyku prekročí nastavenú medznú hranicu vlákno zistí presnú polohu kde k dotyku došlo, prepočíta ju do súradnicového systému displeja a uloží súradnice do fronty. Aby sa predišlo falošnému vyhodnoteniu na zákmity dotyku vodivých vrstiev musí byť minimálna doba medzi dotykmi 150 ms.

Vlákno obsluhy zobrazovacej plochy `display_task` pri svojom vzniku nastaví intenzitu podsvietenia displeja na základe intenzity okolitého svetla,

naplní dátové štruktúry jednotlivých tlačidiel vrátane akcií, ktoré sa majú vykonať pri ich stlačení a vykreslí základnú obrazovku. Ďalší priebeh programu vo vlákne je podmienený tým, či sa vo fronte nachádzajú nejaké dáta. Ak v nej žiadne dáta nie sú, vlákno sa vykonáva iba raz za 10 sekúnd aby bolo zabezpečené vykreslenie aktuálnych meraných údajov a zmena intenzity podsvietenia podľa okolitého svetla. Medzitým vlákno nijako neblokuje mikrokontrolér a môžu bežať ostatné úlohy. Ak sa vo fronte objavia dáta o dotyku, vlákno reaguje okamžite a je otestované či sa poloha dotyku zhoduje s polohou niektorého z aktívnych tlačidiel. Pri zhode sa vykoná akcia pridelená danému tlačítku a následne sa displej prekreslí novými dátami.



Obrázok 4.5: Výsledná podoba centrálnej jednotky IAQ s LCD displejom

4.4 Uživatelské rozhranie

Po zapnutí senzorká platforma nabehne do základnej obrazovky, kde sú zobrazené všetky merané veličiny. Uživatelské rozhranie pozostáva z viacerých obrazoviek medzi ktorými sa užívateľ prepína ťuknutím na pravú polovicu obrazovky pre posun doprava, alebo ľavú polovicu pre posun doľava. Poradie jednotlivých obrazoviek ako aj indikácia aktuálne zobrazenej obrazovky je znázornené ikonami v spodnej časti displeja. Na nasledujúcich obrazovkách sú postupne zobrazené jednotlivé merané veličiny vo veľkom formáte aby boli ľahko čitateľné aj z väčšej vzdialenosti. Použité symboly meraných veličín v niektorých prípadoch zmenou svojej farby indikujú hodnotu meranej veličiny. Jedna z obrazoviek slúži na kontrolu stavu senzoru a jeho nastavovanie. Tu je možné prezerať základné informácie o zariadení ako jeho názov, verziu firmvéru, stav Wi-Fi pripojenia a stav externého čidla. Nastaviť je možné

automatické posúvanie medzi jednotlivými obrazovkami, rozsah jasú podsvietenia displeja, prepnúť zariadenie do Wi-Fi AP (access point) módu a spárovať alebo zrušiť spárovanie s externým čidlom.



Obrázok 4.6: Ukážka užívateľského rozhrania displeja

Kapitola 5

Externé čidlo

Druhou časťou mojej bakalárskej práce bolo navrhnuť, vyrobiť a sprevádzkovať externé čidlo monitorovania vybraných parametrov ovzdušia. Podľa požiadaviek toto čidlo má merať teplotu a vlhkosť prostredia. Následne odovzdávať tieto údaje na ďalšie spracovanie a zobrazenie upravenej centrálnej jednotke IAQ. Ako komunikačný kanál bol zvolený bezdrôtový (rádiový) prenos s využitím ESP-NOW hlavne preto, aby umiestnenie čidla nebolo komplikované a limitované nutnosťou ťahať drôtové pripojenie. Tým je dané obmedzenie, že externé čidlo musí disponovať vlastným zdrojom elektrickej energie. Po zvážení všetkých pre a proti boli ako zdroj elektrickej energie vybrané 2 kusy AA batérií predovšetkým pre ich ľahkú dostupnosť pre bežného užívateľa a vysokú bezpečnosť týchto článkov. Keďže sa počíta, že externé čidlo bude v prevažnej väčšine prípadov umiestnené v exteriéri, musí byť tomu prispôsobený aj návrh mechanickej konštrukcie.

Z týchto základných bodov som vychádzal pri výbere vhodných elektronických a mechanických komponentov a návrhu samotného externého senzora.

5.1 Výber komponent

V tejto časti sa budem venovať zdôvodneniu výberu jednotlivých hlavných komponent a tiež popisu základných vlastností a parametrov týchto dielov.

5.1.1 Senzor teploty a vlhkosti

Podľa zadania má externé čidlo IAQ merať teplotu a relatívnu vlhkosť. Na toto meranie som použil kombinovaný senzor Sensirion SHT31. Taký istý senzor je použitý aj v centrálnej jednotke IAQ, kde sa osvedčil. Použitie rovnakého typu senzora uľahčuje porovnávanie nameraných hodnôt teploty a vlhkosti medzi centrálnou jednotkou a externým čidlom, lebo by sa mali odlišovať iba výrobnými toleranciami a nie je potrebná iná korekcia. Výhoda je aj to, že pre tento senzor už je pripravená programová knižnica na vyčítanie nameraných hodnôt. Senzor má široký rozsah napájacieho napätia od 2,4 do 5,5 V. Na komunikáciu využíva zbernicu I2C, pričom adresa je voliteľná medzi 0x44 alebo 0x45 a to napätovou úrovňou na pine ADDR. Hodinová frekvencia (SCL) je voliteľná a môže byť až 1000 kHz. Výrobná špecifikácia

udáva typickú spotrebu pri meraní 0,8 mA a maximálnu spotrebu 1,5 mA. Maximálna tolerancia pre meranie teploty je +/- 0,4 °C a to v rozsahu teplôt od -40 po +80 °C. Maximálna tolerancia merania relatívnej vlhkosti je +/- 2 %RH a to v rozsahu 0 až 80 %RH. Mechanické rozmery senzora sú 2,5 x 2,5 x 0,9 mm [16].

■ 5.1.2 Mikrokontrolér

Hlavný aspekt, ktorý ovplyvnil výber mikrokontroléru pre externé čidlo bol spôsob komunikácie s centrálnou jednotkou. V zadaní bakalárskej práce je napísané, že má byť overená možnosť použitia komunikačného rozhrania ESP-NOW. Použitie tohto rozhrania vychádza predovšetkým z možností komunikácie, ktoré poskytuje centrálna jednotka IAQ, bez nutnosti ďalších hardvérových úprav. Aby bolo možné použiť komunikačné rozhranie ESP-NOW musí aj externý senzor obsahovať riadiacu jednotku od firmy Espressif, nakoľko toto rozhranie funguje iba medzi ich produktami.

Preto bola pre externé čidlo vybraná platforma ESP32 ako riadiaci mikrokontrolér, keďže špecifikácie plne postačujú potrebám externého čidla IAQ. Podrobnejší popis ESP32 sa nachádza v kapitole 6.

■ 5.1.3 Výber modulu

Nakoľko samotný integrovaný obvod ESP32 má veľmi malé rozmery iba 5x5 mm a taktiež pre jeho správnu funkciu je potrebné k nemu dodať ešte ďalšie periférne komponenty vrátane antény je jeho praktické použitie osamote náročnejšie. Aj z tohto dôvodu sú na trhu dostupné moduly s integrovaným obvodom ESP32, flash pamäťou a potrebnými pasívnymi periférnymi komponentami. Medzi tieto komponenty patria filtračné kondenzátory, pull-up a pull-down rezistory, ale aj impedančné prispôsobenie medzi integrovaným obvodom a anténou vo forme π - článku. Existujú moduly s PIFA anténou priamo umiestnenou na PCB, ale aj moduly s U.FL konektorom na pripojenie externej antény [17].

Pre externý senzor bol vybraný modul ESP32-WROOM-32 s integrovanou anténou na PCB [18]. Tento modul bol vybraný z dôvodu, že sa používa aj v centrálnej jednotke IAQ a teda bola jeho funkčnosť a spoľahlivosť už dostatočne overená.

■ 5.1.4 Napájací zdroj

Aby bolo možné napájať externé čidlo pomocou dvoch AA batérii bolo nevyhnutné zabezpečiť zvýšenie a stabilizovanie napájacieho napätia na 3,3 V pre potreby mikrokontroléra a ostatných obvodov. Zo snahy udržiavať štandardné napájacie napätie pre elektroniku aj pri starnutí batérii a maximalizovať účinnosť zdroja vyplynulo použitie step-up (boost) SMPS (switch-mode power supply) regulátora.

Na základe porovnania špecifikácii viacerých step-up regulačných obvodov som vytypoval a použil integrovaný obvod TPS61016 High-Efficiency, 1-Cell

and 2-Cell Boost Converter od firmy Texas Instruments, ktorý je priamo určený na napájanie IoT zariadení z batérií [19]. Podľa výrobných špecifikácií je tento obvod s niekoľkými vonkajšími súčiastkami schopný dodávať výstupné napätie 3,3 V a prúd do 0,5 A už od vstupného napätia približne 1,5 V pri deklarovanej efektívnosti okolo 90%.

■ 5.1.5 Minimalizácia spotreby externého čidla IAQ

Jednou z hlavných a najnáročnejších na splnenie je požiadavka dlhej výdrže na dve AA batérie. Tomu som musel prispôbiť celý technický návrh a dávať veľký dôraz na minimalizovanie spotreby elektrickej energie. Dá sa predpokladať, že merané veličiny sa nebudú meniť príliš rýchlo, a preto nie je potrebné aby externé čidlo vykonávalo kontinuálne meranie, ale postačí vykonať jedno meranie za určitý zvolený časový interval. Vďaka tomu nie je potrebné aby externé čidlo bežalo nepretržite, ale medzi jednotlivými meraniami je možné jeho spotrebu minimalizovať.

Jednou z možností dosiahnutia minimálnej spotreby v čase medzi meraniami je využitie niektorého z úsporných režimov ESP32. Podľa údajov výrobcu je v najúspornejšom, tj. hibernačnom režime, kedy beží iba časovač v RTC bloku, spotreba približne 5 μA . To je samé o sebe nízka spotreba, avšak súčasne stále bežia všetky pomocné obvody vrátane zdroja napájacieho napätia čím sa výsledná spotreba zvyšuje.

Efektívnejšou možnosťou je v čase medzi jednotlivými meraniami odpojiť od napájania všetky obvody vrátane zdroja a zabezpečiť len ich pravidelné pripojenie v požadovaných intervaloch. Na toto najlepšie poslúži špeciálny integrovaný obvod externého časovača, ktorý je navrhnutý zvlášť pre použitie v IoT zariadeniach s ohľadom na minimalizáciu spotreby elektrickej energie. Porovnaním technických údajov niekoľkých typov som ako najvhodnejší časovač vytypoval TPL5111 Nano-Power System Timer for Power Gating od firmy Texas Instruments, ktorý sám má spotrebu maximálne iba 50 nA a časový interval nastaviteľný od 0.1 s do 7200 s [20]. V čase medzi meraniami bude funkčný iba tento časovač a ostatné obvody, vrátane modul ESP32-WROOM-32 a samotného zdroja napájania, budú vypnuté, čím maximalizujem úsporu energie.

■ 5.2 Výber krabičky

Pri výbere krabičky sa prihliadalo predovšetkým na okolnosť, že externé čidlo bude vo väčšine prípadov umiestnené vo vonkajšom prostredí a bude teda vystavené poveternostným vplyvom. Tomu musí zodpovedať jednak materiál z ktorého je vyhotovená, ale aj konštrukčné detaily, hlavne tesnenie medzi odoberateľnými dielmi, umiestnenie a vyhotovenie uchytávacích prvkov. Po konzultácii som sa rozhodol, že krabička sa nebude vyrábať “na mieru”, ale sa použije hotová štandardizovaná krabička.

Samotný tvar a rozmery boli zvolené tak, aby boli minimálne ale, aby sa tam zmestili všetky rozmernejšie konštrukčné diely externého čidla, predovšetkým



Obrázok 5.1: Krabička externého čidla po úpravách

držiačky batérií a modul ESP-WROOM-32.

Z týchto základných požiadaviek nakoniec vyšla ako najlepšia krabička s označením 1554B2GYSL od výrobcu HAMMOND, ktorá má vonkajšie rozmery 65x65x40 mm. Je vyrobená z polykarbonátu a má krytie IP66 [21]. Poskytuje dostatočný vnútorný priestor s približnými rozmermi 56x56x26 mm, kam sa zmestili všetky potrebné súčiastky.

Na tejto krabičke urobil Ing. Aleš Vodička dve úpravy. Jednak vo vnútri odobral jeden stĺpik na uchytenie, aby sa zväčšil voľný priestor na spodnej strane PCB a tiež primontoval na vrchný kryt krabičky typizovaný krytý ventilačný prvok (FIBOX MB10631) (viď obrázok 5.1), aby bola zabezpečená výmena vzduchu medzi vnútorným priestorom krabičky a vonkajším prostredím, čo zlepší správnosť merania teploty ale predovšetkým vlhkosti. Táto úprava znížila hodnotu krytia na IP33, čo ale pre potreby ochrany pred dažďom postačuje.

5.3 Návrh schémy

V tejto časti podrobne popíšem jednotlivé logické celky schémy externého čidla.

5.3.1 Prepäťová a nadprúdová ochrana

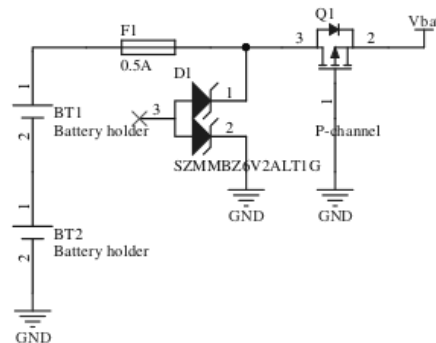
Napájanie externého čidla je realizované pomocou dvoch AA batérií. Aby boli chránené citlivé elektronické komponenty pred poruchou, alebo nesprávnou manipuláciou zo strany užívateľa, je na vstupe zaradené niekoľko typov ochrany.

Ako nadprúdová ochrana slúži poistka F1 typu F0603E0R50FSTR [22]. Jedná sa o rýchlo reagujúcu poistku, ktorá je dimenzovaná na maximálny trvalý prúd 0,5 A. Tento prúd je postačujúci na bežnú prevádzku zariadenia a súčasne je dostatočne malý, aby ho ochránil pri prípadnom skrate.

Ďalším ochranným prvkom je TVS (Transient Voltage Suppresor) dióda D1. Táto dióda zabezpečuje ochranu proti prepätiu, ktoré môže vzniknúť buď použitím nevhodného zdroja napájacieho napätia, alebo vo forme statického výboja. Použitý typ má označenie SZMMBZ6V2ALT1G a sú to dve TVS

diódy v jednom puzdre zapojené proti sebe čo zabezpečuje lepšiu ochranu pri oboch polaritách napätia [23]. Breakdown voltage (napätie pri ktorom dôjde k lavínovému prerazu a otvoreniu diódy) použitej diódy je 6,2 V. Maximálny clamping voltage teda napätie ktoré môže na dióde byť aby nedošlo k jej zničeniu je 8,7 V pričom ňou môže pretekať prúd až 2,76 A. Pri tomto prúde sa prepáli použitá poistka F1 za menej ako 10^{-4} sekundy.

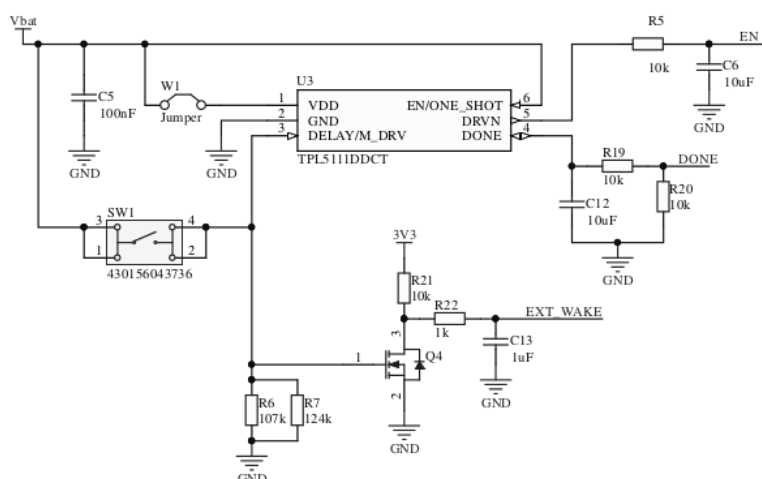
Ako ochranu pred prepólovaním som nemohol použiť obyčajnú diódu, keďže na nej by bol relatívne veľký úbytok napätia vzhľadom na celkové napätie batérií. Z tohto dôvodu bol na ochranu proti prepólovaniu napájacieho napätia (napríklad nesprávnym umiestnením batérií) použitý FET tranzistor s kanálom P (TSM260P02CX) [24], ktorý vo svojom púzde obsahuje aj ochrannú diódu. Tranzistor je v obvode zapojený zdanlivo v opačnom smere (viď obrázok 5.2). Avšak takto pri správnej polarite napájacieho napätia po zapnutí kladné napätie prejde cez ochrannú diódu s úbytkom približne 1 V na elektródu S tranzistora Q1. Keďže riadiaca elektróda G je pripojená na zem bude zápornejšia ako elektróda S. Podľa údajov z datasheetu k tranzistoru je na otvorenie potrebný napäťový rozdiel minimálne 0,6 V. Z týchto údajov vyplýva, že tranzistor sa otvorí pri minimálnom napätí 1,6 V. Po otvorení tranzistoru sa už uplatňuje iba úbytok napätia medzi elektródami S a D, ktorý je rádovo desiatky milivoltov. Pri opačnej polarite napájacieho napätia sa tranzistor neotvorí.



Obrázok 5.2: Schéma zapojenia ochranných prvkov

5.3.2 Spínaný zdroj

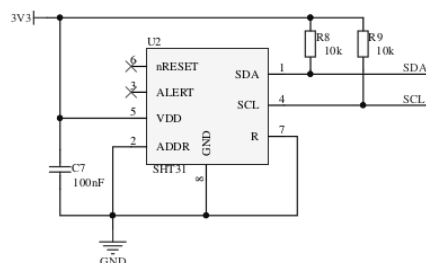
Pred samotným spínaným zdrojom sú osadené filtračné kondenzátory na vyhladenie vstupného napätia a elimináciu rušenia s hodnotami odporúčanými výrobcom. Použitý integrovaný obvod spínaného boost konvertora TPS61016 bol zapojený podľa doporučeného zapojenia z datasheetu pre napájanie z dvoch batérií a výstupnom prúde do 0,5 A. Boost konvertor zo svojho princípu potrebuje pre svoju funkčnosť dva hlavné pasívne prvky na ukladanie energie počas konverzie. Cievku L1 na zvyšovanie napätia a kondenzátor C8 na “uskladnenie” výstupného napätia. Na určenie hodnoty týchto dvoch súčiastok udáva výrobca vo svojich materiáloch vzorce. Použitím týchto vzorcov som si overil, že hodnoty navrhnuté v odporúčanom zapojení by mali vyhovovať



Obrázok 5.4: Schéma zapojenia externého časovača

5.3.4 Snímač teploty a vlhkosti

Zapojenie integrovaného snímača SHT31 od firmy SENSIRION je jednoduché, pretože na svoju správnu činnosť požaduje podľa datasheetu iba blokovací kondenzátor C7 100nF na napájacom vstupe. Senzor komunikuje prostredníctvom I2C zbernice, ktorá vyžaduje na prevádzku pull-up rezistory R8 a R9. Odporúčaná hodnota je podľa výrobcu senzoru 10 k Ω . Zapojením vstupu ADDR na úroveň logickej nuly sa nastaví adresa senzoru na zbernici I2C na hodnotu 0x44.

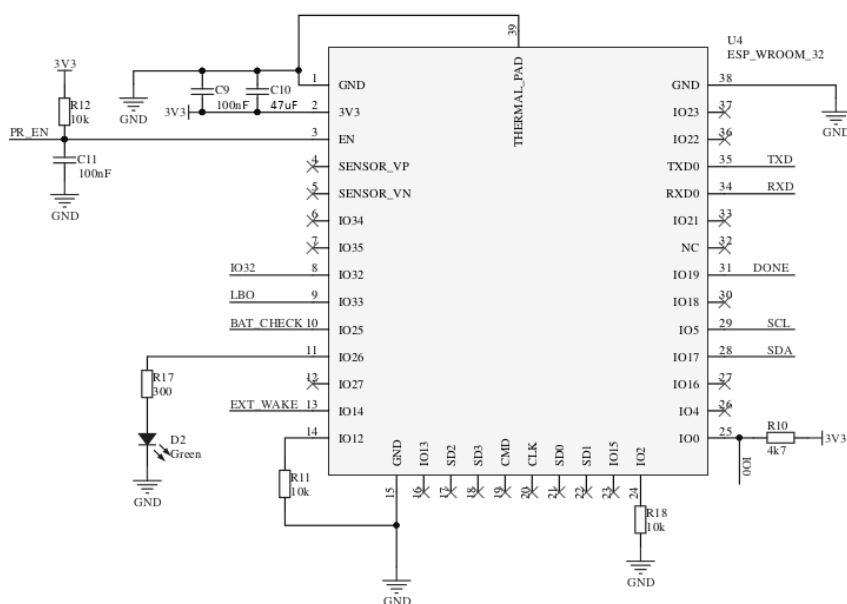


Obrázok 5.5: Schéma zapojenia senzora SHT31

5.3.5 Modul ESP-WROOM-32

Mikrokontrolerový modul ESP-WROOM-32 bol zapojený podľa doporučeného zapojenia z datasheetu. Hlavne čo sa týka jednotlivých pull-up a pull-down odporov. Na vstupe napájania sú dva filtračné kondenzátory C9 a C10. Väčší 47 μ F keramický kondenzátor slúži na vyhladenie napájacieho napätia a súčasne ako energetická rezerva pri špičkových odberoch. Menší 100 nF keramický kondenzátor slúži na filtráciu možného rušenia. Napájacie napätie je na pin EN privedené cez RC člen R12, C11 za účelom krátkého oneskorenia štartu mikrokontroléra aby bolo zaručené ustálenie napájacieho napätia. Na

obrázku 5.6 je tiež možné vidieť využitie jednotlivých pinov mikrokontroléra, ktoré slúžia na pripojenie ďalších periférnych zariadení. Na pine IO26 je cez odpor R17 pripojená indikačná LED dióda. Mikrokontrolér ESP32 sa programuje pomocou UART rozhrania preto sú z neho vyvedené piny TX a RX. Pre naprogramovanie je ďalej potrebný pin EN, ktorý slúži na resetovanie mikrokontroléra a tzv. strapping pin IO0. Logická úroveň na tomto pine pri štarte určuje mód do ktorého sa mikrokontrolér prepne (programovací alebo štandardný beh).

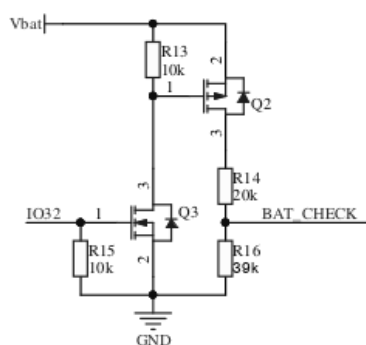


Obrázok 5.6: Schéma zapojenia modulu ESP-WROOM-32

5.3.6 Obvod na snímanie napätia batérií

Na meranie napätia batérii sa využíva jeden z kanálov AD prevodníka mikrokontroléra. Aby tento vstup nebol priamo pripojený na batérie, je napätie snímané cez odporový delič. Iba obyčajný odporový delič by trvale zaťažoval batérie pretože by ním tiekol trvalý malý prúd, a teda je tento obvod riešený zložitejším spôsobom, ktorý ale minimalizuje spotrebu energie (viď obrázok 5.7). Pri návrhu tohoto obvodu som sa inšpiroval projektom TrigBoar, ktorý je zameraný na minimalizáciu spotreby mikrokontroléra ESP8266 [25].

Obvod je navrhnutý tak aby v kludovom stave netiekol meracím obvodom žiaden prúd. V čase merania napätia batérií sa nastaví na IO32 logická jednotka, čím sa zopne N-kanálový tranzistor Q3, ktorý uzemní riadiacu elektródu P-kanálového tranzistoru Q2 a tým ho tiež otvorí. Následne je možné z napätového deliča R14, R16 pomocou vývodu BAT_CHECK odmerať napätie batérií.



Obrázok 5.7: Schéma zapojenia napätového deliča

5.3.7 Kompletná schéma zapojenia

Kompletné schéma zapojenia sa nachádza v prílohe B.

5.4 Návrh plošného spoja

Návrh plošného spoja bol realizovaný pomocou programu Altium 16. Hlavným obmedzujúcim parametrom pri návrhu bol vnútorný priestor krabičky, ktorý určoval maximálne rozmery aj tvar plošného spoja. Plošný spoj bol navrhovaný ako dvojvrstvový.

5.4.1 Spodná strana plošného spoja

Ako prvé bolo potrebné umiestniť držiaky na dve AA batérie, keďže zaberajú značnú časť plošného spoja a vrámci krabičky nimi nebolo možné príliš manipulovať. Tieto držiaky museli byť umiestnené na spodnú stranu plošného spoja, ktorá je prístupná po otvorení krabičky, aby bolo možné vykonať výmenu batérií. Na spodnej strane musí byť umiestnené aj ovládacie tlačidlo spolu so signalizačnou LED diódou. Tlačidlo som v rámci možností, ktoré dovoľovali batériové držiaky, umiestnil čo najbližšie podpornému stĺpiku na ktorom je plošný spoj uchytený, aby pri stláčaní tlačidla nedochádzalo k deformáciám plošného spoja. Na tejto strane plošného spoja sú ešte vyvedené prepínač P1, prepojka W1 a programovací konektor. Tým bola spodná strana plne obsadená a všetky ostatné súčiastky museli byť osadené na vrchnú stranu plošného spoja.

5.4.2 Vrchná strana plošného spoja

Táto strana je využitá na umiestnenie prakticky všetkých elektronických súčiastok a vedenie väčšiny signálových a napájacích ciest.

Najnáročnejšou súčiastkou na umiestnenie na tejto strane bol modul ESP-WROOM-32. Vhodný spôsob umiestnenia tohto modulu je popísaný v materiály ESP32 Hardware Design Guidelines [26], podľa ktorého je doporučené aby 2,4 GHz anténa modulu presahovala mimo plošný spoj ideálne v pravom

vrchom rohu. Toto umiestnenie som sa snažil v rámci možnosti použitej krabičky čo najlepšie dodržať.

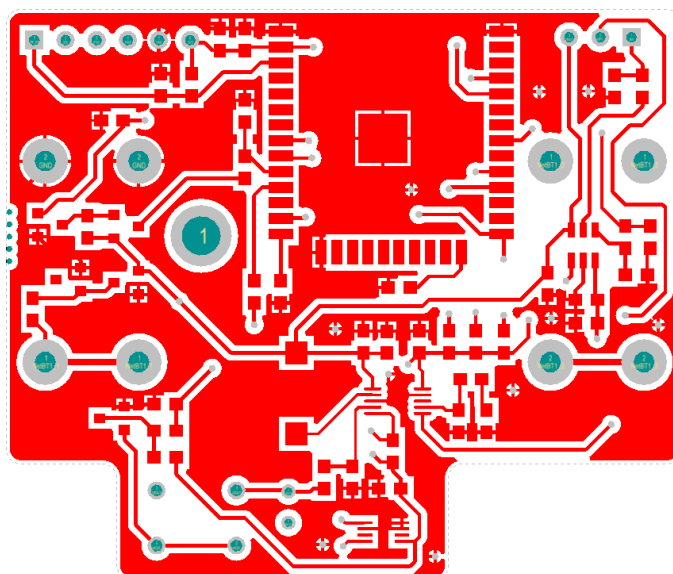
Senzor teploty a vlhkosti bolo potrebné umiestniť čo najďalej od možných zdrojov tepla. V tomto prípade produkuje najviac tepla modul ESP-WROOM-32 pri svojom behu. Preto som sa snažil umiestniť senzor teploty a vlhkosti čo najďalej od tohto modulu a zároveň blízko k okrajom plošného spoja. Toto umiestnenie zabezpečuje lepšie prúdenie vzduchu okolo senzora a teda aj lepšiu správnosť merania parametrov.

5.4.3 Elektromagnetická kompatibilita

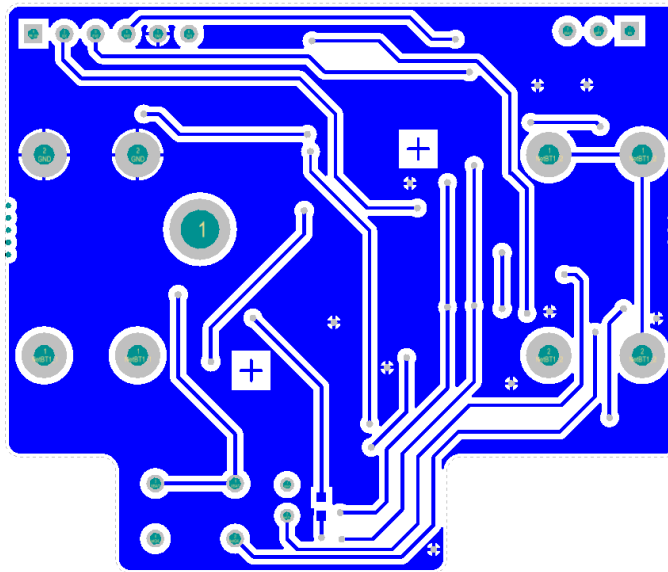
Aby bolo zabezpečené lepšia EMC (elektromagnetická kompatibilita) boli všetky voľné miesta na oboch stranách plošného spoja využité na rozliatu zem. Súčasťou zabezpečenia EMC je aj umiestňovanie blokovacích kondenzátorov do blízkosti jednotlivých integrovaných obvodov. V návrhu som použil blokovacie keramické kondenzátory s hodnotou 100 nF. Tieto kondenzátory slúžia na uzavretie prúdových slučiek na vyšších frekvenciách, aby sa nešírili ďalej po napájacích cestách.

5.4.4 Výsledný plošný spoj

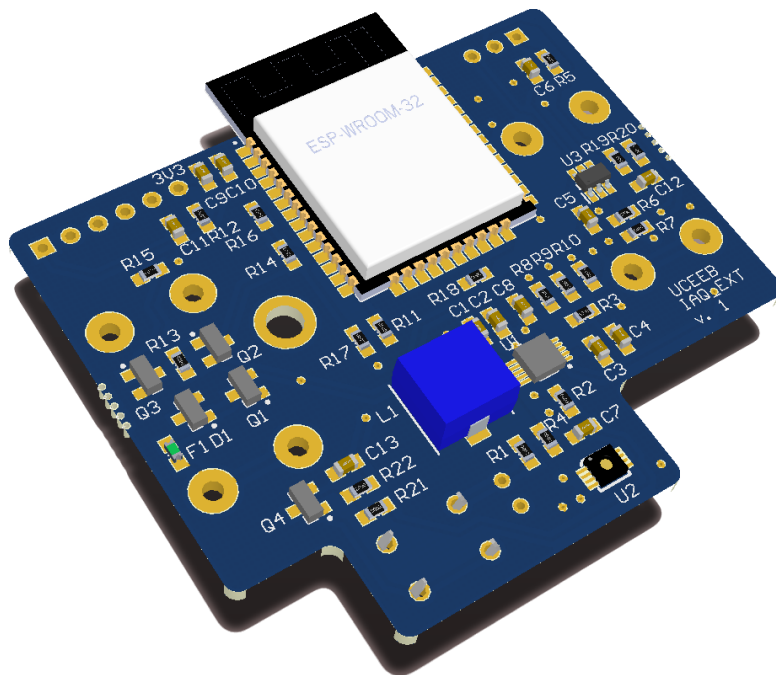
Na nasledujúcich obrázkoch sa nachádzajú výstupy navrhnutého plošného spoja z programu Altium a finálna skutočná podoba plošného spoja externého čidla.



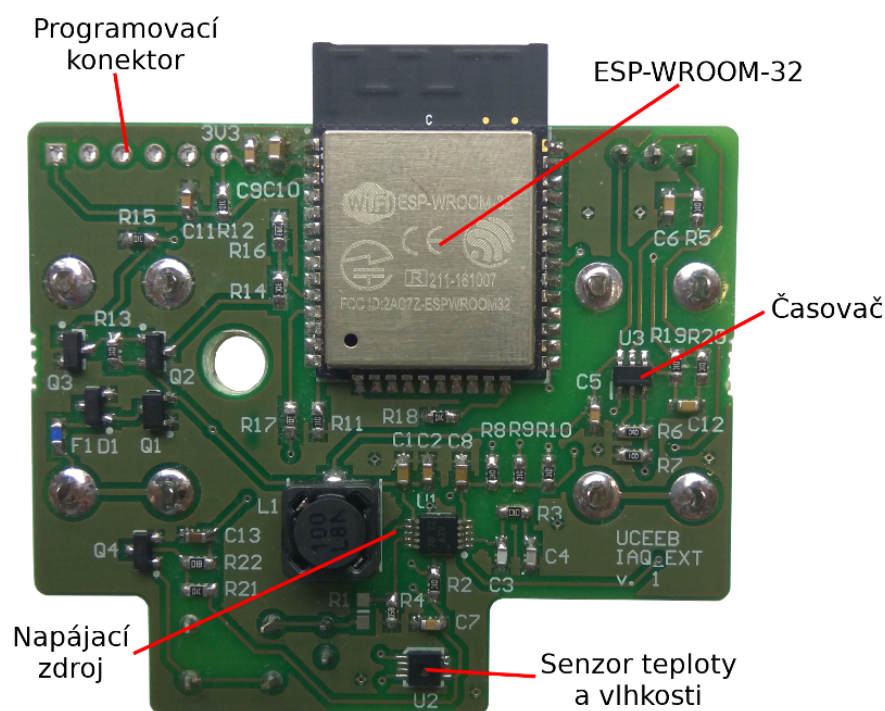
Obrázok 5.8: Vrchná strana spojov (top vrstva)



Obrázok 5.9: Spodná strana spojov (bottom vrstva)



Obrázok 5.10: Vizualizácia výsledného plošného spoja



Obrázok 5.11: Výsledná podoba plošné spoja

5.5 Firmvér

V tejto časti popíšem nutné úpravy firmvéru centrálnej jednotky pre komunikáciu s externým čidlom a tiež firmvér externého čidla.

5.5.1 Komunikácia

Výberu komunikačného rozhrania

Spotrebu samotného modulu ESP-WROOM-32 v aktívnom režime nie je možné ovplyvniť, ale je možné minimalizovať čas strávený v tomto móde a to aj vhodným výberom komunikačného rozhrania. Jeho výber vychádzal z možností komunikácie, ktoré poskytuje centrálna jednotka IAQ a z toho, že externé čidlo bude iba v určených časových intervaloch odosielať krátke dátové správy.

Bežne používané a dostupné rozhranie Wi-Fi nebolo navrhnuté na takýto typ správ, má veľmi veľkú režiú. Tým sa výrazne zvyšuje energetická náročnosť prenosu a čas potrebný na samotný prenos dát. Centrálna jednotka IAQ disponuje aj Bluetooth rozhraním, ale to je určené predovšetkým na krátke vzdialenosti, a teda by nedovoľovalo umiestniť externý senzor ďalej od centrálnej jednotky.

Z toho dôvodu pre účely posielania krátkych správ medzi IoT zariadeniami vyvinula firma Espressif nízkoenergetický protokol ESP-NOW. Tento protokol mám podľa zadania bakalárskej práce použiť a overiť jeho vhodnosť na

komunikáciu medzi centrálnou jednotkou a externým čidlom. Podrobný popis tohto komunikačného protokolu je v samostatnej kapitole 7.

■ Popis štruktúry užívateľských dát

Podľa popisu protokolu ESP-NOW je časť “Body” (viď obr. 7.1) určená na uloženie samotných užívateľských dát. Štruktúru tohto bloku si kompletne určuje vývojár podľa svojich potrieb.

Pre účely komunikácie s externým čidlom som navrhol dva druhy správ, s možnosťou neskoršieho rozšírenia ak to bude potrebné. Obe správy vychádzajú z rovnakej štruktúry a líšia sa v užitočných dátach.

Prvý druh správy je určený na prenos nameraných dát viď obrázok 5.12 a pozostáva z častí:

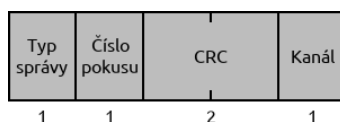
- Typ správy – je nastavené na hodnotu 0 čo indikuje, že sa jedná o správu s nameranými dátami
- Číslo pokusu – poradové číslo pokusu o odoslanie správy
- CRC – kontrolný súčet na overenie integrity prijatej správy, vypočítaný štandardnou funkciou `crc16_le` z knižnice dodanej k vývojovému prostrediu výrobcu
- Teplota – hodnota nameranej teploty externým čidlom
- Vlhkosť – hodnota nameranej relatívnej vlhkosti externým čidlom
- Napätie – napätie bateriek externého čidla



Obrázok 5.12: Štruktúra správy na posielanie zmeraných údajov

Druhý druh správy je určený na spárovanie externého čidla s centrálnou jednotkou viď obrázok 5.13 a pozostáva z častí:

- Typ správy – je nastavené na hodnotu 1 čo indikuje, že sa jedná o správu používanú pri párovaní zariadení
- Číslo pokusu – poradové číslo pokusu o odoslanie správy
- CRC – kontrolný súčet na overenie integrity prijatej správy, vypočítaný štandardnou funkciou `crc16_le` z knižnice dodanej k vývojovému prostrediu výrobcu
- Kanál – obsahuje číslo rádiového kanála podľa normy IEEE 802.11, ktorý sa bude používať na komunikáciu medzi zariadeniami



Obrázok 5.13: Štruktúra správy určenej na párovanie

5.5.2 Firmvér centrálnej jednotky

Aby bolo možné komunikovať s externým čidlom, bolo nutné upraviť a doplniť firmvér centrálnej jednotky. Zjednodušená logická schéma časti firmvéru používaného pre obsluhu externého čidla je na obrázku 5.14.

Po zapnutí centrálnej jednotky sa vyčíta z trvalej pamäte či bolo k jednotke pripojené externé čidlo. Ak nebolo, centrálna jednotka pokračuje v štandardnom behu programu tj. bez komunikácie s externým čidlom. Ak áno, prebehne inicializácia protokolu ESP-NOW, vytvorenie vlákna obsluhy a spracovania správ, ktoré je označené červenou farbou v schéme. Wi-Fi modul sa prepne do režimu bez spánku, aby bolo zaručené prijatie správ. Povolí sa zobrazenie obrazovky externého čidla na LCD displeji. Kedykoľvek počas behu programu môže užívateľ zrušiť spárovanie s externým čidlom, alebo zahájiť proces nového párovania. Tieto akcie sú označené na logickej schéme šedou farbou.

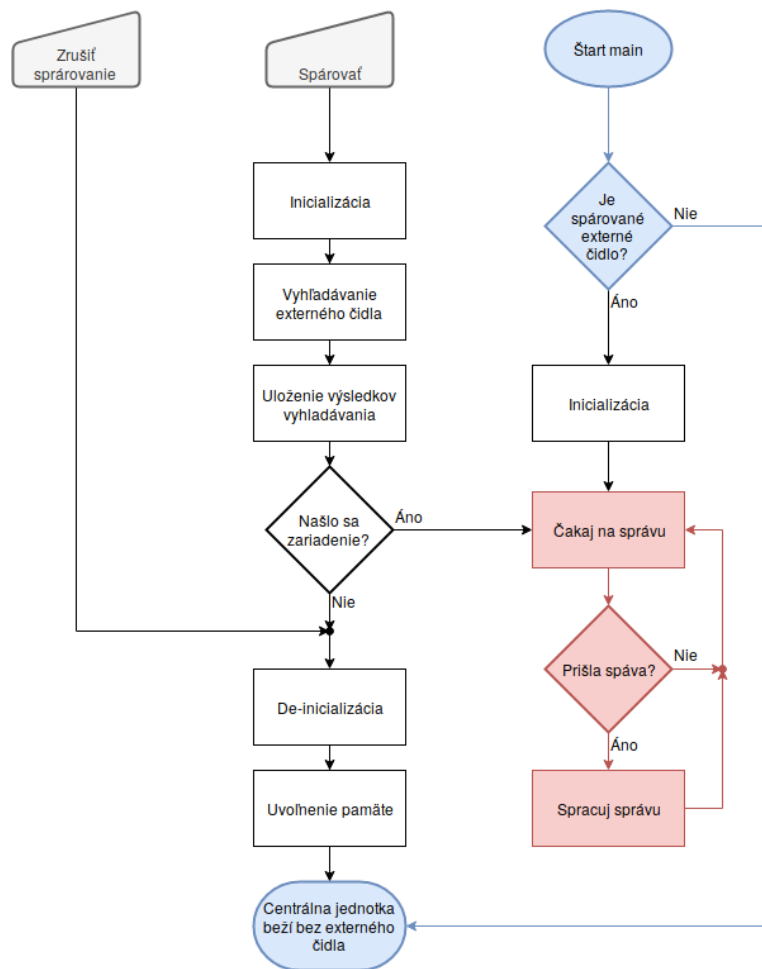
Pri procese zrušenia párovania sa zapíše do trvalej pamäte údaj, že ďalej už nie je zariadenie spárované s externým čidlom, zruší sa vlákno obsluhy a spracovania prijatých správ (v schéme vyznačené červenou farbou), odinicializuje sa protokol ESP-NOW a uvoľní sa všetka pamäť, ktorá bola používaná pre komunikáciu s externým čidlom.

Pri procese párovania sa inicializuje protokol ESP-NOW, vytvorí sa vlákno obsluhy a spracovania prijatých správ, Wi-Fi modul sa prepne do režimu bez spánku aby bolo zaručené prijatie správ a začne sa proces vyhľadávania externého čidla. Bližšie viď Proces párovania zariadení 5.5.4. Ak proces vyhľadávania nebol úspešný, uloží sa príznak o nespárovanosti s externým čidlom a prebehne kompletne od-inicializovanie všetkého potrebného ku komunikácii s externým čidlom.

Pri úspešnom nájdení externého čidla sa uložia údaje potrebné pre ďalšiu komunikáciu s ním, tj. MAC adresa, kanál a príznak prítomnosti externého čidla. Následne centrálna jednotka čaká na správy s meraním od externého čidla. Po prijatí správy s nameranými údajmi sa skontroluje integrita údajov pomocou CRC a overí sa či správa prišla od spárovaného externého čidla. Ak všetky kontroly prebehnú úspešne, spracujú sa namerané dáta.

5.5.3 Firmvér externého čidla

Zjednodušená bloková schéma firmvéru externého čidla je na obrázku 5.15. Externé čidlo sa zapína v pravidelných desať minútových intervaloch podľa časovača. Po zapnutí sa uskutoční inicializácia pinov potrebných na obsluhu LED diódy, na ovládanie externého časovača a na meranie napätia batérií. Inicializuje sa I2C zbernica potrebná na komunikáciu so senzorom teploty a



Obrázok 5.14: Zjednodušená logická schéma firmvéru centrálnej jednotky pre obsluhu externého čidla

vlhkosti. Z trvalej pamäte sa načíta príznak o pripojení k centrálnej jednotke a údaje potrebné na komunikáciu. Inicializuje sa binárny semafor pre riadenie chodu jednotlivých vlákien a vytvorí sa vlákno kontrolujúce stlačenie tlačidla a vyhládavanie centrálnej jednotky `find_task`. Následne sa odmeria pomocou AD prevodníku napätie na odporovom deliči pripojenom priamo na batérie a uloží sa do premennej. Táto akcia musí prebehnúť pred tým ako sa inicializuje Wi-Fi blok ESP32, keďže pre vyčítanie údajov o napätí sa používa ADC2, ktorý pre svoj beh potrebuje aj Wi-Fi blok ESP32 viď časť ESP32-GPIO 6.2.3. Ďalej sa vyčítajú údaje o teplote a vlhkosti a tiež sa uložia do premennej. Meranie sa urobí hneď na začiatku programu, aby sa vyhlo možnému skresleniu dát ohrevom plošného spoja, aj keď sa to vzhľadom na interval, ktorý trvá celý proces posielania dát, nepredpokladá. Potom hlavné vlákno čaká na semafor z vlákna `find_task`. Ak je semafor dostupný prebehne kontrola, či je externé čidlo spárované s centrálnou jednotkou. Ak hej, tak prebehne inicializácia protokolu ESP-NOW a priradenie centrálnej jednotky do zoznamu spárovaných zariadení. Následne sa odošlú zamerané dáta do centrálnej jednotky

s využitím formátu správy na posielanie nameraných dát. Ak sa nepodari poslať dáta tj. externé čidlo dostalo správu, že dáta neboli prijaté centrálnou jednotkou na spojenej vrstve, tak sa pokus opakuje pričom sa navyšuje číslo pokusu v obsahu správy. Dovedna sa správa skúša poslať 5 krát. Po dokončení procesu posielania údajov mikrokontrolér odošle pokyn do časovača na odstavenie napájacieho napätia.

Vlákno `find_task` si po svojom vzniku zaznamená aktuálny procesorový čas a skontroluje, či je stlačené hardvérové tlačidlo na externom čidle. Ak nie, uvoľní semafor pre ďalší beh hlavného vlákna. Ak je tlačidlo stlačené, v pravidelných intervaloch sa overuje jeho stále stlačenie a kontroluje sa či je rozdiel aktuálneho a zaznamenaného času pri vzniku vlákna väčší ako 5 sekúnd. Ak je táto podmienka splnená, znamená to, že užívateľ vyžiadal proces párovania s centrálnou jednotkou. Na to nadväzuje inicializácia protokolu ESP-NOW a program prejde do vyhľadávania centrálnej jednotky. Bližšie viď Proces párovania zariadení 5.5.4. Pri úspešnom nájdení centrálnej jednotky sa uložia do trvalej pamäte dáta potrebné pre ďalšiu komunikáciu, tj. príznak o pripojení k centrálnej jednotke, jej MAC adresa a komunikačný kanál. Pri neúspešnom procese vyhľadávania centrálnej jednotky sa nastaví príznak, že nedošlo k spárovaniu s centrálnou jednotkou. Nasleduje uvoľnenie semaforu pre hlavné vlákno a zrušenie vlákna `find_task`.

■ 5.5.4 Proces párovania zariadení

Pri procese párovania zariadení sa využíva druhý formát správy tj. “párovací formát”.

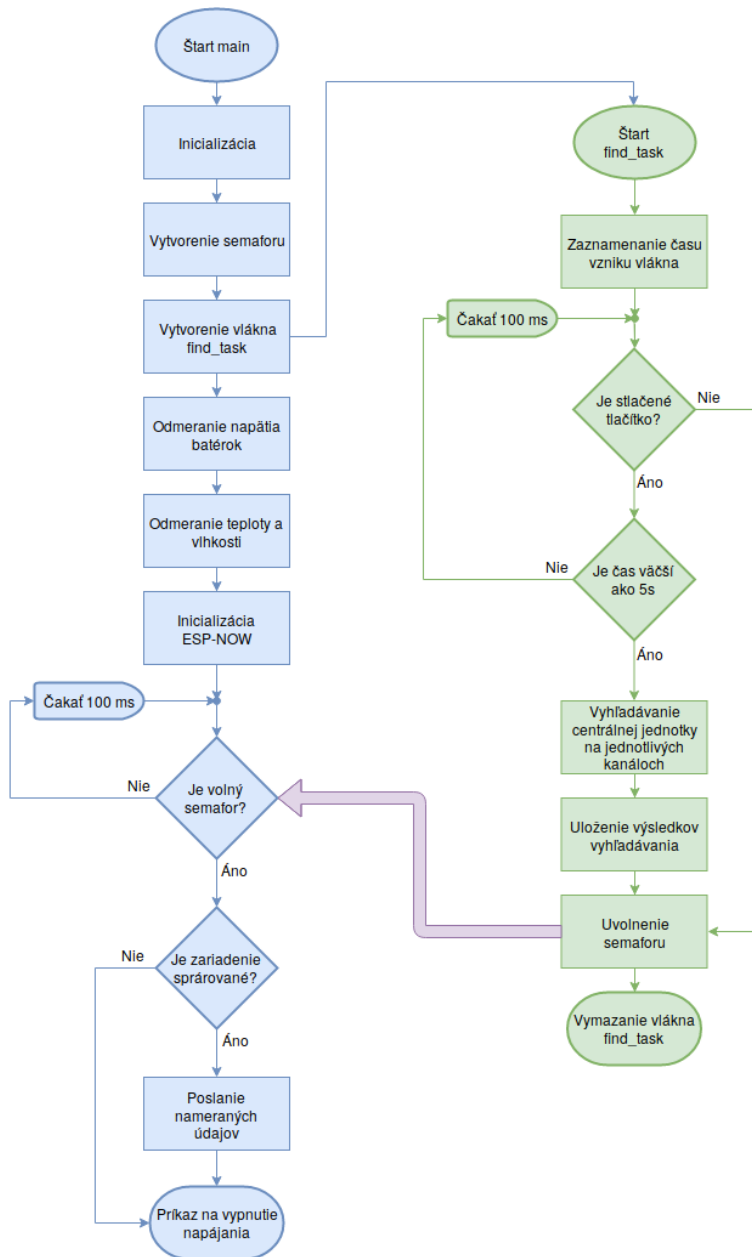
■ Párovanie z pohľadu centrálnej jednotky

Centrálna jednotka si pridá do zoznamu spárovaných zariadení “zariadenie” s broadcast-ovou adresou a začne vysielat broadcast-ovú párovaciu správu s aktuálnym Wi-Fi kanálom, ktorý sa používa a čaká na odpoveď. Maximálna doba vysielania broadcast-ovej správy je 50 sekúnd.

Po prijatí odpovede skontroluje, či sa jedná o správny formát správy tj. párovacia správa a či je v poli kanála zapísaná rovnaká hodnota čísla kanála, ako je momentálne používané číslo kanála. Ak sa všetky údaje zhodujú centrálna jednotka si zapíše všetky potrebné údaje pre ďalšiu komunikáciu s externým čidlom do trvalej pamäte.

■ Párovanie z pohľadu externého čidla

Externé čidlo postupne prechádza jednotlivé komunikačné kanály a snaží sa zachytiť broadcast-ovú správu od centrálnej jednotky. Ak zachytí správu skontroluje, či má správny formát a či sa aktuálny kanál zhoduje s tým v zachytenej správe (výnimočne môže dôjsť k presluchom medzi kanálami) a odošle potvrdenie vo formáte párovaciej správy na adresu z ktorej zachytil broadcast-ovú správu, teda na adresu centrálnej jednotky. Pri potvrdení úspešného prijatia správy centrálnou jednotkou si externé čidlo uloží do trvalej



Obrázok 5.15: Blokové schéma firmvéru externého čidla

pamäte všetky potrebné údaje pre ďalšiu komunikáciu. Ak nedostane potvrdenie o prijatí správy na spojovej vrstve, tak opakuje vyslanie potvrdzujúcej párovacej správy maximálne 5 krát.

5.6 Uživatelské rozhranie

Preto, aby externé čidlo fungovalo a posielalo namerané dáta do centrálnej jednotky, je potrebné ho najprv s danou centrálnou jednotkou IAQ spárovať.

Tento proces pozostáva z dvoch častí. Najprv je potrebné na displeji centrálnej jednotky v nastavovacej obrazovke vybrať možnosť pripojiť externé čidlo. Vtedy začne centrálna jednotka vysielat broadcast-ové párovacie správy. Následne je potreba na externom čidle stlačiť a podržať stlačené hardvérové tlačidlo (cca po dobu 5 sekúnd) až pokiaľ nezačne blikať zelená LED dióda. Blikanie LED diódy indikuje, že externé čidlo prechádza jednotlivé Wi-Fi kanály a hľadá broadcast-ovú párovaciu správu vysielanú centrálnou jednotkou. Ak sa proces párovania podaril, LED dióda na externom čidle prestane blikať trvalo svieti približne 3 sekundy. Na displeji centrálnej jednotky sa zobrazí správa o pripojení a základné údaje špecifikujúce pripojené externé čidlo vrátane napätia jeho batérií.

Pre možnosti overenia, či prepojenie medzi zariadeniami funguje, alebo či je sila rádiového signálu dostatočná, je možné použiť krátke stlačenie hardvérového tlačidla na externom čidle, čím dôjde k jednorázovému vyslaniu meraných dát do centrálnej jednotky.

5.7 Overenie funkčnosti senzora

V tejto časti sa venujem overeniu funkčnosti externého senzora. Zameriam sa jednak na vyhodnotenie dlhodobjšieho merania teploty a relatívnej vlhkosti v porovnaní s centrálnou jednotkou. Ale aj na overenie nízkoenergetického dizajnu a odhadu dĺžky životnosti batérií slúžiacich na napájanie senzora. Na základe meraní sa vyhodnotia nedostatky, ktoré sa zistili pri skúšobnej prevádzke a navrhnu sa oblasti možných vylepšení pre prípadnú nasledujúcu verziu.



Obrázok 5.16: Výsledná podoba externého čidla v krabičke

5.7.1 Párovanie a prenos údajov protokolom ESP-NOW

Schopnosť spárovať sa bola overená mnohonásobným vyvolávaním tejto činnosti na rôznych Wi-Fi rádiových kanáloch. K spárovaniu došlo vždy bez

problémov v časovom limite. Zatiaľ bolo testovanie párovania aj prenosu dát robené na relatívne krátke vzdialenosti v interiéri, pričom každé zariadenie bolo umiestnené v inej miestnosti.

■ 5.7.2 Meranie teploty a vlhkosti

Dlhodobejšie meranie sa robilo tak, že obe zariadenia boli umiestnené blízko seba, aby sa dali porovnať namerané údaje teploty a vlhkosti. Je k dispozícii nepretržitá rada meraní v dĺžke 150 hodín, t.j. 900 meraní. V tomto čase sa nezaznamenal žiadny evidentný výpadok v prenose meraných dát.

■ Meranie teploty

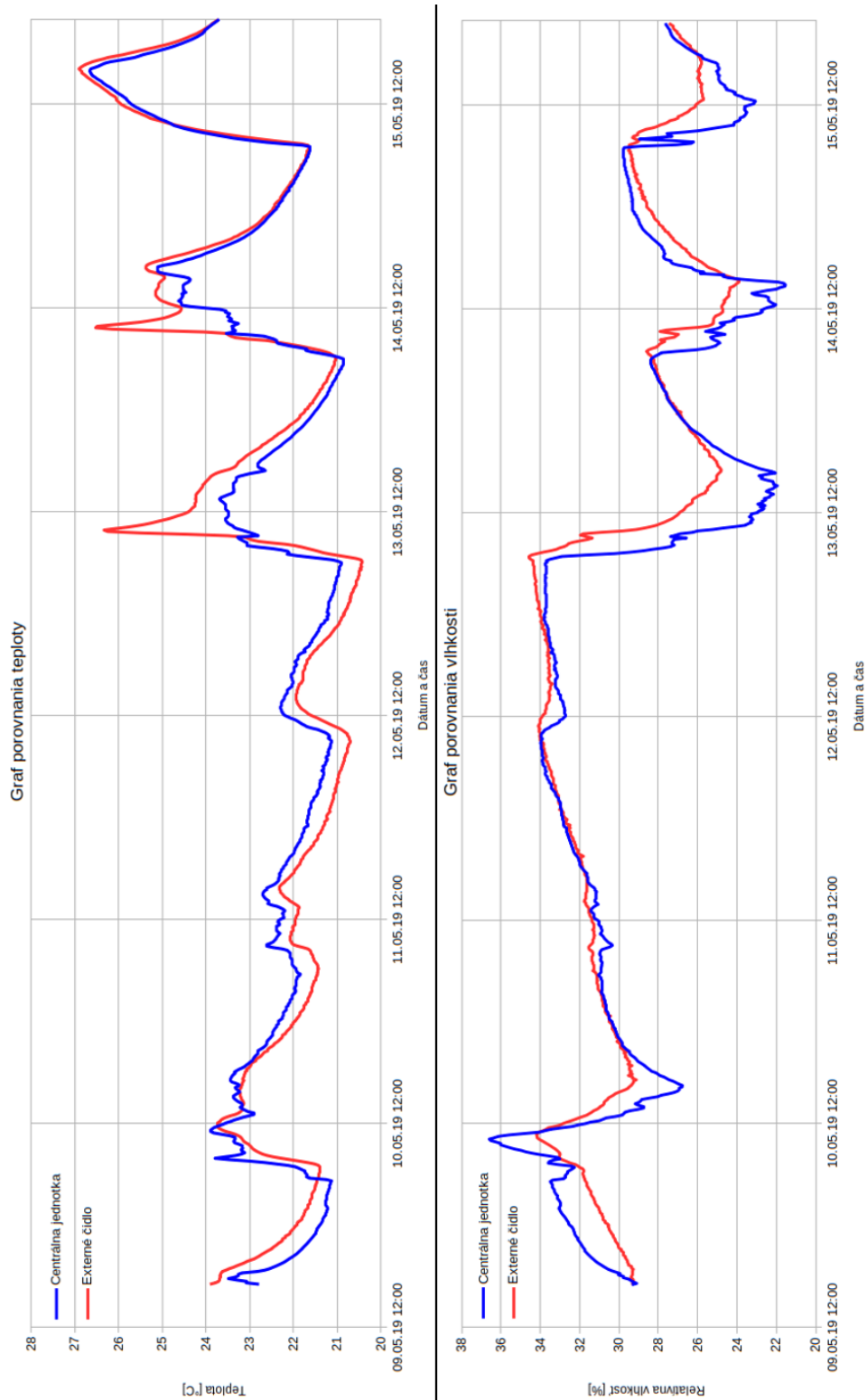
Graf 5.17 zobrazuje porovnanie merania teploty centrálnou jednotkou IAQ a externým čidlom v rozmedzí od 9. 5. 2019 17:00 hod. do 15. 5. 2019 21:00 hod. Obe zariadenia boli umiestnené v tej istej miestnosti vo vzdialenosti asi jedného metra od seba. Z tohto umiestnenia vyplývajú aj výraznejšie odlišnosti nameraných dát 13.5. a 14.5. približne o desiatej hodine dopoludnia, kedy na externé čidlo svietilo chvíľu slnko, ale na centrálnu jednotku nie. Okrem týchto extrémov sú rozdiely maximálne 0,5 °C, čo zodpovedá výrobcom udávanej tolerancii teplotného senzoru.

■ Meranie vlhkosti

Graf 5.17 zobrazuje porovnanie merania relatívnej vlhkosti centrálnou jednotkou IAQ a externým čidlom v rozmedzí od 9. 5. 2019 17:00 hod. do 15. 5. 2019 21:00 hod. Obe zariadenia boli umiestnené v tej istej miestnosti vo vzdialenosti asi jedného metra od seba. Rozdiely v nameraných hodnotách sú maximálne 3 % RH. Z grafu sa dá vypočítať, že externé čidlo reaguje na zmeny vlhkosti pomalšie a jej priebeh je teda pozvoľnejší (bez prudkých výkyvov) ako priebeh z centrálny jednotky. Je možné sa domnievať, že to môže spôsobovať rozdielne prúdenie vzduchu cez vetrací otvor na krabičke externého čidla. Tento jav by bolo vhodné pozorovať v dlhšom časovom intervale a v exteriérových podmienkach.

■ 5.7.3 Meranie spotreby energie

Ako bolo už spomenuté, externé čidlo je napájané z dvoch AA batérii. Počíta sa s tým, že by malo byť v prevažnej väčšine prípadov umiestnené vonku. Je teda snaha o to, aby tieto batérie vydržali čo najdlhšie bez potreby výmeny. Tomuto bol podriadený celý návrh elektroniky. Na posúdenie skutočného stavu spotreby elektrickej energie som urobil niekoľko meraní. Prvým bolo meranie odberu prúdu z batérii v ustálenom stave t.j. počas intervalu medzi jednotlivými meraniami, teda kludového odberu. Do série s batériami bol zaradený digitálny multimeter Agilent 34411A. Kludový odber celého externého čidla bol 5 μ A, čo je priaznivý údaj.



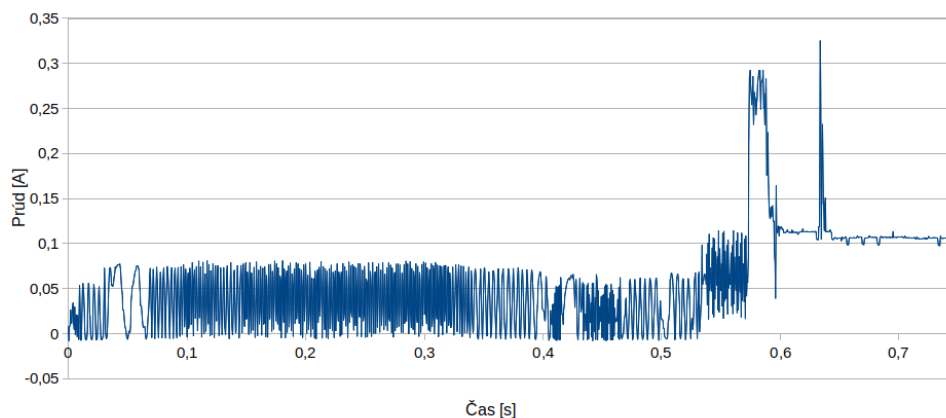
Obrázok 5.17: Graf porovnania teploty a vlhkosti

Druhým meraním bolo dynamické meranie počas aktívnej práce čidla pri meraní a odosielaní údajov. Pri tomto meraní bol do série s batériami zaradený odpor s hodnotou $1\ \Omega$. Na tomto odpore sa meral digitálnym osciloskopom Agilent MSO-X 3104A priebeh napätia, ktorý je úmerný odoberanému prúdu. Vyskúšal som niekoľko režimov práce modulu ESP-WROOM-32. Ako najefektívnejšia z hľadiska spotreby energie sa ukázala varianta s používaním iba jedného jadra procesoru pri taktovacej frekvencii 80 MHz.

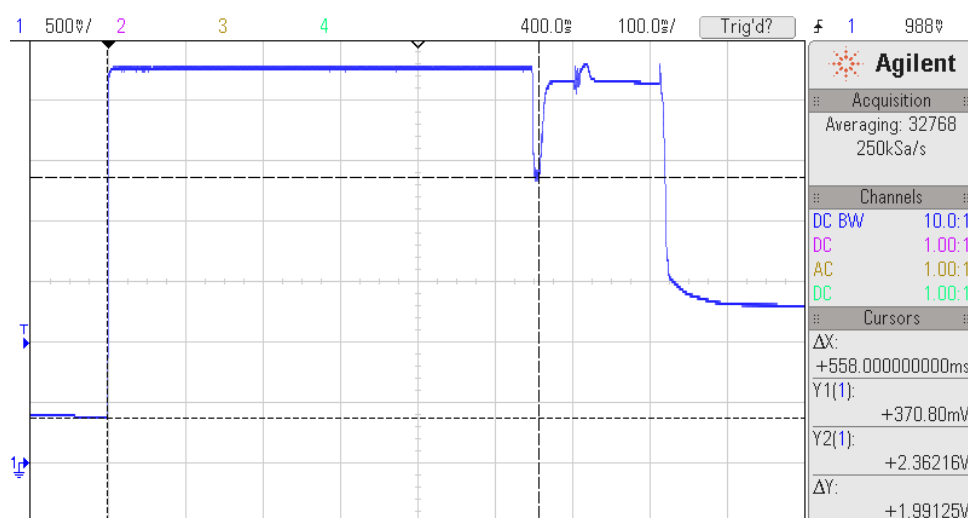
Typický priebeh prúdu je na obrázku 5.18. Je možné povedať, že väčšinu času aktívnej doby čidla (cca 570 ms) je priemerný odber 37 mA. Potom nasleduje krátke (cca 20 ms) výrazné zvýšenie odberu na priemernú hodnotu približne 260 mA počas inicializácie Wi-Fi bloku. V okamžiku odosielania správy je priemerný odber 180 mA po dobu 5 ms s najvyššou špičkou 330 mA. Namerané hodnoty prúdov celkom dobre zodpovedajú hodnotám očakávaným pri návrhu elektroniky čidla.

Celková dĺžka aktívnej fázy externého čidla je približne 750 ms. Počas jedného takéhto cyklu spotrebuje externé čidlo z batérie energiu 0,128 Ws. Počas celého 10 minútového cyklu tj. aktívna fáza a čas medzi meraniami je celková spotreba 0,137 Ws.

Ako ďalšie som urobil meranie priebehu napätia za napájacím zdrojom v blízkosti modulu ESP-WROOM-32. Tento priebeh je na obrázku 5.19. Je vidieť, že zdroj poskytuje požadovanú hodnotu napätia 3,3 V, ale v momente najväčšieho odberu tj. počas inicializácie Wi-Fi bloku dochádza k výraznejšiemu poklesu napätia po dobu asi 20 ms. Počas celej doby skúšobného merania som nespozoroval, že by tento pokles spôsoboval problém s funkčnosťou externého čidla. Na obrázku je vidieť, že po ukončení aktívnej fázy čidla napätie neklesne okamžite na nulu čo je spôsobené nabitými filtračnými kondenzátormi.



Obrázok 5.18: Priebeh spotreby prúdu v aktívnom stave



Obrázok 5.19: Priebeh napätia v aktívnom stave

5.7.4 Odhad výdrže na batérie

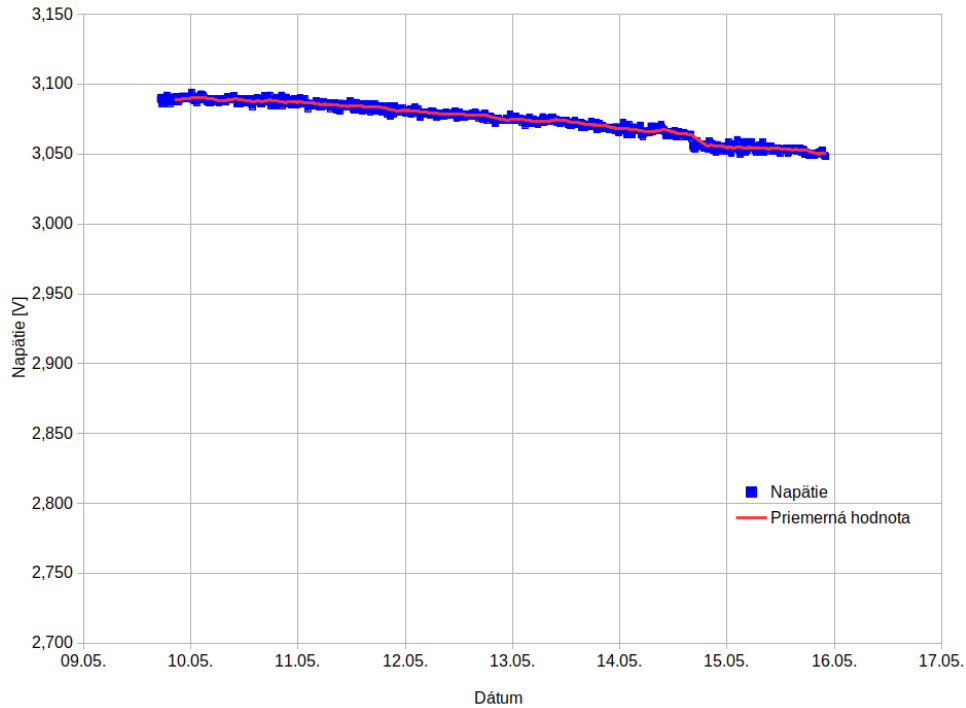
Aby sa maximalizovala výdrž externého čidla, používajú sa alkalické batérie. Keďže skúšobné meranie prebiehalo len krátku dobu približne jedného týždňa je z grafu 5.20 poklesu napätia batérii v čidle veľmi náročné odhadnúť teoretickú výdrž externého čidla. Preto som sa rozhodol urobiť hrubý odhad výdrže na batérie s využitím údajov z datasheetu alkalickej batérie Duracell MN1500 [27]. V tomto datasheete sa nachádza viacero grafov vybíjajúcich charakteristík daného typu batérií pri rôznych podmienkach. Pri odhade som vychádzal z grafu vybíjania konštantným výkonom (obrázok 5.21). Nakoľko externé čidlo má veľmi nízku priemernú spotrebu energie použila sa vybíjacia krivka pre najnižší konštantný výkon 250 mW.

Pri experimentoch, kedy bolo externé čidlo miesto batérií napájané z regulovateľného laboratórneho zdroja, bolo zistené, že boost konvertor pri aktuálnej konfigurácii dokáže zaistiť spoľahlivú činnosť čidla pri minimálnom vstupnom napätí 2,6 V, teda v prípade batériového napájania to odpovedá 1,3 V na článok. Toto obmedzenie vychádza z toho, že pri nižšom vstupnom napätí dochádza pri inicializácii Wi-Fi bloku k takému poklesu napätia, že ESP32 sa reštartuje a nedokáže vykonať merací cyklus.

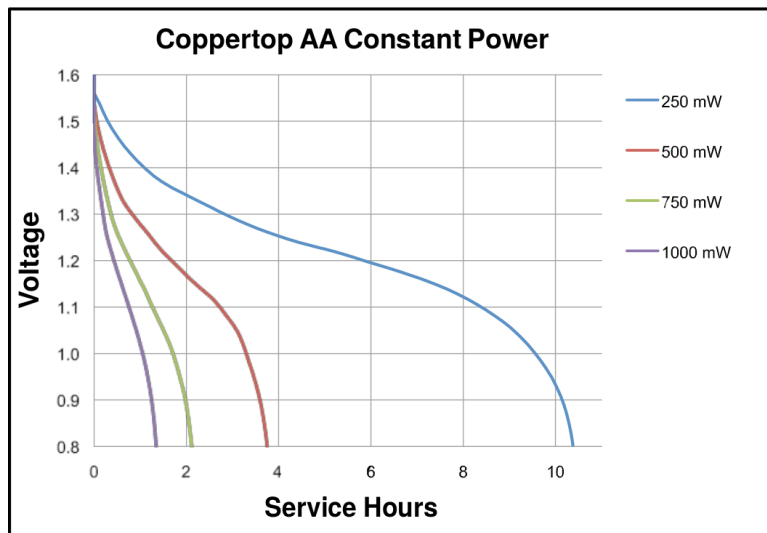
Z grafu vybíjacieho charakteristiky 5.21 je možné odvodiť celkovú energiu, ktorú dokáže jeden článok dodať pred tým, ako klesne jeho napätie na 1,3 V. Tento pokles nastane približne po troch hodinách nepretržitého vybíjania výkonom 250 mW. Z uvedeného vyplýva, že celková energia je 2700Ws. Ako bolo uvedené v časti Meranie spotreby energie 5.7.3, jeden 10 minútový pracovný cyklus spotrebuje 0,137Ws. Jednoduchým výpočtom vychádza hrubý odhad, že externé čidlo by na jednu sadu alkalických batérií malo pracovať minimálne 137 dní.

Táto odhadovaná doba výdrže je pre komerčné uplatnenie nedostatočná a preto cieľom ďalšieho vývoja bude optimalizácia parametrov napájacieho zdroja. Taktiež sa dá predpokladať, že skutočná výdrž bude dlhšia, nakoľko

externé čidlo zaťažuje batérie nerovnomerne, relatívne dlhými obdobiami minimálnej spotreby a veľmi krátkymi obdobiami vyššej spotreby. V dôsledku tohto špecifického spôsobu vybíjania bude možné skutočnú dĺžku životnosti batérií stanoviť až na základe dlhodobého merania.



Obrázok 5.20: Napätie batérie externého čidla



Obrázok 5.21: Vybíjacia charakteristika alkalickej AA batérie. Zdroj: duracell.com

■ 5.8 Odporúčania pre ďalší vývoj

Asi najdôležitejším bodom, ktorý treba zlepšiť, je reakcia napájacieho zdroja externého čidla na prudké zvýšenie odberu pri inicializácii Wi-Fi bloku v ESP32. Čiastočne by sa mohol dať nameraný pokles napätia v tomto kritickom čase vykompenzovať zvýšením kapacity filtračných kondenzátorov umiestnených pri module ESP-WROOM-32. Samotný zdroj (step-up regulátor) v použitej konfigurácii by mal podľa datasheetu do jednej milisekundy zareagovať na zvýšenie odberu čo je podstatne kratšia doba ako trvanie nameraného poklesu. Bolo by teda potrebné urobiť optimalizáciu parametrov zdroja, vhodnou zmenou hodnoty niektorých komponentov. Tým by tiež bolo možné výrazne predĺžiť výdrž externého čidla na jednu sadu batérií.

Kapitola 6

ESP32

ESP32 je SoC (System on Chip) integrovaný obvod vybavený procesorom Xtensa s Harvardskou architektúrou a jedným ULP (Ultra Low Power) procesorom. Bol vyvinutý čínskou spoločnosťou Espressif Systems založenou v Šanghaji. Prvá verzia bola uvedená do predaja v septembri 2016. Je realizovaný 40 nm CMOS technológiou. Primárne je určený ako lacná a výkonná riadiaca jednotka do embedded, IoT a nositeľných (wearable) zariadení. Medzi hlavné výhody patrí priamo zabudované Wi-Fi a Bluetooth rozhranie. Zahŕňa v sebe antény prepínač, výkonový výstupný RF zosilňovač, nízkošumový vstupný RF zosilňovač. Poskytuje veľké množstvo periférií [28].

Firma Espressif Systems vyrába viacero variant integrovaného obvodu ESP32 líšiacich sa veľkosťou zabudovanej pamäte, počtom jadier a výkonnosťou hlavného procesora. V ďalšom texte budem popisovať vlastnosti varianty použitej v našich zariadeniach.

6.1 Základná vlastnosti

Medzi základné vlastnosti ESP32 patrí:

- 32-bitový dvojjadrový procesor Xtensa LX6 s maximálnou frekvenciou 240MHz (600 DMIPS)
- 448 KB zabudovanej ROM
- 520 KB zabudovanej SRAM
- Ultra low power (ULP) koprocessor
- WiFi 11b/g/n (2.4 GHz) do 150 Mbps
- Bluetooth v4.2 BR/EDR BLE dual mode controller
- 34 programovateľných GPIO pinov
- 2 x 12-bit SAR ADC (dohromady 18 kanálov)
- 2 x 8-bit DAC
- 10 x kapacitný dotykový interface

- 16 kanálové PWM
- 4 x SPI
- 2 x I2S
- 2 x I2C
- 3 x UART
- teplotný senzor
- Hallov senzor
- 1 x host (SD/eMMC/SDIO), 1 x slave (SDIO,SPI), Ethernet MAC interface, CAN 2.0
- hardverovo akcelerované kryptografické funkcie (AES, SHA-2, RSA, ECC, generátor náhodných čísel)
- napájanie 3.3 V

6.2 Bližší popis dôležitých častí

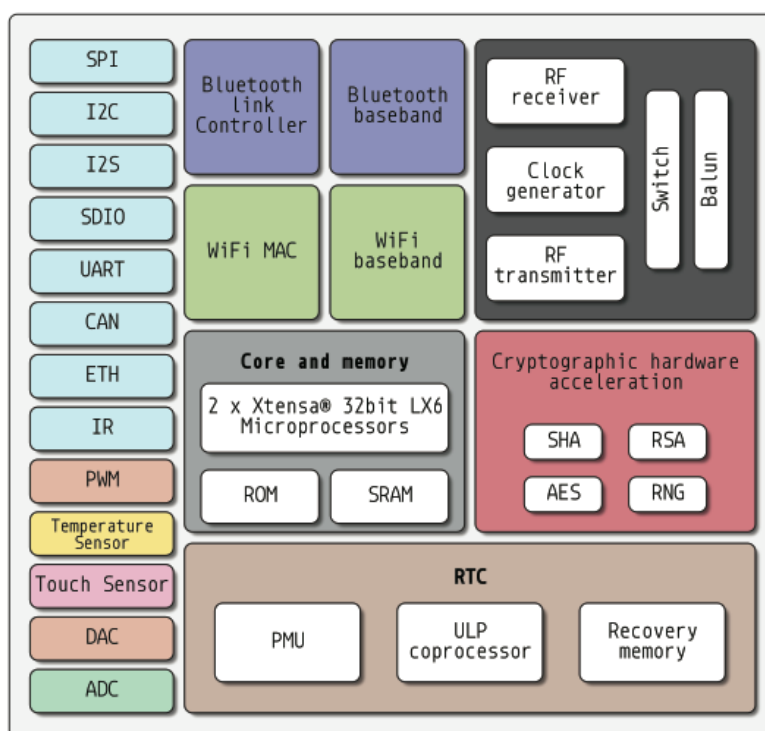
Na získanie predstavy o štruktúre a všestrannosti použitia integrovaného obvodu ESP32 dobre poslúži jeho bloková schéma (obr. 6.1) a stručný popis niektorých jej základných častí, ktoré sú dôležité z hľadiska funkčnosti externého čidla.

6.2.1 Pamäť

Keďže oba hlavné procesory sú 32-bitovej architektúry, umožňujú mapovať až 4GB adresového priestoru, ktorý je symetricky mapovaný a zdieľaný oboma procesormi, čo znamená, že oba procesory môžu pristupovať rovnakou adresou k rovnakej časti pamäte. Vnútornej pamäť ESP32 pozostáva:

- 448 kB ROM pamäte určenej na bootovanie a základné funkcie
- 520 kB SRAM pamäte na uchovávanie dát a inštrukcii programu
- 8 kB SRAM v RTC bloku, ktorá sa nazýva RTC FAST Memory a je prístupná pre hlavný CPU počas procesu bootovania z režimu hlbokého spánku
- 8 kB SRAM v RTC bloku, ktorá sa nazýva RTC Slow Memory a je prístupná pre ULP koprocesor v režime hlbokého spánku
- 1 kb eFuse OTP pamäť, 256 bitov využitých od výroby na uloženie MAC adresy a konfigurácie čipu a 768 bitov ponechaných pre užívateľa

K ESP32 je možnosť pripojiť aj externú SPI pamäť s veľkosťou do 16 MB v prípade Flash pamäte, alebo 8 MB SRAM pamäte.



Obrázok 6.1: Bloková schéma ESP32. Zdroj: core-electronics.com.au

6.2.2 RTC blok

Skratka RTC môže pôsobiť mätúco a jedná sa o tzv. “Espressivizmus”. Túto skratku používa Espressif vo svojich materiáloch na označenie Low-power a analógového subsystemu. Tento systém je oddelený od CPU a hlavných digitálnych periférii. Samotná funkcionálna hodín reálneho času (Real Time Clock) je iba časť RTC bloku. Tento obsahuje aj ďalšie časti, ako PMU - Power Management Unit, ULP koprocessor - Ultra Low Power koprocessor a Recovery memory - pamäť, ktorá sa používa pri prechode ESP32 do a z hlbokého spánku.

Aj vďaka tomuto bloku ESP32 umožňuje využívať niekoľko rozdielnych prevádzkových režimov (Power modes):

- Active mode – vysielateľ a prijímač sú zapnuté a čip môže prijímať a vysielateľ správy. Spotreba v tomto režime sa pohybuje od 100 do 240 mA.
- Modem-sleep mode – CPU funguje, Wi-Fi a Bluetooth sú vypnuté. Spotreba je 20 až 68 mA.
- Light-sleep mode – CPU je v pauze, RTC pamäť a RTC periférie ako aj ULP koprocessor bežia. Ľubovoľná Wake-up udalosť (MAC-media access controller, host, RTC časovač, alebo externé prerušenie) spôsobí zobudenie čipu. Spotreba v tomto móde je asi 0,8 mA
- Deep-sleep mode – Iba RTC pamäť a RTC periférie sú napájané. Wi-Fi a

Bluetooth dáta sú uložené v RTC pamäti. ULP koprocessor je funkčný. Spotreba v tomto režime môže klesnúť až na $10 \mu\text{A}$.

- Hybernation mode – Vnútrotný 8 MHz oscilátor a ULP koprocessor sú neaktívne. RTC recovery pamäť je vypnutá. Aktívne sú iba RTC časovač a RTC GPIOs. Z tohoto režimu môžu čip zobudiť iba RTC časovač alebo RTC GPIOs. Spotreba klesá asi na $5 \mu\text{A}$.

6.2.3 GPIO

Na samotnom integrovanom obvode ESP32 je 49 fyzických kontaktov (vývodov). Z nich je 34 označovaných ako GPIO - General Purpose Input / Output Interface. Týmto kontaktom (pads) je možné priradiť rôzne funkcie a to programovaním príslušných registrov. Niektoré GPIO môžu byť iba digitálne, niektoré môžu byť analógové aj digitálne, niektoré sa dajú nastaviť ako kapacitné snímače. Mnoho digitálnych GPIO môže byť nakonfigurovaných s pull-up, alebo pull-down odporom, alebo s vysokou impedanciou. Teoreticky sa ľubovoľný zo 162 interných periférnych vstupov dá pripojiť na hociktorý GPIO a tiež hociktorý zo 176 interných výstupných signálov sa dá pripojiť na hociktorý GPIO. Vzniká tak veľké množstvo možných kombinácií nastavenia týchto GPIO, ale práve to so sebou prináša niekedy aj problémy a komplikácie, lebo nie každý GPIO sa dá použiť na všetko a navyše niektoré sú vyhradené aj na špeciálne funkcie (napríklad nahrávanie programu) a dostupná dokumentácia občas tieto veci nejasne popisuje.

Uvediem dva príklady, kedy nemusí byť na základe aktuálnej dokumentácie hneď jasné, že by sa mohli vyskytnúť nejaké problémy pri použití špecifických GPIO. Prvým prípadom je použitie analógovo digitálneho prevodníku označeného ako ADC2. Tento prevodník je využívaný Wi-Fi driverom a je nutný pre správnu funkciu Wi-Fi rozhrania. Z toho vyplýva, že analógovo digitálny prevodník ADC2 sa nedá použiť v dobe keď je zapnuté Wi-Fi rozhranie. Druhý prípad je, že niektoré GPIO konkrétne GPIO34-39 sú iba vstupné a nedisponujú softvérovo nastaviteľným pull-up a pull-down rezistorom.

Kapitola 7

ESP-NOW

ESP-NOW je bezdrôtový komunikačný protokol vyvinutý spoločnosťou Espressif, ktorý umožňuje viacerým zariadeniam od firmy Espressif navzájom komunikovať bez použitia Wi-Fi [29].

Tento komunikačný protokol je vybudovaný nad štandardom IEEE 802.11, ktorý popisuje fyzickú a spojovú vrstvu [30]. ESP-NOW je rýchly a bezspojový protokol určený na prenos krátkych paketov primárne medzi IoT zariadeniami. Protokol je podobný nízkoenergetickému bezdrôtovému prepojeniu, ktoré sa často používa v bezdrôtových počítačových myšiach. Beží v pásme 2.4 GHz vďaka čomu môže využívať rovnakú anténu ako Wi-Fi a Bluetooth.

ESP-NOW má nasledovné vlastnosti:

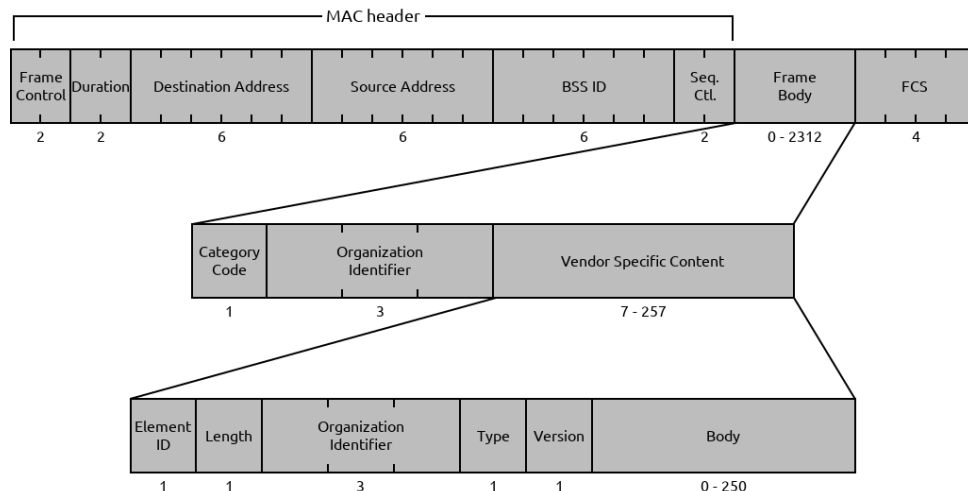
- šifrovaná a nešifrovaná unicast komunikácia
- šifrovanie je zabezpečené CCMP metódou podľa štandardu IEEE 802.11
- časť zariadení môže používať šifrovanie komunikácie, časť nemusí
- správy môžu mať až 250 bajtov
- informovanie o prijatí správy druhým zariadením na spojovej vrstve
- umožňuje pripojenie 16 šifrovaných zariadení a celkovo až 20 zariadení

7.1 Popis rámca protokolu ESP-NOW

Na posielanie správ využíva komunikačný protokol ESP-NOW jeden špecifický rámec zo štandardu IEEE 802.11. Týmto rámcom je Action Vendor-specific rámec. Jeho konkrétna štruktúra pre komunikáciu ESP-NOW je na obrázku 7.1 V nasledujúcej časti uvediem bližší popis niektorých častí tohto rámca:

- MAC hlavička (MAC header)
 - Destination Address – MAC adresa príjemcu
 - Source Address – MAC adresa odosielateľa
 - BSS ID – obsahuje broadcast MAC adresu (0xff:0xff:0xff:0xff:0xff:0xff)

- Telo rámca (Frame Body)
 - Category Code – je nastavené na hodnotu 127 čo indikuje, že sa jedné o výrobcom špecifikovaný akčný rámec (vendor specific category)
 - Organization Identifier – obsahuje prvé 3 bajty z MAC adresy zariadení firmy Espressif (0x18fe34)
- Obsah špecifikovaný výrobcom (Vendor Specific Content)
 - Element ID – je nastavené na hodnotu 221 čo indikuje výrobcom špecifikovaný element (vendor-specific element)
 - Length – obsahuje dĺžku polí Organization Identifier + Type + Version + Body
 - Organization Identifier – obsahuje prvé 3 bajty z MAC adresy zariadení firmy Espressif (0x18fe34)
 - Type – je nastavené na hodnotu 4 čo indikuje, že sa jedná o ESP-NOW
 - Version – verzia komunikačného protokolu ESP-NOW
 - Body – samotné dáta poslané užívateľom



Obrázok 7.1: Štruktúra rámca ESP-NOW

7.2 Použitie protokolu ESP-NOW

Firma Espressif poskytuje vývojárom na prácu s protokolom ESP-NOW knižnicu `esp_now`, ktorá obsahuje všetky potrebné funkcie na kompletnú správu spojenia a prenos dát.

Pred tým, ako je možné použiť protokol ESP-NOW je nutné inicializovať rádiovú komunikáciu. Následne je potrebné inicializovať samotný protokol ESP-NOW. Aby bolo možné poslať správu inému zariadeniu, je nutné pridať

toto zariadenie do zoznamu spárovaných zariadení. Táto akcia pozostáva z vyplnenia dátovej štruktúry, ktorá obsahuje nasledovné údaje:

- MAC adresu párovaného zariadenia
- komunikačný kanál, ktorý sa bude používať na komunikáciu
- údaj či sa bude používať šifrovaná komunikácia
- šifrovací kľúč v prípade šifrovanej komunikácie
- rozhranie, ktoré sa použije na komunikáciu (STA / AP)

Po pridaní párovaného zariadenia je možné mu odoslať správu. Odosielateľ je informovaný, či bola správa príjemcom prijatá na spojovej vrstve. Samotný protokol teda nezaručuje prijatie správy na aplikačnej vrstve, a taktiež nie je zabezpečené jej opakované posielanie ak sa prenos nepodaril.

7.3 Obmedzenia

Pre úspešné fungovanie komunikácie prostredníctvom protokolu ESP-NOW je samozrejme nutné aby obe zariadenia vysielali a počúvali na tom istom Wi-Fi kanály. Ak by jedno zo zariadení z nejakého dôvodu zmenilo číslo komunikačného kanálu (tj. frekvenciu), tak by sa samozrejme komunikácia rozpadla. Zmena kanálu môže byť vynútená potrebami komunikácie s externým AP cez Wi-Fi protokol. Túto situáciu nie je schopný protokol ESP-NOW riešiť automaticky. Pre úspešný súbeh používania Wi-Fi a ESP-NOW je teda nutné aby využívali ten istý komunikačný kanál.

Kapitola 8

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo doplniť centrálnu jednotku IAQ na monitorovanie kvality vnútorného ovzdušia o dotykový farebný LCD displej a vytvorenie externého čidla teploty a vlhkosti.

V prvej časti bolo najprv potrebné overiť a sprevádzkovať hardvérové zapojenie dotykového displeja. Následne navrhnuť kompletne softvérové riešenie obsluhy tohto displeja vrátane vyhodnocovania dotykov. Vytvorené užívateľské rozhranie displeja poskytuje možnosť prezerania hodnôt jednotlivých meraných veličín ako aj vykonávať zmeny nastavenia centrálnej jednotky IAQ.

Druhá časť je zameraná na hardvérový, ale aj softvérový návrh a realizáciu externého čidla teploty a vlhkosti s dôrazom na nízku spotrebu energie, aby bolo možné napájať toto zariadenie pomocou dvoch AA batérií. Externé čidlo využíva na komunikáciu s centrálnou jednotkou IAQ bezdrôtový protokol ESP-NOW, pričom rádiový prenos sa uskutočňuje na frekvencii 2,4 GHz. Preukázala sa vhodnosť použitia tohto protokolu na prenos nameraných údajov medzi externým čidlom a centrálnou jednotkou. To dáva ďalšie možnosti využitia tohto protokolu v zariadeniach s unifikovaným Espressif hardvérom, kde môže byť použité jednak klasické Wi-Fi tak aj nízkoenergetický protokol ESP-NOW súčasne.

Obe časti boli navrhnuté a realizované podľa zadania bakalárskej práce a boli odskúšané v niekoľko týždňovej skúšobnej prevádzke. Testovanie slúžilo jednak k získaniu prezentačných dát, ale aj na posúdenie, či sa externé čidlo správa podľa požiadaviek určených pri návrhu.

Odhadovaná doba funkčnosti externého čidla na jednu sadu batérií bola stanovená na 137 dní (viď časť 5.7.4). Túto dobu by bolo vhodné pre komerčné využitie zariadenia predĺžiť, a preto údaje z tohto testovacieho obdobia budú použité na ďalšie zdokonaľovanie čidla. Predovšetkým k zlepšeniu doby funkčnosti na jednu sadu batérií vyladením parametrov napájacieho zdroja.

Implementácia farebného dotykového LCD displeja, a tiež návrh a realizácia externého čidla úspešne splňajú všetky body zadania bakalárskej práce. Čo sa podarilo prakticky demonštrovať na funkčnom prototypu pri dlhodobom teste.

Dodatok A

Literatúra

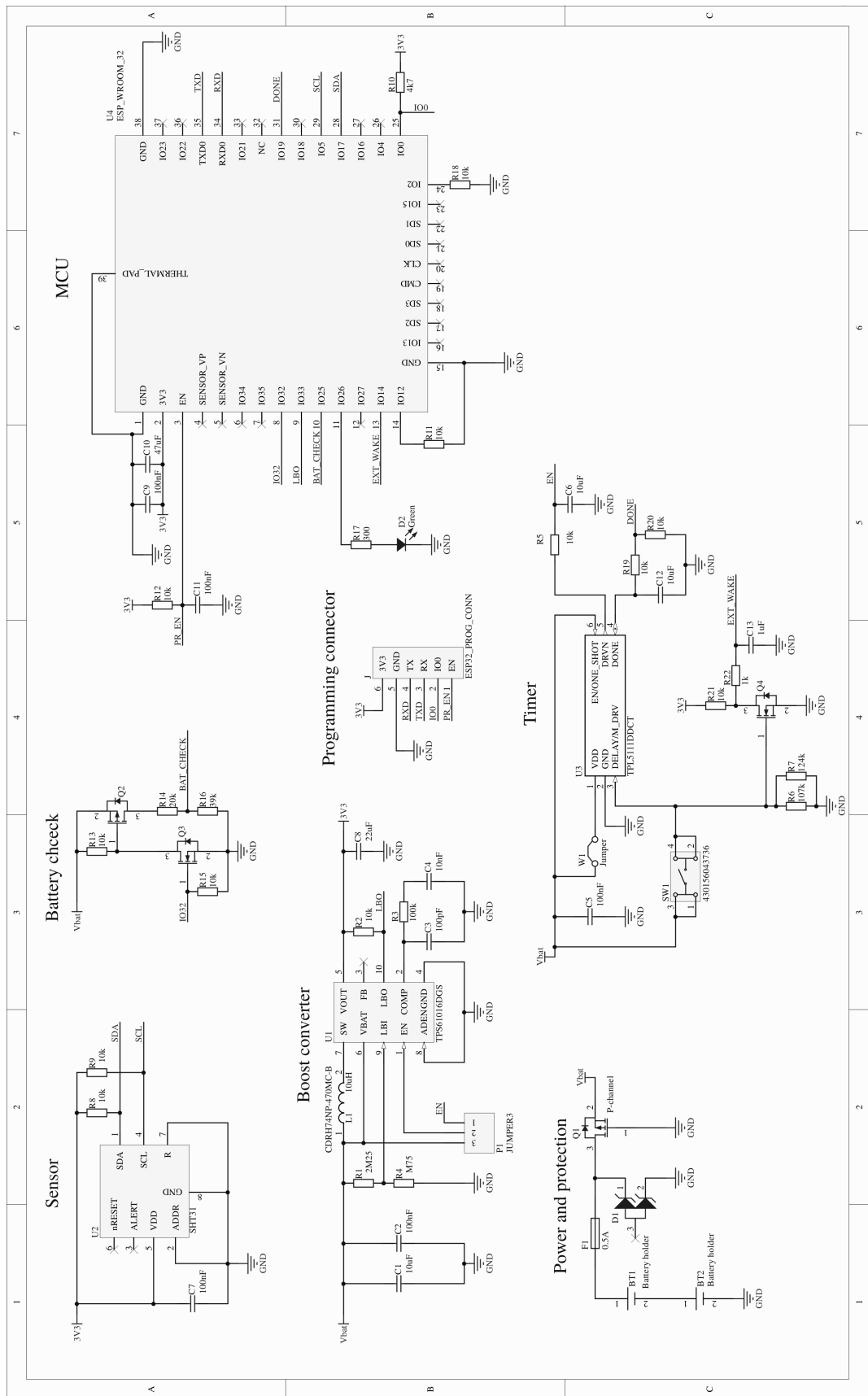
- [1] Európska environmentálna agentúra: Kvalita vnútorného ovzdušia. <https://www.eea.europa.eu/sk/signaly-eea/signaly-2013/clanky/kvalita-vnutorneho-ovzdusia>, 2016, získané: 19. 5. 2019.
- [2] Ing. Jan Včelák, Ph.D. et al.: Platforma pro monitoring vnitřního prostředí. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitрни-prostredi/15755-platforma-pro-monitoring-vnitрниho-prostredi>, 2017, získané: 19. 5. 2019.
- [3] Ing. Hana Doležilková, Ph.D.: Kvalita vnějšího a vnitřního vzduchu. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitрни-prostredi/6486-kvalita-vnejsiho-a-vnitрниho-vzduchu>, 2010, získané: 19. 5. 2019.
- [4] Ing. Vojtěch Skřivánek: Senzor kvality vnitřního prostředí. 2016.
- [5] Ing. Jan Mrňa: Bezdrátová platforma pro monitoring kvality vnitřního vzduchu. <https://dSPACE.cvut.cz/handle/10467/76277>, 2018, získané: 19. 5. 2019.
- [6] Netatmo: Smart Home Weather Station. <https://www.netatmo.com/en-row/weather/weatherstation>, získané: 19. 5. 2019.
- [7] Honeywell: IAQPoint2 Specifications. https://www.honeywellanalytics.com/~media/honeywell-analytics/products/iaqpoint2/documents/ss011041_en_iaqpoint2_specsheet_v4_flr_11-15-13.pdf?la=en, 2013, získané: 19. 5. 2019.
- [8] ARCHOS: ARCHOS Weather Station. <http://www.archos.com/us/products/objects/chome/aws/index.html>, získané: 19. 5. 2019.
- [9] IQAir: Air Quality Monitor. <https://www.airvisual.com/air-quality-monitor>, získané: 19. 5. 2019.
- [10] Air Mentor Intelligence: Air Mentor 2: Indoor Air Quality Detector. https://air-mentor.eu/product/air_mentor_8099ap.html, získané: 19. 5. 2019.



Dodatok B

Kompletná schéma externého čidla

B. Kompletná schéma externého čidla



Dodatok C

Obsah priloženého CD

- ├ Kniznice_cent_jed/...knižnice k obsluhu displeja a externého čidla
 - └ Displejova_grafika/
- ├ Namerane_data_ext_cid/.....dáta namerané externým čidlom
- ├ Plosny_spoj_ext_cid/.....dáta k plošnému spoju
 - └ Altium16_data/
 - └ BOM/
 - └ ExportSTEP/
 - └ GerberX2/
 - └ NC Drill/
- ├ Program_ext_cid/.....zdrojový kód externého čidla
- ├ README.txt.....popis obsahu CD
- └ text_prace.pdf