

Zadání bakalářské práce



146994

Ústav: Ústav počítačových systémů (UPSY)
Student: **Kováč Richard**
Program: Informační technologie
Specializace: Informační technologie
Název: **Zařízení pro sběr dat v oblasti monitorování potravinového řetězce**
Kategorie: Vestavěné systémy
Akademický rok: 2022/23

Zadání:

1. Připravte stručný přehled aktuálně používaných zařízení pro sběr dat v oblasti monitorování potravinového řetězce. Zabývejte se zejména jejich technickým řešením.
2. Navrhněte koncepci vlastního zařízení pro sběr dat v oblasti monitorování potravinového řetězce, které bude reflektovat skutečnosti zjištěné v bodu 1.
3. Zvolte vhodné komponenty pro obvodovou realizaci koncepce dle bodu 2. Dále vytvořte desku plošných spojů pro technickou realizaci navrženého zařízení.
4. S ohledem na koncepci z bodu 2 a technickou realizaci z bodu 3 implementujte obslužný firmware zajišťující požadovanou funkcionalitu.
5. Výsledné řešení pečlivě otestujte při praktickém nasazení.
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte možnosti pokračování projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:
Splnění bodů 1 až 3 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Šimek Václav, Ing.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1.11.2022
Termín pro odevzdání: 10.5.2023
Datum schválení: 31.10.2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**ZAŘÍZENÍ PRO SBĚR DAT V OBLASTI
MONITOROVÁNÍ POTRAVINOVÉHO ŘETĚZCE**

DATA COLLECTION DEVICE FOR FOOD CHAIN MONITORING DOMAIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RICHARD KOVÁČ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV ŠIMEK,

BRNO 2023

Abstrakt

Cielom tejto práce je preskúmať zákonné a praktické požiadavky na monitorovanie prostredia v rôznych druhoch skladov potravín a na základe zistených poznatkov navrhnuť a vyhotoviť IoT senzor. Práca zahŕňa krátke zhrnutie spôsobu skladovania potravín a prieskum zákonných požiadaviek kladených na prevádzkovateľov skladov. Ďalej sa práca venuje prieskumu skutočných procesov a zariadení na monitorovanie skladov, požiadaviek a postrehov prevádzkovateľov so zameraním na verejný sektor. Výsledkom nazbieraných dát, zákonných a praktických požiadaviek je návrh a vyhotovenie elektronického zariadenia, ktorému sa práca podrobne venuje. Súčasťou návrhu je abstraktný koncept, výber vhodných elektronických komponentov, vytvorenie elektronickej schémy a návrh plošného spoja. Ďalej sa práca venuje vyhotoveniu elektroniky a dizajnu krabičky s ohľadom na minimálnu možnú veľkosť. V práci je tiež popísaný firmvér, aspekty vývoja firmvéru pre batériou napájané zariadenia s nízkou spotrebou a dlhou výdržou. Práca sa tiež venuje vyhodnoteniu dát nazbieraných počas testovania a možnostiam ďalšieho vývoja.

Abstract

The goal of this thesis is to explore the legal and practical requirements of food chain monitoring in different types of storage facilities and to design and build an IoT sensor based on gathered data and real-life requirements. The thesis features a short description of legal requirements for food storage safety and food storage techniques. It also explores real life conditions and devices used in food storage monitoring in government-ran facilities. The thesis describes IoT sensor design using discovered legal requirements and data gathered from observations and consultations. It features an abstract design concept, selection process of electronic components, schematics design and PCB design for an IoT sensor. The thesis then describes hardware assembly as well as enclosure CAD design with the requirement of minimal size. It also describes firmware development process, features of this sensor and describes best practices for firmware development for battery powered IoT devices. Finally, it evaluates collected data and explores possible future development.

Klíčová slova

monitorovanie, senzor, IoT

Keywords

food, chain, monitoring, IoT

Citace

KOVÁČ, Richard. *Zařízení pro sběr dat v oblasti monitorování potravinového řetězce*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Šimek,

Zařízení pro sběr dat v oblasti monitorování potravinového řetězce

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Václava Šimka. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Richard Kováč
4. května 2023

Poděkování

Ďakujem Ing. Václavovi Šimkovi za pomoc pri vedení bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Skladovanie potravín a legislatívne požiadavky	4
2.1	Potravinový kódex	4
2.1.1	Sledované prostredia	4
2.2	Technické požiadavky na vyvíjané zariadenie	5
3	Monitorovanie skladov v praxi	6
3.1	Nedostatky terajšieho systému a želaná funkcionality	6
3.1.1	Zhrnutie požiadaviek	7
3.1.2	Zariadenia dostupné na trhu	7
4	Návrh IoT zariadenia	9
4.1	Abstraktný návrh	9
4.2	Výber elektronických komponentov	10
4.3	Riadiaci mikrokontrolér	10
4.3.1	ESP32-C3	10
4.4	Senzor vlhkosti a teploty	11
4.4.1	AHT21	11
4.5	Senzor pohybu	12
4.5.1	LIS2D	12
4.5.2	Senzor okolitého svetla	13
4.6	Použité technológie: Hardvér	13
5	Realizácia hardvéru	16
5.1	Elektronická schéma	16
5.1.1	Napájacia architektúra	16
5.1.2	Zapojenie senzorov	18
5.1.3	Zapojenie riadiaceho mikrokontroléra	19
5.2	Doska plošných spojov	20
5.3	CAD návrh krabičky	21
6	Architektúra obslužného firmvéru	22
6.1	Vývojový diagram architektúry firmvéru	23
6.2	Detailný pohľad na komponenty firmvéru	24
6.2.1	Konfigurácia pomocou BLE	24
6.2.2	Konfigurácia senzorov	26
6.2.3	Zber dát a ich perzistentné ukladanie	27

6.2.4	Komunikácia s API a nahrávanie dát	28
6.3	Použité technológie: softvér	32
7	Analýza výsledkov	33
7.1	Umiestnenie č.1 - technická miestnosť	33
7.2	Umiestnenie č.2 - kancelárske priestory	34
7.3	Umiestnenie č.3 - chladnička	35
7.4	Optimalizácia periód zberu dát a nahrávania dát na webovú API	36
7.5	Vplyv zvoleného hardvéru na praktické aspekty zberu dát	36
7.5.1	Nepresnosť sledovania aktuálneho času	36
7.5.2	Nepresnosti vstavaného analógovo-digitálneho prevodníka	37
7.6	Analýza spotreby energie	37
8	Závěr	39
	Literatura	40
A	Zoznam súčiastok	41
B	Obsah priloženého pamäťového média	42
C	Použité webové užívateľské rozhranie	43
D	Elektrická schéma senzoru	44

Kapitola 1

Úvod

Skladovanie potravín je dôležitá a nevyhnutná súčasť veľkého množstva súkromných podnikov ale aj štátnych zariadení. Nesprávne postupy môžu mať nielen legislatívny ale aj zdravotný dopad a je preto dôležité veličiny ovplyvňujúce kvalitu potravín počas skladovania presne sledovať.

Tradičný spôsob periodického záznamu zamestnancami má veľa nevýhod, hlavnou z nich je ľudský faktor - často nesprávne odčítanie veličín či nedostatočne časté merania. Meracie prístroje používané v analyzovanom štátnom zariadení sú nepresné a zastarané, čo je realita väčšiny podobných verejných inštitúcií na Slovensku. Cieľom práce je navrhnúť také zariadenie, ktoré nielen odstráni ľudský faktor automatizovanými meraniami a záznamom, ale ponúkne aj pridanú hodnotu vo forme funkcionality, ktorou konkurenčné zariadenia nedisponujú.

Výsledné zariadenie musí nielen merať teplotu a vlhkosť s presnosťou, ktorú udáva legislatíva a ponúkať užitočnú funkcionality navyše ale aj byť ekonomické a cenovo výhodné. Nielen v podobe lacného hardvéru ale tiež využitím dostupných a bezplatných bezdrôtových technológií - WiFi a Bluetooth. Dôležité je tiež zabezpečenie a dôvernosť dát, užívateľská prívetivosť hardvéru aj softvéru a možnosť samoinštalácie užívateľom.

V nasledujúcich kapitolách budeme popisovať postup návrhu architektúry, výberu elektronických komponentov, zostaveniu zariadenia a vytvoreniu obslužného firmvéru IoT senzora určeného na monitorovanie skladov potravín. V druhej kapitole sme našťudovali legislatívne požiadavky na zariadenia monitorujúce sklady potravín a v kapitole tretej ich dodržiavanie v praxi. V nasledujúcej kapitole sme navrhli IoT zariadenie na základe poznatkov z predošlého výskumu a v kapitolách päť a šesť sme sa zamerali na realizáciu navrhnutého zariadenia. V siedmej kapitole sme sa zamerali na podrobnú analýzu výsledkov meraní.

Kapitola 2

Skladovanie potravín a legislatívne požiadavky

Na výrobu, manipulovanie s potravinami a ich skladovanie sa kladú vysoké nároky keďže nevhodná práca s potravinami a zanedbávanie hygienických zásad môže mať ďalekosiahle následky od ekonomických dopadov až po ohrozenie života a zdravia. Okrem hygienických zásad je nutné monitorovať aj mikroklimatické podmienky v skladoch potravín čím sa zaoberá aj táto práca. Odvetvie práce s potravinami reguluje Štátna veterinárna a potravinová správa Slovenskej Republiky (ďalej SVPS SR) a konkrétne Potravinový kódex [13].

2.1 Potravinový kódex

Potravinový kódex je zbierka štandardov, postupov, smerníc a doporučení vzťahujúcich sa na bezpečnosť potravín ktorá spadá pod SVPS SR. Z tejto rozsiahlej zbierky právnych dokumentov je pre našu prácu relevantný výnos č. 28167/2007-OL [11], konkrétne §9 čl. 4 pojednávajúci o klimatických podmienkach v rôznych druhoch skladov a prislúchajúcich mikroklimatických podmienok.

2.1.1 Sledované prostredia

Navrhovaný senzor musí byť schopný sledovať relatívnu vlhkosť a teplotu v štyroch druhoch skladov:

- Suchý sklad
Teplotný rozsah: nesledovaný
Vlhkostný rozsah: 65 až 70% rel. vlhkosti
- Chladný sklad
Teplotný rozsah: 8 až 10 st. C
Vlhkostný rozsah: 80 až 90% rel. vlhkosti
- Chladený sklad
Teplotný rozsah: 2 až 6 st. C
Vlhkostný rozsah: 80 až 90% rel. vlhkosti

- Mraziarenský sklad

Teplotný rozsah: -12 až -18 st. C

Vlhkostný rozsah: nesledovaný

2.2 Technické požiadavky na vyvíjané zariadenie

Z vyššie uvedených teplotných a vlhkostných rozsahov vyplývajú nasledovné technické požiadavky:

- **Rozsah meranej teploty:** -18°C až 40°C
- **Rozsah meranej vlhkosti:** 0% až 100% relatívnej vlhkosti vzduchu

Okrem technických požiadaviek na merané rozsahy veličín nám legislatíva určuje aj rozsahy presnosti teploty, ktoré presnejšie popisuje norma EN 12830:2018 a jej triedy presnosti v tabuľke 2.1.

Tabuľka 2.1: Triedy presnosti podľa EN 12830:2018

Trieda	0,2	0,5	1	2
Maximálna dovolená odchýlka	±0.2°C	±0.5°C	±1°C	±2°C
Rozlíšenie	<0,1°C	<0,2°C	<0,5°C	<1°C

Konkrétne pre sklady potravín je platná trieda 0.5 tabuľky 2.1, teda $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Ak by sme sa chceli striktne držať platnej legislatívy, konkrétne zákona o metrológii č. 157/2018 Z. z.[12] bolo by nutné každý senzor kalibrovať v akreditovanom laboratóriu, keďže teplomery používané v zariadeniach spoločného stravovania na monitorovanie podmienok pri skladovaní a výrobe potravín sú zaradené medzi povinne kalibrované meradlá.

Kapitola 3

Monitorovanie skladov v praxi

Keďže formálne požiadavky a skutočná prax sa v reáliách štátnych zariadení často rozchádzajú, považovali sme za podstatnú časť práce navštíviť miesto, kde bude vyvíjaný senzor potenciálne nasadený a zistiť skutočné požiadavky na vyvíjaný senzor vyplývajúce z praxe. Návšteva štátneho sociálneho zariadenia tiež ponúkla možnosť zistiť, aká pridaná funkcionálna by bola vítaná.

3.1 Nedostatky terajšieho systému a želaná funkcionálna

V kontraste s legislatívou požadovanou presnosťou sú bežne zaužívané praktiky a používané meradlá. Meradlá sú zastarané, nepresné a necertifikované. Požadovanú periodicitu meraní by mali zabezpečiť zamestnanci, ktorí ale často zabúdajú či svoje povinnosti ignorujú. Manuálnym odčítavaním analógových meracích prístrojov tiež vznikajú odchýlky a chyby.

Ďalším problémom je fakt, že podľa legislatívy, konkrétne vyhlášky č. 533/2007 Z. z. [10] je každá mraznička či chladnička považovaná za oddelený sklad a teda je nutné v ňom sledovať teplotu a vlhkosť kalibrovaným meradlom. Teda stredne veľké až veľké sociálne zariadenie, ktoré má 4-5 kombinovaných chladničiek a mrazničiek, jeden suchý a chladný sklad musí každú hodinu sledovať vlhkosť a teplotu až na 10-12 miestach. Zároveň je nutné myslieť aj na to, že merané sklady sa môžu nachádzať na nedostupných, RF tiených miestach (pivnice, chladničky a pod.).

V požiadavkách na želanú funkciu sa okrem dlhej výdrže, bezúdržbovosti a spoľahlivosti objavili aj detekcia otvorených dverí na chladničke / mrazničke, detekcia zapnutého svetla či upozornenie na prekročenie bezpečných limitov.

3.1.1 Zhrnutie požiadaviek

Z predošlej kapitoly a odstavcov nám teda vyplývajú nasledovné technické požiadavky na navrhovaný senzor:

- Meranie teploty a vlhkosti v rozsahu 0 až 100% RH, -18 až 40°C s presnosťou $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Komunikácia pomocou Bluetooth a/alebo WiFi
- Možnosť samoinštalácie, bezúdržbovosť a spoľahlivosť
- Pridaná funkcionálna vo forme detekcie pohybu a úrovne okolitého svetla

S týmto zoznamom minimálnej funkcionality a vlastností sa teda môžeme presunúť k faktickému návrhu elektroniky a hardvéru všeobecne.

3.1.2 Zariadenia dostupné na trhu

Všeobecne môžeme zariadenia na monitorovanie mikroklímy v skladoch rozdeliť na dve kategórie - so záznamom a bez. Zariadenia so záznamom ďalej môžu voliteľne ponúkať formu vzdialeného odpočtu či pripojenia do webovej databázy. Oba druhy zariadení môžu tiež byť certifikované akreditovaným laboratóriom v súlade s platnou legislatívou podľa normy EN 12830:2018. Z ekonomických dôvodov sú zariadenia umožňujúce záznam teploty či vzdialený odpočet mimo finančných možností štátnych zariadení a veľkého množstva súkromných.

Ako príklad zariadenia bežne používaného na monitorovanie mikroklímy v skladoch uvediem teplomer s vlhkomerom TFA 30.5027.02 viditeľnom na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Teplomer s vlhkomerom TFA 30.5027.02

Toto jednoduché zariadenie umožňujúce vizuálne odčítať aktuálnu teplotu a vlhkosť v sklade stojí v prepočte 1125Kč bez DPH¹. **Keďže štátne zariadenia sa riadia pri obstarávaní vybavenia primárne cenou, ekonomickým cieľom návrhu nášho IoT zariadenia je rovnaká alebo nižšia cena ako bežne dostupné a používané meradlá.**

¹Cena ku dňu 20.1.2023 v obchode www.metershop.sk

Zo zariadení s podobnými technickými vlastnosťami sme vybrali dva priemyselné dataloggery², konkrétne Testo 160 TH Wifi (obrázok 3.2a) a AiroSensor TRH ER (obrázok 3.2b). Oba tieto dataloggery umožňujú záznam dát s porovnateľnou presnosťou, rovnako umožňujú dáta nahrávať na web a na diaľku monitorovať či konfigurovať senzor. Zariadenie Testo 160 TH Wifi sa pripája do konvenčných WiFi sietí, zariadenie AiroSensor TRH ER potrebuje prístupový bod, resp. stanicu od výrobcu. **Ceny týchto zariadení sú v prepočte 7570Kč pre Testo 160 TH Wifi a 6250Kč s DPH pre AiroSensor TRH ER.**



(a) Testo 160 TH Wifi



(b) AiroSensor TRH ER

Obrázok 3.2: Dataloggery s podobnými technickými vlastnosťami

²Batériou napájaný záznamník dát

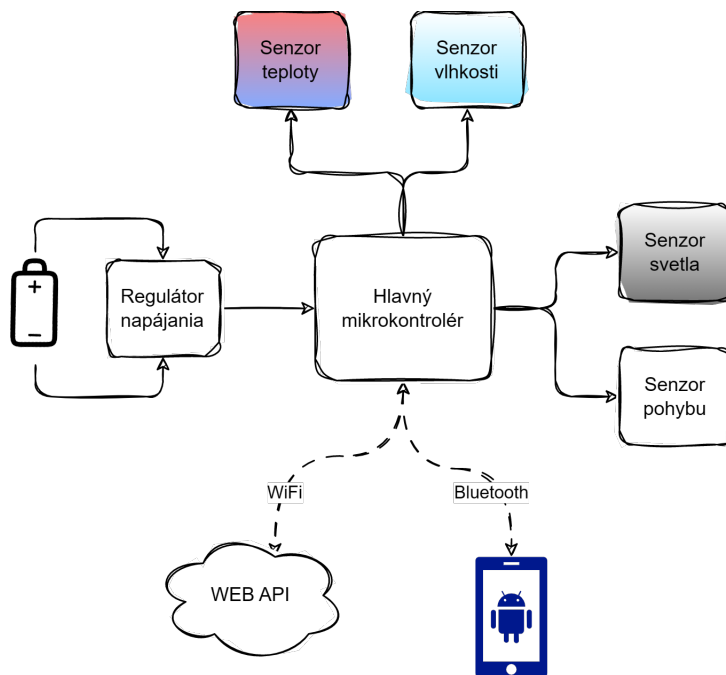
Kapitola 4

Návrh IoT zariadenia

Návrh zariadenia bude prebiehať na základe informácií z predošlých kapitol v niekoľkých krokoch. Zo všeobecných požiadaviek je nutné vytvoriť abstraktný návrh fungovania navrhovaného IoT senzora. Na základe abstraktného návrhu spraviť výber komponentov a následne vytvoriť elektronickú schému a návrh plošného spoja. Podľa fyzického zariadenia je následne nutné navrhnuť a vyrobiť krabičku.

4.1 Abstraktný návrh

Navrhované zariadenie bude riadiť hlavný mikrokontrolér, ktorý by mal disponovať WiFi a Bluetooth modemom na komunikáciu s webovým rozhraním a mobilným zariadením. Napájanie bude realizované akumulátorom a napájacím regulátorom. Na zbieranie dát budeme potrebovať senzory teploty a vlhkosti či jeden senzor zastupujúci obe funkcie. Ďalej budeme monitorovať úroveň okolitého svetla a sledovať pohyb zariadenia.



Obrázek 4.1: Abstraktný návrh IoT zariadenia

Výsledné zariadenie musí byť malých rozmerov, s dlhou výdržou na jednej sade akumulátorov a umožňovať užívateľom výmenu akumulátorov. Zariadenie by malo byť odolné voči vlhkosti a striekajúcej vode, keďže sa dá predpokladať nasadenie v mokrých prostrediach. Rovnako nesmieme zabúdať na odolnosť voči nízkym teplotám a teplotným výkyvom. Výslednú podobu architektúry obsahuje obrázok 4.1.

4.2 Výber elektronických komponentov

Začneme základným stavebným prvkom navrhovaného senzoru, riadiacim mikrokontrolérom.

4.3 Riadiaci mikrokontrolér

Hľadáme súčiastku, ktorá bude mať dostatočne vysoký výkon a množstvo pamäte na zabezpečenie webovú komunikáciu (TLS 1.2 pomocou mbedTLS) a zároveň vysokú energetickú efektívnosť. Konkrétnejšie pravdepodobne SOC s modernou architektúrou jadra ARM, prípadne RISC-V, pamäťou v jednotkách megabajtov a integrovaným WiFi/Bluetooth modemom. Nízka jednotková cena je tiež samozrejmosťou. Ideálna súčiastka je tiež dostupná vo forme modulu s integrovanou Flash pamäťou a anténou. Rovnako nutným kritériom je podpora komunitou podporovaných vývojových prostredí s veľkým množstvom knižníc.

Ideálnym kandidátom sú produkty Čínskej firmy **Espressif Systems**, konkrétne rada ESP32-XX. Espressif systems je známy Čínsky fabless¹ výrobca polovodičových súčiastok. Espressif na trhu pôsobí od roku 2008 a kancelárie má aj na území Českej republiky. Ich polovodičové súčiastky vyrába firma Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited (známa tiež ako TSMC) 40nm výrobným procesom. Rada ESP32-XX je podporovaná frameworkom² Arduino.

Produktová rada ESP32-XX obsahuje zariadenia ako s ARM jadrom (Tensilica Xtensa LX6/LX7) tak aj RISC-V.

4.3.1 ESP32-C3

Najviac vyhovujúci je variant ESP32-C3, konkrétne vo forme modulu ESP32-C3-WROOM-02 (obrázok 4.2) s nasledovnými parametrami (detailnejšie popísané v technickej dokumentácii[4]).



Obrázok 4.2: Modul ESP32-C3-WROOM-02

¹Výrobca bez vlastných výrobných kapacít zaoberajúci sa primárne návrhom nie fyzickou výrobou

²Podporný softvér umožňujúci rýchlu implementáciu aplikácie

- Jednojadrový **32bit RISC-V procesor s frekvenciou do 160MHz**
- 400KiB SRAM³, 8KiB RTC SRAM⁴, 384KiB ROM⁵ a **programová pamäť o veľkosti 4MB**
- **WiFi v 2,4GHz pásme** (IEEE 802.11b/g/n) s rýchlosťou prenosu až 150Mb/s
- **Bluetooth 5 (LE)**
- 15 programovateľných výstupov, z toho dva 12-bitové prevodníky analógových signálov na digitálne (ďalej ADC)

Tento SOC modul má vysoký výkon, modernú architektúru, dostatok digitálnych či analógových rozhraní a veľmi nízku jednotkovú cenu približne **50kč bez DPH⁶**. Tiež je plne podporovaný frameworkom Arduino.

4.4 Senzor vlhkosti a teploty

Z dôvodu úspory miesta na doske plošných spojov (ďalej PCB) je ideálne zlúčiť senzor teploty a vlhkosti do jedného zariadenia. Okrem vyššie uvedených požiadaviek na rozsah meraných veličín a presnosť meraní je tiež nutné, aby bol vybraný senzor / integrovaný obvod miniatúrnych rozmerov.

4.4.1 AHT21

Ideálnym kandidátom je jednočipový, polovodičový senzor **AHT21** (obrázok 4.3) od čínskeho výrobcu senzorov ASAIR.

ASAIR je obchodné meno spoločnosti Aosong Electronic Co. LTD založenej v roku 2003. Aosong je jeden z prvých a predných výrobcov MEMS⁷ polovodičov v Číne.

Technické parametre senzoru AHT21 sú nasledovné (dostupné tiež v technickej dokumentácii[1]):

- Rozsah merania vlhkosti **0 až 100% RH**
- Rozsah merania teploty **-40 až 120°C**
- Presnosť merania vlhkosti $\pm 2\%$ RH
- Presnosť merania teploty $\pm 0,3^\circ\text{C}$
- Rozlíšenie $0,01^\circ\text{C}$ a $0,024\%$ RH
- Digitálne rozhranie I2C

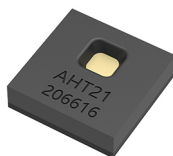
³pamäť RAM pre beh bežného kódu

⁴pamäť RAM pre beh RTC kódu, viac v kapitole Firmvér

⁵pamäť umožňujúca iba čítanie obsahujúca dáta od výrobcu

⁶Údaj z obchodu www.mouser.com zo dňa 20.1.2023

⁷Micro Electro Mechanical Systems - mikroelektromechanická polovodičová súčiastka



Obrázek 4.3: Senzor AHT21

Tento miniatúrny kombinovaný senzor vlhkosti a teploty má nielen vysokú presnosť a miniatúrne rozmery ale aj veľmi nízku jednotkovú cenu na úrovni približne **18Kč bez DPH**⁸

4.5 Senzor pohybu

Ideálnym riešením monitorovania pohybu s nízkymi energetickými, finančnými nákladmi a miniatúrnou veľkosťou je MEMS akcelerometer. Zariadenie, ktoré hľadáme, musí byť miniatúrne, s veľmi nízkou spotrebou, cenou a možnosťou detekcie pohybu v spánku (akcelerometer deteguje pohyb a zobudí mikrokontrolér hardvérovým prerušením). Absolútna presnosť či schopnosť detegovania vysokého zrýchlenia pre nás nieje dôležitá.

4.5.1 LIS2D

LIS2D je rada miniatúrnych 3-osých akcelerometrov od firmy STMicroelectronics.

STmicro je najväčší Európsky výrobca polovodičových súčiastok od výkonových tranzistorov po 32-bitové SOC mikrokontroléry s jadrom ARM.

Konkrétne sme vybrali variant **LIS2DW12** (obrázok 4.4). Presnejšie parametre akcelerometra LIS2DW12 sú nasledovné (tiež dostupné z technickej špecifikácie^[5]):

- **Spotreba 1 μ A** v aktívnom móde
- Rôzne módy fungovania vrátane detekcie pohybu a klopania
- Rozsah $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
- Vzorkovacia frekvencia od 1Hz až po 1,6KHz
- Digitálne rozhranie I2C⁹

Tento miniatúrny MEMS akcelerometer má jednotkovú cenu približne **20Kč bez DPH**¹⁰.

⁸Údaj z obchodu www.lcsc.com zo dňa 20.1.2023

⁹Inter-Integrated Circuit je sériová zbernica s dvoma komunikačnými linkami určená na komunikáciu v rámci PCB

¹⁰Údaj z obchodu www.lcsc.com zo dňa 20.1.2023



Obrázek 4.4: Akcelerometer LIS2DW12

4.5.2 Senzor okolitého svetla

Snímanie okolitého svetla nám umožní detegovať napríklad otvorené okno či otvorené dvere na chladničke. Z tohto pohľadu teda hľadáme jednoduchú súčiastku, ktorej presnosť a citlivosť nie sú dôležité. Samozrejmosťou sú malé rozmery a nízka cena.

Z tohto pohľadu sa javí ako ideálne riešenie jednoduchý fotorezistor (obrázok 4.5). Keďže meraná veličina (jas) je reprezentovaná zmenou odporu súčiastky, bude nutné zapojenie napäťového deliča a využitia vstavaného analógovo-digitálneho prevodníka.



Obrázek 4.5: Fotorezistor

4.6 Použitie technológie: Hardvér

RISC-V architektúra

RISC-V je open-source architektúra inštrukčného súboru (ISA), ktorá je navrhnutá tak, aby bola jednoduchá, rozšíriteľná a prispôsobiteľná pre rôzne výkonné zariadenia. Je to architektúra redukovaného inštrukčného súboru (RISC), ktorá má jednoduchý inštrukčný set s pevným formátom inštrukcií umožňujúci jednoduchšie navrhovať a optimalizovať procesory pre konkrétne aplikácie.

Jednou z kľúčových výhod architektúry RISC-V je jej flexibilita a škálovateľnosť, ktoré umožňujú použitie v širokom spektre aplikácií, od vstavaných systémov s nízkym výkonom až po vysokovýkonné výpočtové jednotky. Zároveň, ako open-source architektúra, RISC-V umožňuje spoluprácu a inovácie v rôznych priemyselných odvetviach a akademických komunitách, čo vedie k rýchlejšiemu vývoju a prijímaniu nových technológií.

ARM architektúra

ARM je rodina mikroprocesorových architektúr typu RISC, vyvinutých spoločnosťou ARM Holdings, britským holdingom zameraným na vývoj polovodičových zariadení. Používa sa v širokej škále výpočtových zariadení, od vstavaných systémov s nízkym výkonom až po vysokovýkonné počítače.

Jednou z kľúčových vlastností architektúry ARM je modularita, ktorá umožňuje flexibilitu pri navrhovaní a optimalizácii procesorov pre konkrétne aplikácie. Moduly, či celé ARM procesory môžu byť licencované iným spoločnostiam, čo vedie k rozsiahlemu prijatiu a vytvoreniu veľkého ekosystému softvérových a hardvérových vývojových nástrojov.

Procesory architektúry ARM sú navrhnuté tak, aby boli energeticky úsporné a vysoko efektívne, čo ich robí ideálnymi pre mobilné a prenosné zariadenia. Môžu zároveň ponúkať vysoký výkon a sú často používané v serveroch a superpočítačoch.

Porovnanie architektúr RISC-V a ARM

Architektúra ARM je dlhodobo populárna a hojne používaná v mikrokontroléroch a embedded¹¹ zariadeniach. Postupom času sa však dostáva do popredia alternatíva v podobe RISC-V.

Jedným z hlavných rozdielov medzi ARM a RISC-V je ich licenčný model. ARM procesory sú licencované spoločnosťou ARM Holdings a ich návrh a implementácia sú chránené. Naopak, RISC-V je open-source architektúra, čo znamená, že ktokoľvek môže získať prístup k jej špecifikáciám, modifikovať ich a použiť ich na vytvorenie vlastných procesorov. Toto ekonomické hľadisko je hlavným prispievateľom k zvyšujúcej sa popularite architektúry RISC-V.

Ďalším rozdielom je ekosystém, ktorý obklopuje obe architektúry. ARM procesory sú široko používané už mnoho rokov a majú veľkú komunitu vývojárov, softvérových a hardvérových dodávateľov a nástrojov. RISC-V je stále relatívne novou architektúrou a jeho ekosystém nie je taký zrelý, aj keď rýchlo rastie.

Obe architektúry, ARM a RISC-V, ponúkajú v kontexte embedded mikrokontrolérov porovnateľné riešenia, z hľadiska výkonu i energetickej efektivity.

MEMS

MEMS technológia je široko aplikovaná pri vývoji rôznych polovodičových zariadení, nevynímajúc akcelerometre a teplomery či vlhkomery. Tieto senzory sú navrhnuté na meranie rôznych veličín ako zrýchlenie či teplotné zmeny v širokom spektre aplikácií, od automobilov a leteckých aplikácií až po spotrebiteľskú elektroniku.

MEMS akcelerometre sa bežne používajú v mobilných zariadeniach, ako sú smartfóny, na detekciu pohybu a orientácie. Pracujú pomocou miniatúrneho pohyblivého telesa, ktoré je zavesené na mikroskopických pružinách. Keď je zariadenie pohybované (vystavené akcelerácii), hmota sa pohybuje, čo spôsobuje zmenu kapacity, ktorá sa dá merať a použiť na určenie intenzity pohybu (zrýchlenia) zariadenia.

MEMS teplomery používajú materiály citlivé na teplotu, ktoré menia svoj odpor v reakcii na zmenu teploty. Sú vysoko presné a používajú sa v rôznych aplikáciách, od domácich spotrebičov po priemyselné a medicínske zariadenia na meranie a monitorovanie teplotných zmien.

¹¹Embedded zariadenia majú celú ovládaciu logiku vstavanú do tela samotného zariadenia

MEMS senzory vlhkosti sú založené na kapacitnom princípe, kde vlhkosť spôsobuje zmenu kapacity senzorového prvku vplyvom na dielektrikum citlivé na zmeny vlhkosti.

Tieto dva typy senzorov sú často kombinované do jedného (polovodičového) zariadenia.

ADC

ADC (Analog-to-Digital Converter) technológie a techniky sú široko používané v mikrokontroléroch na prevod analógových signálov na digitálne signály, ktoré môžu byť spracované digitálnym mikrokontrolérom. Existuje niekoľko rôznych ADC technológií používaných v týchto zariadeniach, každá s výhodami a nevýhodami.

Jednou z najbežnejších ADC technológií používaných v mikrokontroléroch je Successive Approximation Register (SAR) ADC. Táto technológia je známa nízkymi výrobnými nákladmi a predstavuje vyvážený pomer nákladov na výrobu a všeobecného "výkonu". Takmer všetky mikrokontroléry na trhu obsahujúce ADC implementujú túto technológiu.

Ďalšou populárnou ADC technológiou je Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$) ADC. Hlavnou prednosťou tejto technológie je vysoké rozlíšenie a nízky šum, čo ju robí vhodnou pre aplikácie, kde je potrebná vysoká presnosť, ako sú zvukové a meracie zariadenia. Hlavným záporom je ale v porovnaní so SAR nízka rýchlosť vzorkovania vstupu.

LDR

Na svetle závislé rezistory (LDR), známe aj ako fotorezistory, sú polovodičové elektronické komponenty bez PN prechodu, ktoré menia svoj odpor v reakcii na zmeny intenzity svetla. Používajú sa v širokej škále aplikácií, od jednoduchých svetelne detekčných obvodov po zložitejšie systémy, ako sú fotoaparáty a fotovoltaičné články.

Odpor fotorezistora klesá s narastajúcim množstvom svetla, ktoré na neho dopadá. Vplyvom dopadajúcich fotónov je k dispozícii viac elektrónov pre elektrický prúd, čo vedie k nižšiemu odporu.

Fotorezistory sú vyrobené z polovodičových materiálov, ako sú sulfid kadmia alebo selenid kadmia, ktoré sú citlivé na svetlo v oblasti viditeľného a infračerveného spektra elektromagnetického žiarenia. Sú k dispozícii v rôznych veľkostiach a tvaroch, a hodnoty ich odporu môžu byť rôzne, v závislosti na použítom materiáli a množstve svetla, ktorému sú vystavené.

Primárne lítiové články

Primárne lítiové batérie sa stávajú čoraz populárnejšou alternatívou k alkalickým batériám v rôznych aplikáciách. Tieto články používajú ako anódu metalické lítium a v závislosti od aplikovaných výrobných procesov a chémie môžu mať rôzne nominálne napätie. Primárne lítiové batérie ponúkajú niekoľko výhod, vrátane nižšej miery samo-vybíjania, vyššej hustoty energie a lepšieho výkonu pri nízkych teplotách.

Kombinácia týchto vlastností znamená, že môžu poskytnúť viac energie v menšom a ľahšom balení aj za nízkych prevádzkových teplôt, hlboko pod bodom mrazu. Sú teda ideálnymi pre prenosné zariadenia, ako sú fotoaparáty, GPS systémy a bezdrôtové senzory, kde sú rozmery a hmotnosť dôležité faktory.

Kapitola 5

Realizácia hardvéru

Ďalším krokom je realizácia hardvéru v podobe vytvorenia elektronickej schémy.

5.1 Elektronická schéma

S vybranými senzormi a riadiacim mikrokontrolérom môžeme pristúpiť k návrhu napájacej architektúry.

5.1.1 Napájacia architektúra

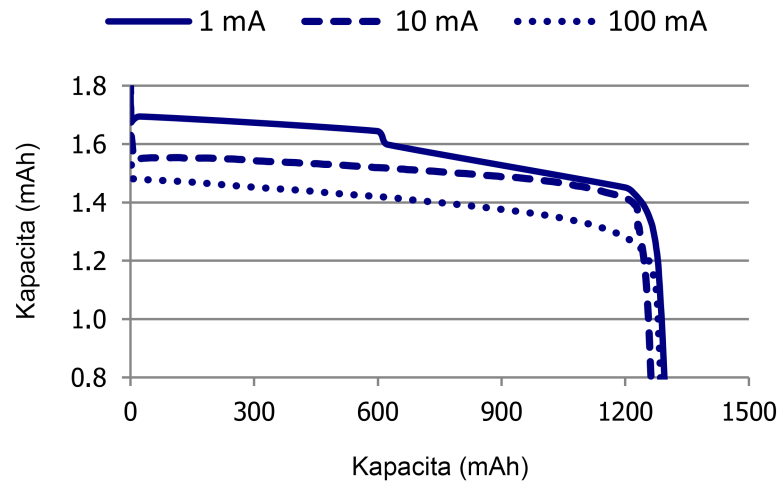
Z podstaty zariadenia vyplýva nutnosť napájania akumulátorom. Vzhľadom na uvažovanú dlhú výdrž na jeden akumulátor / set akumulátorov nemá zmysel uvažovať nad nabíjateľným akumulátorom a nabíjacím obvodom. Ideálnym riešením pre väčšinu spotrebiteľov sú batérie formátu AA, prípadne AAA. Nutnosť práce v hlbokých mrazoch vylučujú použitie bežných alkalických článkov, vhodnejším riešením sú primárne lítiové batérie chémie Li/FeS₂. Vzhľadom na nízke nominálne napätie článkov tohto formátu budeme potrebovať minimálne tri články v sérii. Vhodnejšou veľkosťou je rozmer AAA.

Výber vstupného regulátora závisí od spotreby celého zariadenia, napätí napájacích článkov a napájacieho napätia zariadenia, ktoré je 3V. Spotreba senzorov je voči riadiacemu mikrokontroléru zanedbateľná, teda smerodajná je tabuľka 5.1 z dokumentácie ESP32-c3 popisujúca spotrebu so zapnutým WiFi modемом[4].

Tabuľka 5.1: Spotreba so zapnutým RF (WiFi) modემom

Pracovný mód	Popis	Špičková spotreba (mA)	
Aktívny (RF)	TX	802.11b, 1 Mbps, @20,5 dBm	345
		802.11g, 54 Mbps, @18 dBm	285
		802.11n, HT20, MCS7, @17,5 dBm	280
		802.11n, HT40, MCS7, @17 dBm	280
	RX	802.11b/g/n, HT20	82
		802.11n, HT40	84

Ďalším dôležitým údajom je nominálne napätie primárnych lítiových článkov, dostupné z tabuľky z technickej dokumentácie[3] (obrázok 5.1).

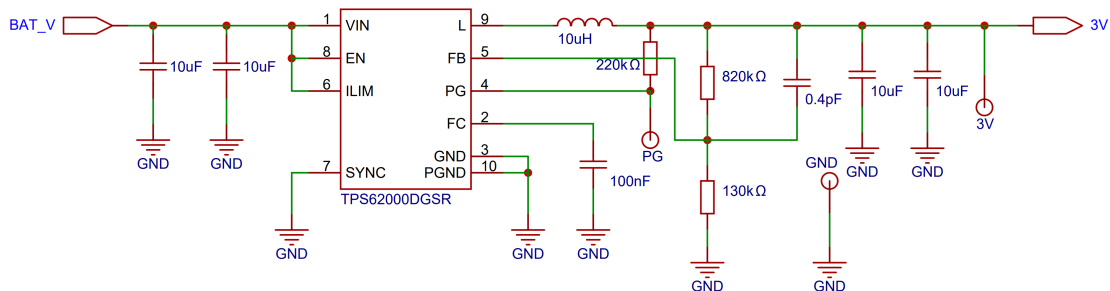


Obrázok 5.1: Graf kapacity a napätia primárnych lítiových AAA článkov

Ak chceme využiť maximum kapacity z článkov, musíme vybrať taký regulátor, ktorý vie so vstupným napätím 3,6V vytvoriť výstup 3V s trvalým prúdom približne 350mA. Potrebujeme tiež obvod s minimálnym kludovým prúdom a vysokou efektívnosťou, z dôvodu minimálnych rozmerov je tiež želané malé množstvo potrebných komponentov zaisťujúcich funkčnosť. Želaná je tiež vysoká pracovná frekvencia. Po zvážení všetkých kritérií sme vybrali DC-DC menič **TPS62000DGS** od výrobcu Texas Instruments. Podstatné technické parametre sú nasledujúce (kompletné dostupné v technickej dokumentácii[9]):

- **Vysoká efektívnosť 95%**
- 600mA konštantný prúdový výstup
- **50 μ A kludový prúd**

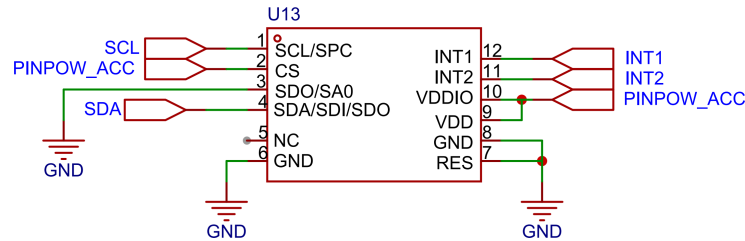
Výsledné zapojenie zaisťujúce napájanie zobrazuje obrázok 5.2.



Obrázok 5.2: Zapojenie zaisťujúce napájanie senzoru

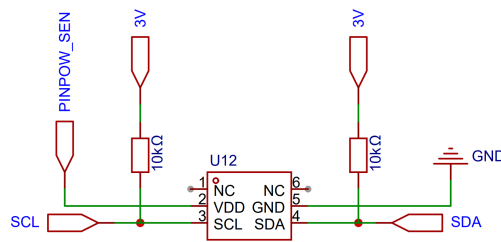
5.1.2 Zapojenie senzorov

Vybrané digitálne senzory potrebujú minimálne množstvo externých komponentov. Na zvýšenie efektivity napájania sú senzory napájané z výstupov mikrokontroléra, teda sa dajú vypnúť pomocou firmvéru. Zapojenie akcelerometra LIS2DW12 zobrazuje obrázok 5.3.



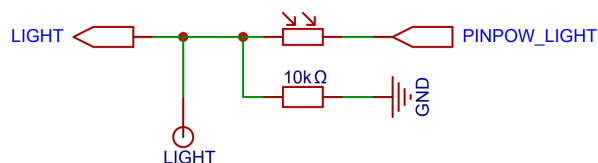
Obrázok 5.3: Zapojenie akcelerometra LIS2DW12

Výstupy INT1 a INT2 sú hardvérové výstupy umožňujúce zobudiť riadiaci mikrokontrolér po detekcii pohybu. Vstup SDO umožňuje zmenou úrovne napätia meniť I2C adresu. Zapojenie senzora teploty a vlhkosti zobrazuje obrázok 5.4.



Obrázok 5.4: Zapojenie senzora vlhkosti a teploty AHT21

Detekcia úrovne okolitého svetla je realizovaná pomocou obvodu s fotorezistorom (obrázok 5.5).



Obrázok 5.5: Zapojenie detekcie okolitého svetla fotorezistorom

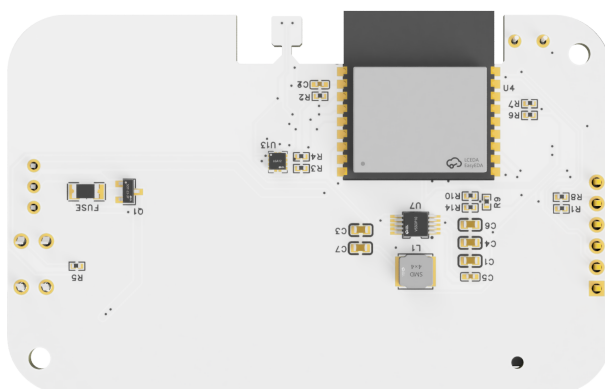
Fotorezistor a pomocný rezistor tvoria napäťový delič s výstupom pripojeným na riadiaci mikrokontrolér. Zmenou úrovne svetla dopadajúceho na fotorezistor sa mení výška napätia, ktoré riadiaci mikrokontrolér pomocou ADC číta ako digitálnu hodnotu.

5.2 Doska plošných spojov

Návrh DPS je prispôsobený požiadavke minimálnej veľkosti. Rozmery udáva hlavne komponent držiaci tri AAA batérie. Tiež je dôležitá tepelná izolácia senzora teploty a vlhkosti. Správnu izoláciu sa znižuje reakčný čas na zmeny teploty. Správne techniky tepelnej izolácie popisuje technická dokumentácia senzora AHT21[1].

Rovnako je dôležité správne umiestniť riadiaci mikrokontrolér, keďže obsahuje anténu na bezdrôtovú komunikáciu na frekvencii 2,4GHz. Musí byť umiestnený tak, aby "keepout zone" špecifikovaná dokumentáciou[4] ležala mimo DPS.

Súčiastky realizujúce napájanie musia byť umiestnené v tesnej blízkosti keďže obvod TPS62000DGS pracuje na vysokej frekvencii. Výsledná podoba osadenej dosky plošných spojov je na obrázkoch 5.8 a 5.9.



Obrázek 5.8: Osadená doska plošných spojov - pohľad zospodu



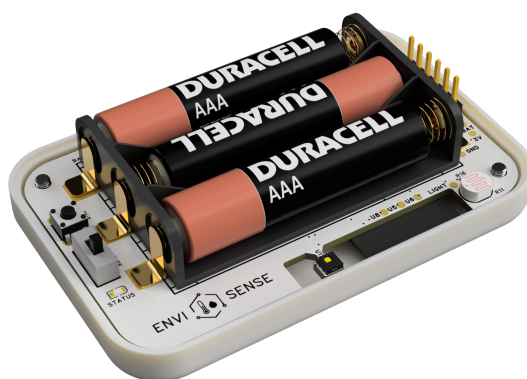
Obrázek 5.9: Osadená doska plošných spojov - pohľad zvrchu

Výsledné rozmery DPS sú **72,5mm** na dĺžku a **45,5mm** na šírku. Po osadení je maximálna hrúbka približne **17mm**.

5.3 CAD návrh krabičky

Dizajn krabičky je z veľkej časti subjektívny. Snažili sme sa vytvoriť jednoduchý dizajn minimálnych rozmerov vychádzajúci zo skúseností s CAD dizajnom a 3D tlačou. Výsledný tvar je tlačiteľný ako na FDM¹ tak aj DLP² tlačiarňach a skladá sa z dvoch polovic, ktoré spájajú skrutky o rozmeroch M2,5x10mm. V prípade tlače z termoplastu je vhodné vrchnú časť osadiť závitovými vložkami. Finálnu podobu dizajnu zobrazujú obrázky 5.10 a 5.11.

Jedným z technických aspektov dizajnu bolo zaistiť adekvátne prúdenie meraného vzduchu okolo senzora vlhkosti a teploty. Správne spôsoby popisuje technická dokumentácia[1].



Obrázek 5.10: Krabička - pohľad bez vrchu



Obrázek 5.11: Krabička - explodovaný pohľad

¹Fused Deposition Modeling - tlač z tlačových strún z termoplastu

²Direct Light Processing - tlač z UV živice

Kapitola 6

Architektúra obslužného firmvéru

Obslužný firmvér musí byť schopný:

- **Inicializovať zariadenie** - prebrať aktuálnu komunikáciu pomocou BLE¹ prípadne z pamäte, načítať aktuálny čas za pomoci WiFi a API² a inicializovať konfigurácie senzorov
- **Na základe prerušenia zbierať dáta** - po zobudení nastaveným časovačom či GPIO prerušením
- **Precízne uchovávať aktuálny čas** - pre presnosť zbieraných dát je nutné dodržiavať intervaly spánku čo možno najpresnejšie
- **Mať čo možno najnižšiu dobu behu** - beh kódu spotrebúva batériu a znižuje životnosť akumulátorov

Firmvér sa dá rozdeliť do dvoch logických celkov - **inicializácia** a **zber dát**. Po prvom zapnutí (pripojení napájania) prebehne konfigurácia zariadenia (Inicializácia SPIFFS³[8] súborového systému a knižnice Preferences[6]) a pripojených periférií (akcelerometer a senzor vlhkosti a teploty). Po inicializácii hardvéru zariadenie vyhľadáva okolité BLE zariadenia s cieľom identifikovať to, ktoré poskytuje konfiguráciu bezdrôtovej siete WiFi. Ak tento proces skončí neúspechom, zariadenie hľadá uloženie konfigurácie pomocou knižnice Preferences (teda zariadenie už bolo v minulosti nakonfigurované a prebehla napríklad výmena akumulátorov). Po získaní konfigurácie nutnej na pripojenie na bezdrôtový prístupový bod WiFi prebehne pokus o získanie aktuálneho času (UNIX časovej stopy). Po úspešnej konfigurácii prejde zariadenie do cyklu zberu dát, spánku a nahratia dát na API. Zariadenie sa budí periodicky zo spánku a zbiera dáta, pričom rovnako periodicky, podľa nastavení užívateľa, prebehne nahranie dát na API. Okrem periodického zberu dát prebieha aj sledovanie pohybu, ktoré rovnako inicializuje zber dát.

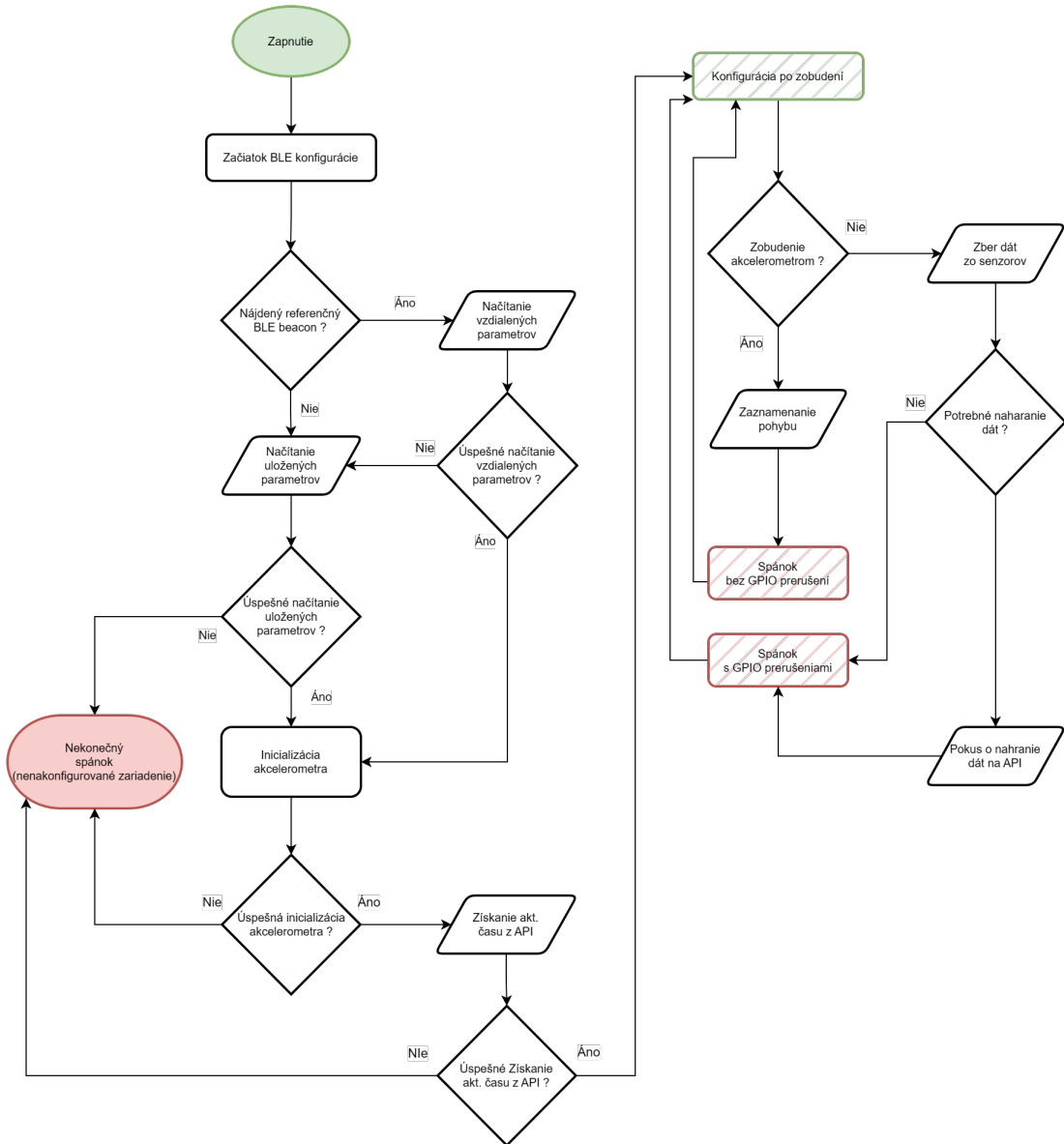
¹Bluetooth Low Energy - energeticky nenáročná implementácia bezdrôtovej lokálnej siete

²Application Programming Interface - vzdialené rozhranie, z ktorého získavame a odovzdávame dáta

³SPIFFS - SPI Flash File System - súborový systém určený pre NOR flash pamäte

6.1 Vývojový diagram architektúry firmvéru

Vo vizuálnej podobe prezentuje architektúru obslužného firmvéru obrázok 6.1.



Obrázek 6.1: Vývojový diagram architektúry

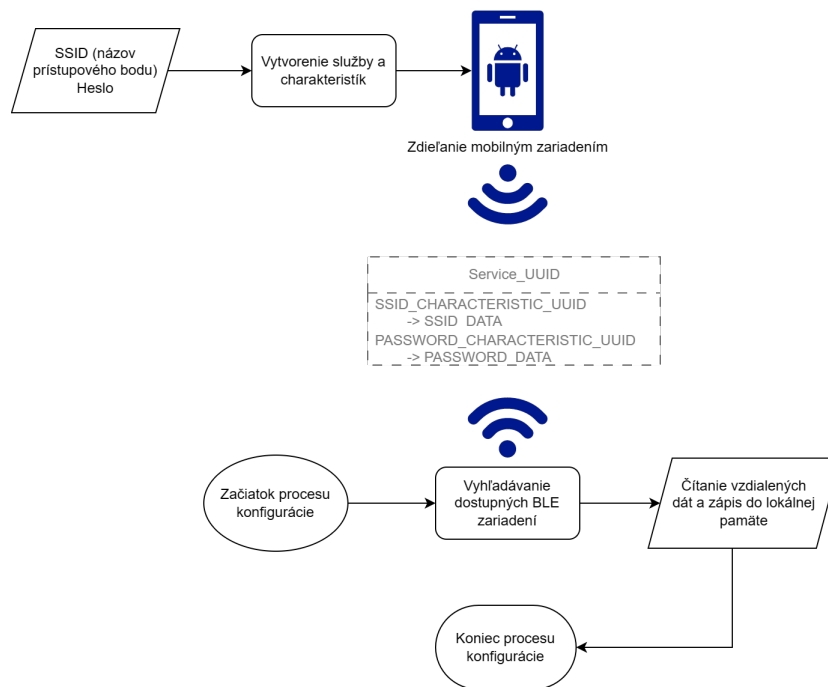
6.2 Detailný pohľad na komponenty firmvéru

6.2.1 Konfigurácia pomocou BLE

Zdieľanie konfiguračných parametrov siete WiFi pomocou emulácie BLE zariadenia mobilným telefónom rieši niekoľko problémov so zdieľaním konfigurácie. Zdieľanie konfigurácie pomocou WiFi (pred-konfigurovaného WiFi prístupového bodu) nieje pohodlné a je energeticky náročné. Vhodnejším technologickým riešením je zdieľanie pomocou technológie BLE. Toto riešenie môže byť implementované dvoma základnými spôsobmi:

- **Zápis dát mobilným telefónom do senzoru** - V tejto variante senzor vytvorí službu s "charakteristikami", atribútami služby, ktoré je možné čítať a je možné do nich zapisovať dáta. Tento koncept zdieľania dát popisuje protokol GATT⁴[2].
- **Čítanie dát senzorom z mobilného telefónu** - V tejto variante je spôsob prístupu k dátam zrkadlový - mobilný telefón zdieľa dáta dostupné pod službou a "charakteristikami".

Ako efektívnejšie riešenie bolo zvolené čítanie dát senzorom z mobilného telefónu. Graficky reprezentovaný proces prenosu dát zobrazuje obrázok 6.2.



Obrázok 6.2: Zdieľanie dát z mobilného telefónu

⁴GATT - Generic ATtribute Profile - Všeobecný profil atribútov

V kóde obslužného firmvéru je táto funkcionálna implementovaná pomocou knižnice NimBLE-Arduino[7]. Táto knižnica, dostupná v licencií Apache 2.0⁵ od autora Ryan Powell, je implementácia Apache NimBLE stack-u pre mikrokontroléry podporujúce Arduino-core, konkrétne vybrané modely rodiny ESP32 výrobcu Espressif a série nRF51, nRF52 výrobcu Nordic. Táto knižnica značne znižuje zaťaženie a zvyšuje výkon v porovnaní s bežne používanou knižnicou stavajúcej na na sade rozhraní bluetooth. Implementácia v praxi vyzerá nasledovne:

V hlavičkovom súbore *config.h* sa nachádzajú definície UUID, pod ktorými sa budú nachádzať potenciálne dáta konfigurácie prístupového bodu:

```
1 #define SSID_UUID          "868c"
2 #define PASS_UUID         "869c"
3 #define BLE_SCAN_PERIOD   2
```

Zariadenia s týmito vlastnosťami sú následne vyhľadávané nasledovným kódom v súbore *main.cpp*:

```
1 NimBLEDevice::init("");
2
3 NimBLEScan *pScan = NimBLEDevice::getScan();
4
5 // Start scanning for Bluetooth devices
6 pScan->setAdvertisedDeviceCallbacks(new MyAdvertisedDeviceCallbacks());
7 pScan->setActiveScan(false);
8 pScan->start(BLE_SCAN_PERIOD, false);
```

Príkaz *NimBLEDevice::init("")* pripraví NimBLE stack na prijímanie príkazov. Riadok *NimBLEScan *pScan = NimBLEDevice::getScan()* vytvorí inštanciu NimBLEScan. Riadky 5,6 a 7 následne prehľadávajú nájdené vytváraním inštancií triedy *MyAdvertisedDeviceCallbacks* ktorej definícia sa nachádza v súbore *config.h*.

Úspešne načítané parametre sú následne uložené pod kľúčmi "SSID" a "PASSWORD" do priestoru preferences a zároveň do premenných *ssid* a *password*, ktoré sa používajú pri inicializácii WiFi pripojenia počas behu programu.

⁵<https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>

6.2.2 Konfigurácia senzorov

Oba I2C senzory sú reprezentované inštanciami tried (pre senzor AHT21 je to trieda *AHT_Sensor_Class*, pre akcelerometer LIS2DW12 je to trieda *DFRobot_LIS2DW12_I2C*). Tieto inštancie sú vytvárané vždy pri zapnutí či zobudení zariadenia. Dáta z uvedených senzorov sú dostupné na ich I2C adresách, 0x38 pre AHT21 a 0x19 pre LIS2DW12. Akcelerometer navyše vyžaduje nastavenie konfiguračných registrov, ktoré nastavujú mód behu, nasledovne:

- ***setRange()*** - nastaví rozsah merania zrýchlenia akcelerometra, v našom prípade na $\pm 2g$
- ***setFilterPath()*** - zapne či vypne elektronickú hornú či dolnú priepusť, v našom prípade používame dolnú priepusť.
- ***setWakeUpDur()*** - nastaví dĺžku zobudenia po detekcii pohybu, v našom prípade 0.
- ***setWakeUpThreshold()*** - nastaví úroveň akcelerácie, ktorá zobudí zariadenie, v našom prípade 0.2g.
- ***setPowerMode()*** - nastaví rozlíšenie a presnosť merania akcelerometra, tiež spôsob merania (jednorázové či kontinuálne). My používame mód s nízkou spotrebou, kontinuálnym meraním a 12b rozlíšením.
- ***setActMode()*** - nastaví spôsob detekcie pohybu, či ho vypne. V našom prípade používame jednoduchú detekciu pohybu bez zmeny parametrov po zobudení.
- ***setInt1Event()* a *setInt2Event()*** - nastaví spôsob zmeny stavu výstupov Int1 a Int2 po zobudení. Pre nás je dôležitý výstup Int1, ktorý mení stav pri zobudení.
- ***setDataRate()*** - nastaví vzorkovaciu frekvenciu. Keďže je pre nás dôležitá detekcia pohybu nie presná hodnota zrýchlenia, používame nízku vzorkovaciu frekvenciu 12.5Hz.

Tieto nastavenia prepnú akcelerometer do režimu aktívneho spánku s nízkou spotrebou a kontinuálnym meraním, pričom po prekročení zrýchlenia 0.2g sa senzor zobudí a rovnako svojimi konfigurovateľnými výstupmi prebudí riadiaci mikrokontrolér. Senzor okolitého svetla nevyžaduje konfiguráciu, keďže sa jedná o fotorezistor a čítanie výstupnej hodnoty prebieha za pomoci napäťového deliča a analógovo-digitálneho prevodníka. Dáta senzoru okolitého svetla a vlhkosti sú po pripojení dostupné na jeho I2C adrese, nevyžaduje žiadnu dodatočnú konfiguráciu či kalibráciu. Senzor AHT21 a senzor okolitého svetla sú rovnako napájané z GPIO výstupov mikrokontroléra, je teda nutné myslieť na zapnutie napájania zmenou hodnoty priradeného výstupu na logickú 1 pred čítaním/zápisom dát.

Na obsluhu senzora teploty a vlhkosti AHT21 sme využili funkcionality poskytované knižnicou *AHT_Sensor*⁶ od autora Thinary, ktorá je dostupná pod licenciou LGPLv3⁷. Knižnica obsluhujúca akcelerometer je *DFRobot_LIS*⁸ od autora DFRobot, dostupná pod MIT⁹ licenciou.

⁶https://github.com/Thinary/AHT_Sensor

⁷<https://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.html>

⁸https://github.com/DFRobot/DFRobot_LIS

⁹<https://opensource.org/licenses/mit/>

6.2.3 Zber dát a ich perzistentné ukladanie

Zber dát zo senzorov prebieha dvoma spôsobmi:

- **Periodicky** - primárny spôsob zberu dát podľa užívateľom nastavenej periódy, vždy po prebudení zariadenia zo spánku sú žiadané veličiny prečítané z registrov senzorov (prípadne A/D prevodníka) a zaznamenané do perzistentnej flash pamäte.
- **Neperiodické** - Keďže je náš senzor vybavený aj akcelerometrom na detekciu pohybu (manipulácie), prebieha zber dát aj týmto spôsobom. Rovnako je senzor schopný detegovať prekročenie nastavených hraníc teploty a vlhkosti.

Rovnako ako zbierané dáta sú sledované aj rôzne chyby a štatistiky, ukladané do samostatného súboru.

Na perzistentný záznam dát nám poslúži v module riadiaceho mikrokontroléra integrovaná NOR Flash pamäť. Ukladanie dát v tejto pamäti je možné realizovať niekoľkými spôsobmi z pohľadu ich štruktúry, prístupu k nim a súborovému systému. V práci demonštrujeme dva spôsoby - pomocou knižnice Preferences ukladáme prevažne konfiguračné parametre v podobe párov kľúč - hodnota, na ukladanie väčšieho množstva dát zas používame súborový systém SPIFFS.

Preferences

Zápis do pamäte a čítanie z nej pomocou Preferences vyzerá teda nasledovne:

```
1 preferences.putString("SSID", value);
2 preferences.getString("KEY", "default_value");
```

Objekt preferences je inštancia triedy Preferences a reprezentuje alokované miesto vo Flash pamäti.

SPIFFS

Pri ukladaní väčšieho množstva dát je vhodné využiť možnosti súborového systému SPIFFS. Tento jednoduchý súborový systém, určený pre NOR pamäte do 128MB a mikrokontroléry s obmedzeným množstvom pamäte RAM je ideálny na ukladanie väčšieho množstva dát (na pomery jednočipových mikrokontrolérov). My používame tento súborový systém na ukladanie dvoch textových súborov reprezentujúcich dáta a štatistiky behu / chybové hlásenia. Inicializácia súborového systému prebieha zavolaním funkcie *begin()* objektu SPIFFS, pričom môžeme špecifikovať možnosť formátovania pamäte (vytvorenie nového, prázdneho súborového systému), ak pripojenie súborového systému nieje možné. Vytvorenie, vymazanie či zápis prebieha špecifikovaním cesty k súboru a korešpondujúcou operáciou. Operácie, na manipuláciu so súbormi aj emulovaná súborová štruktúra pripomínajú POSIX operácie.

```
1 File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
2 file.print(message);
```

```
3 file.close();
```

Po vytvorení objektu `file`, ktorý reprezentuje súbor nachádzajúci sa v pamäti, s ním môžeme manipulovať čítaním či zápisom. Dáta su uchovávané v textovom formáte, podobnom formátu CSV súborov.

6.2.4 Komunikácia s API a nahrávanie dát

Kľúčovým aspektom fungovania senzora je hneď po zbere dát ich nahrávanie na webovú API. Taktiež nesmieme zabudnúť na získavanie presného času či vzdialenú zmenu parametrov behu.

Pripojenie na prístupový bod

V prvom kroku je nutné pripojiť riadiaci mikrokontrolér na WiFi prístupový bod. Ovládanie modemu mikrokontroléra vykonáva kód v súboroch *Modem.cpp* a *Modem.h*. Pri nadväzovaní pripojenia je automaticky zvolený kanál a najbezpečnejšia možná metóda šifrovania podporovaná prístupovým bodom a riadiacim mikrokontrolérom. Nami vybraný mikrokontrolér podporuje štandard IEEE 802.11b/g/n na frekvencii 2.4GHz. Integrovaná knižnica *WiFiSTA*, dostupná v licencií GNU LGPL, rovnako zabezpečuje konfiguráciu IP adresy pomocou DHCP, nastavenie DNS serverov a pod.

Komunikácia s API

Po pripojení na prístupový bod a automatickej konfigurácii pomocou DHCP môžeme nadviazať spojenie so serverom API. Vytvoríme inštanciu triedy *UDHttp*, ktorá je definovaná v súbore *FileUpload.cpp*. Táto trieda vytvára zabezpečené spojenie so serverom, vytvára HTTP hlavičku, telo a odosiela dáta po častiach. Rovnako vie spracovávať prijatú odozvu.

Pri vytváraní zabezpečeného spojenia je dôležitá vstavaná knižnica *WiFiClientSecure*, dostupná v licencií GNU LGPL. Táto knižnica poskytuje implementáciu základného SSL klienta, resp. zabezpečenú komunikáciu pomocou sockets. Nadviazanie spojenia spočíva vo vytvorení inštancie SSL klienta, nastavení parametrov ako *timeout* a špecifikovanie SSL Root Certifikátu, ktorý má používať na overenie komunikácie. Server testovacej API používa služby certifikačnej autority Let's Encrypt, ktorej hierarchia koreňových certifikátov je zverejnená na ich webových stránkach¹⁰. V našom kóde používame self-signed¹¹ ISRG Root X1 certifikát vo formáte PEM¹² ktorého platnosť vyprší v Júni 2035. Dá sa predpokladať, že životnosť zariadenia nepresiahne platnosť použitého koreňového certifikátu. Rovnako je tento certifikát nutné aktualizovať pri zmene certifikačnej autority či API.

Nakonfigurovaný SSL klient môže vytvoriť spojenie s API, na URL adrese a porte definovanom v súbore *config.h*. Komunikácia prebieha cez transportný protokol TCP dotazovou metódou POST. Obslužný firmvér "zloží"hlavičku dotazu POST a jeho telo, zložené z dát dvoch súborov. Takto pripravené dáta sú následne delené na segmenty o veľkosti 500B a odosielané SSL tunelom. Deliť dáta je nutné z dôvodu veľkostných limitov TCP packetu.

¹⁰Certifikačná hierarchia Let's Encrypt

¹¹Podpísaný vydavateľom certifikátu, teda rovnaká entita cert. vydala aj podpísala

¹²Privacy-enhanced Electronic Mail, súborový formát pre ukladanie kryptografických certifikátov a kľúčov

Špecifikácia API rozhrania

Bod API, na ktorý nahrávame dáta, má nasledovné parametre:

- **URL** - v URL adrese sa musí nachádzať MAC adresa zariadenia na pozícii posledného podpriechinka napravo, ktorá slúži ako identifikátor:
https://example.api.org/api/record/[MAC_ADRESA]
- **Metóda** - POST
- **Telo dotazu** - musí obsahovať *dátový súbor* a *chybový súbor*, v tomto poradí.
 - **Dátový súbor** má nasledovné parametre:
 - * Svojou štruktúrou musí replikovať CSV súbor
 - * Musí obsahovať hlavičku popisujúcu uložené dáta
 - **Chybový súbor**
 - * Svojou štruktúrou musí replikovať CSV súbor
 - * Môže mať iba hlavičku popisujúcu uložené dáta (teda je prázdny)
- **Odpoveď** musí obsahovať nasledovné dáta:
 - HTTP stavový kód (200)
 - Aktuálny čas vo formáte UNIX timestamp (napr. 1660231246)
 - Nastavený interval zberu dát v sekundách
 - UNIX timestamp ďalšieho merania
 - Nastavený interval nahrávania dát v sekundách
 - **Nastavené limity teploty a vlhkosti:**
 - * meraná_hodnota:min/max

Telo a hlavička POST dotazu môže vyzeráť nasledovne:

```
1 POST [API_ENDPOINT] HTTP/1.1
2 Host: [API_URL]
3 Connection: keep-alive
4 Content-Length: [CONTENT_SIZE_IN_B]
5 Accept: application/json
6 Content-Type: multipart/form-data; boundary=----[BOUNDARY_STRING]
7 Accept-Encoding: identity
8 Accept-Language: en-GB,en-US;q=0.9,en;q=0.8,sk;q=0.7
9
10 -----[BOUNDARY_STRING]
11 Content-Disposition: form-data; name="file"; filename="[DATA_FILE_NAME]"
12 Content-Type: text/plain
13
14 [DATA_CONTENT]
15 -----[BOUNDARY_STRING]
16 Content-Disposition: form-data; name="errors"; filename="[ERROR_FILE_NAME]"
17 Content-Type: text/plain
18
19 [DATA_CONTENT]
20 -----[BOUNDARY_STRING]--
```

Odpoveď môže vyzeráť nasledovne:

```

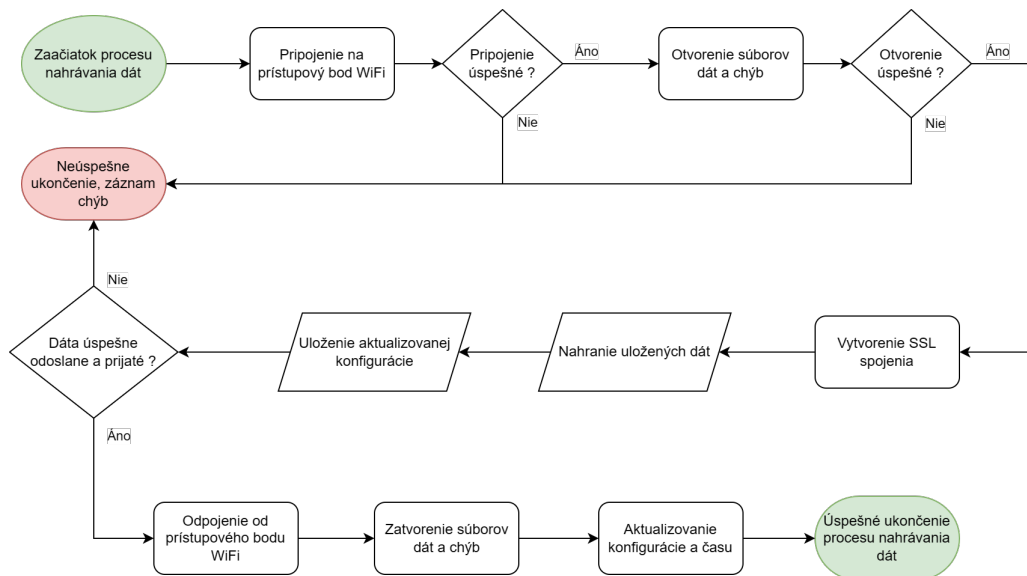
1 //definovane vsetky hranice
2 200;1660231245;3600;1660231800;28800;1660235400;temperature:12.34/34.56;humidity:23.45/45.67
3 //definovana len hranica teploty
4 200;1660231245;3600;1660231800;28800;1660235400;temperature:10/20
5 //ziadne definovane hranice
6 200;1660231245;3600;1660231800;28800;1660235400

```

Z odpovedí obslužný firmvér extrahuje konfiguráciu, aktuálny čas a nastavené hranice. Následne je na základe prijatých dát obnovená aktuálne používaná konfigurácia. Príklady skutočných dátových a chybových súborov a ich rozbor sú podrobnejšie spracované v kapitole Analýza výsledkov, prípadne sú uvedené v prílohách.

Grafická reprezentácia procesu nahrávania dát

Proces nahratia dát a aktualizovania konfigurácie môžeme graficky reprezentovať obrázkom 6.3.



Obrázek 6.3: Proces nahrávania dát

Bod API, z ktorého získavame aktuálny čas, má nasledovné parametre:

- **URL** - v URL adrese sa nenachádza špecifický identifikátor
- **Metóda** - GET
- **Odpoveď** - musí obsahovať aktuálny čas vo formáte UNIX timestamp

Proces získavania aktuálneho času z API slúži nielen ako alternatíva k NTP, zároveň umožňuje overiť stav API serverov pred uvedením senzora do chodu.

Telo a hlavička GET dotazu môže vyzeráť nasledovne:

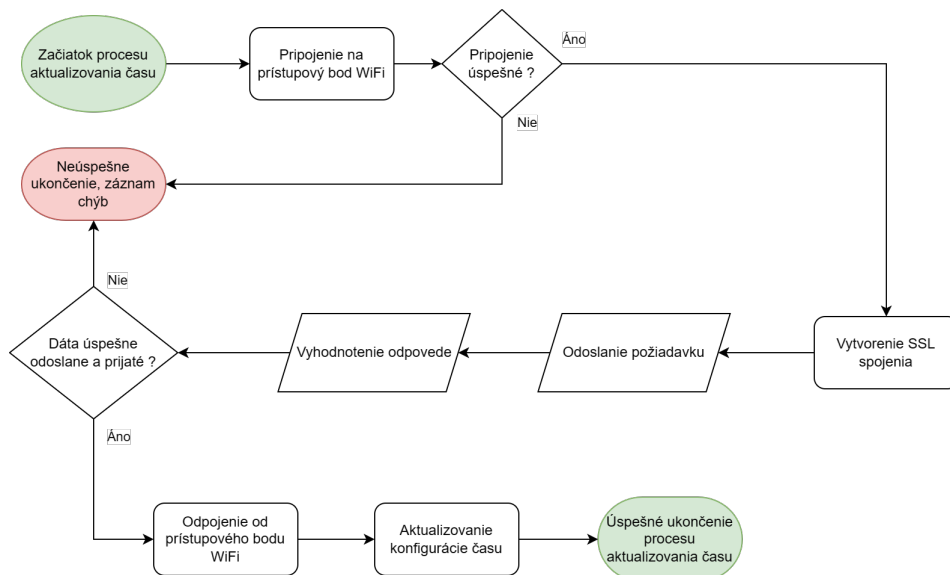
```
1 GET [API_ENDPOINT] HTTP/1.1
2 Host: [API_URL]
3 Connection: keep-alive
4 Accept: text/plain
5 }
```

Odpoveď môže vyzeráť nasledovne:

```
1 200 OK 1660231245
```

Grafická reprezentácia procesu nahratia dát

Proces je veľmi podobný odosielaniu dát a prezentuje ho obrázok 6.4.



Obrázek 6.4: Proces aktualizovania času

6.3 Použité technológie: softvér

I2C

I2C (Inter-Integrated Circuit) je populárny synchronný sériový komunikačný protokol používaný v embedded systémoch. I2C je dvoj-vodičové rozhranie, ktoré používa architektúru master-slave na prepojenie viacerých zariadení na jednej zbernici ako sú senzory, mikrokontroléry a iné periférie.

Protokol I2C pracuje na architektúre skladajúcej sa z dvoch vodičov: Serial Data Line (SDA) a Serial Clock Line (SCL). Signál SCL je použitý mastrom na generovanie hodinového signálu, ktorý synchronizuje prenos dát medzi zariadeniami, zatiaľ čo signál SDA sa používa na prenos a prijímanie dát.

Dôležitou vlastnosťou I2C je adresný systém umožňujúci pripojiť veľké množstvo zariadení na jednu zbernicu. Každé zariadenie má jedinečnú 7-bitovú alebo 10-bitovú adresu, ktorú používa master na inicializáciu komunikácie. Tá prebieha zaslaním adresy slave zariadenia, s ktorým chce master komunikovať, nasledovanú dátami alebo príkazom, ktorý sa má vykonať.

I2C podporuje rôzne rýchlosti prenosu dát, voliteľné v závislosti na požiadavkách systému, pohybujúce sa od 100 kbit/s až po 5 Mbit/s.

Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) je bezdrôtová technológia navrhnutá a propagovaná konzorciom Bluetooth SIG, ktorá sa stala populárnou v kontexte Internetu vecí (IoT) vďaka svojej nízkej spotrebe energie nízkym finančným či technologickým nákladom. BLE je navrhnutý pre krátkodobú komunikáciu a je ideálny pre zariadenia IoT, ktoré potrebujú prenášať malé množstvá dát, ako sú napríklad čítania senzorov.

BLE umožňuje zariadeniam komunikovať medzi sebou pomocou protokolu, ktorý minimalizuje spotrebu energie, čo je ideálne pre batériou napájané zariadenia, ktoré musia fungovať dlhý čas na jedno nabitie. BLE tiež podporuje bezpečnú komunikáciu pomocou šifrovania a autentifikácie, čo je dôležité pre ochranu prenášaných citlivých dát.

GATT

Generic Attribute Profile (GATT) je protokol používaný v Bluetooth Low Energy (BLE) komunikácii, ktorý definuje spôsob, akým sa údaje vymieňajú medzi zariadeniami. GATT definuje spôsob organizácie a odosielania údajov cez BLE pripojenie a umožňuje zariadeniam zdieľať informácie o poskytovaných službách, vlastnostiach a dátach.

V GATT sú údaje organizované do hierarchickej štruktúry, kde najvyššia úroveň je "Služba" a nižšie úrovne sú "Charakteristiky" a "Deskriptory". Služby predstavujú zoznam súvisiacich charakteristík, ktoré popisujú funkčnosť zariadenia, zatiaľ čo charakteristiky reprezentujú konkrétny údaj, ktorý môže byť čítaný alebo zapisovaný iným zariadením. Deskriptory poskytujú dodatočné informácie o charakteristike, ako je jeho názov alebo formát.

GATT sa používa v mnohých aplikáciách, vrátane nositeľných zariadení, rôznych senzorov inteligentných domácností a v zdravotníctve.

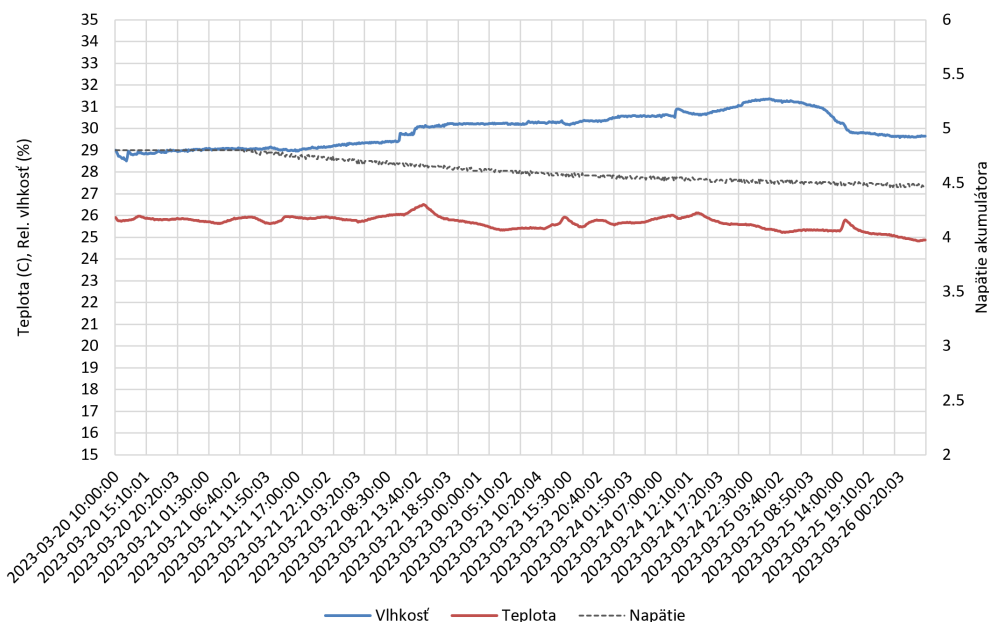
Kapitola 7

Analýza výsledkov

V tejto kapitole sa pozrieme na nazbierané dáta v rôznych prostrediach, spotrebu senzora a výdrž na jeden set akumulátorov. Rovnako preberieme aj možné spôsoby predĺženia životnosti akumulátorov. Rôzne umiestnenia, intervaly zberu dát neskúmajú len použitie na rôznych miestach ale aj vplyv periódy zberu a nahrávania dát na spotrebu energie akumulátora.

7.1 Umiestnenie č.1 - technická miestnosť

Toto umiestnenie reprezentuje monitorovanie technickej miestnosti. Perióda zberu dát je nastavená na 10 minút a nahrávanie dát prebiehalo každú hodinu. Z grafu napätia akumulátora (obrázok 7.1) je vidieť jeho postupné vybíjanie, ku ktorému prispieva najväčšou časťou príliš časté nahrávanie dát na webovú API. Rovnako sa dá pri monitorovaní väčšieho priestoru (miestnosť) považovať zber dát s periódou 10min ako príliš časté. Takto hustý zber dát nepridáva dátam vyššiu granularitu a znižuje výdrž akumulátorov. Graf (obrázok 7.1)



Obrázok 7.1: Umiestnenie č.1 - technická miestnosť

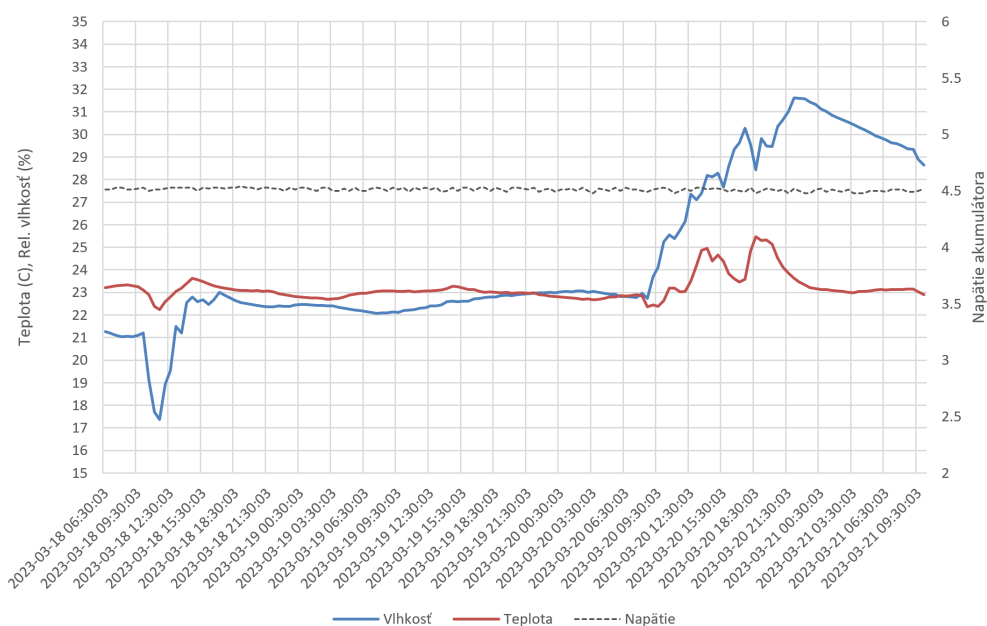
zachytáva obdobie 6 dní. V poobedných hodinách 22. marca prebiehala krátka inštalácia nového hardvéru, čo sa na grafe (obrázok 7.1) prejavilo skokovým zvýšením teploty a vlhkosti. Do technickej miestnosti bolo sporadicky vstupované nasledujúce tri dni, čo sa prejavilo skokovými zmenami teploty a vlhkosti. **Tento graf (obrázok 7.1) obsahuje 832 meraní.**

Poznatky získané z pozorovania

- Na monitorovanie miestností nie je vhodná krátka perióda zberu dát
- Časté nahrávanie dát na webovú API značne znižuje životnosť akumulátorov

7.2 Umiestnenie č.2 - kancelárske priestory

Senzor bol umiestnený v bežnom kancelárskom prostredí, po dobu štyroch dní. Zber dát prebiehal s periódou 30 minút, nahrávanie dát na webovú API prebiehalo dvakrát denne. Zber dát v intervale 30min až 1hod sa ukázal ako optimálny na monitorovanie väčších priestorov ako sú miestnosti. Na grafe (obrázok 7.2) sa prejavilo niekoľko externých faktorov. V dňoch 18. marca až 20. marca sa v monitorovanom priestore nenachádzali zamestnanci. Od skorých ranných hodín 20. marca do neskorých večerných sa v miestnosti pohybovala väčšia skupina zamestnancov, čo malo za následok postupné zvyšovanie teploty a vlhkosti. Dňa 20. marca, v čase medzi 15:30 a 18:30 môžeme vidieť zníženie teploty vplyvom vetrania priestoru. Napätie akumulátora sa drží na stabilnej úrovni, s veľmi slabou mierou poklesu. **Tento graf (obrázok 7.2) obsahuje 152 meraní.**



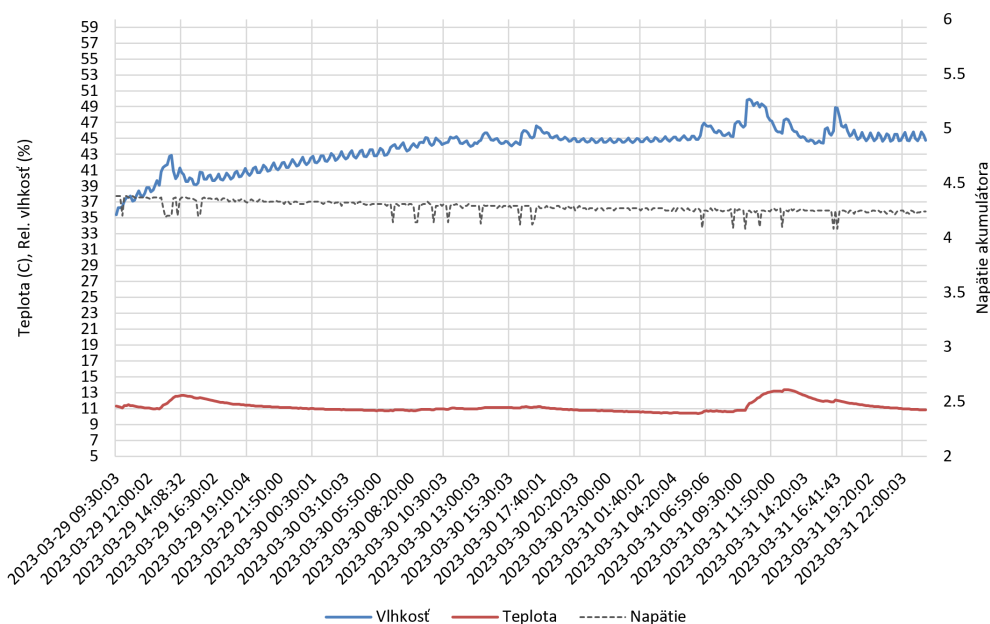
Obrázok 7.2: Umiestnenie č.2 - kancelárske priestory

Poznatky získané z pozorovania

- Na monitorovanie miestností je vhodný zber dát s periódou v rozmedzí 30min a 1hod
- Sporadické nahrávanie dát na webovú API značne znižuje spotrebu elektrickej energie

7.3 Umiestnenie č.3 - chladnička

Senzor sme umiestnili do priečinku vo dverách menšej chladničky. Senzor bol osadený bežnými, alkalickými batériami. Perióda zberu dát bola nastavená na 10 minút, nahrávanie dát prebiehalo každú hodinu. V grafe (obrázok 7.3) môžeme pozorovať niekoľko faktorov pôsobiacich na teplotu a vlhkosť okolitého prostredia. Na grafe (obrázok 7.3) môžeme vidieť cyklus zapínania a vypínania chladiaceho kompresora chladničky, ktorý sa prejavuje najmä na kolísajúcej vlhkosti. Ďalej môžeme pozorovať body v čase, v ktorých došlo k otvoreniu chladničky, konkrétne skoré poobedné hodiny 29. marca a 31. marca. Otvorenie chladničky má tiež za následok skokové zvýšenie vlhkosti vplyvom vstupu vlhkého vzduchu do vychladeného prostredia chladničky. Môžeme tiež pozorovať degradovaný výkon alkalických akumulátorov, hlavne v čase zvýšenej spotreby - počas nahrávania dát na webovú API. Vzniknutý pokles napätia a zvýšenú, skokovú spotrebu znásobuje tiež tlmený signál kovovými stenami chladničky.



Obrázok 7.3: Umiestnenie č.3 - chladnička

Poznatky získané z pozorovania

- Na monitorovanie chladiarenských zariadení sú vhodné krátke periódy zberu dát v jednotkách minút
- Je nutné predĺžiť periódu nahrávania dát na čo možno najdlhšiu

- V chladných prostrediach je vhodné zvážiť nasadenia primárnych lítiových akumulátorov

7.4 Optimalizácia periód zberu dát a nahrávania dát na webovú API

Pri nastavovaní funkčných periód je nutné zvážiť nasledujúce faktory:

- **Požadovaná glanularita dát** - vo veľa prípadoch nemá zvýšená glanularita zberu dát pozitívny vplyv na zachytávanie chybových stavov či nevhodného správania zamestnancov. Pri nastavovaní periódy zberu dát je vhodné nastaviť najdlhšiu možnú periódu zberu dát, ktorá bezpečne zachytí chybový stav.
- **Požadovaná dostupnosť dát** - pri nastavovaní periódy nahrávania dát je nutné postupovať veľmi opatrne. Komunikácia s webovým serverom prostredníctvom WiFi je vysoko energeticky náročná a znižuje životnosť senzora na sade akumulátorov. Tento vplyv na životnosť je znásobený nízkymi teplotami.
- **Účel zberu dát** - je dôležité presne poznať účel zberu dát. Na základe presne určeného účelu vieme efektívne *dynamicky* manipulovať s periódami zberu a nahrávania dát a maximalizovať výdrž na sadu akumulátorov. *Napríklad: Chceme primárne monitorovať manipuláciu zamestnancov s chladničkou, sekundárne jej správne fungovanie. V čase, keď s chladničkou manipulujú zamestnanci, nastavíme laxnejšie hranice monitorovaných veličín, a kratšiu periódu zberu dát. Mimo pracovných hodín zas môžeme nastaviť prísne hranice monitorovaných veličín a dlhšiu periódu zberu dát.*
- **Správna práca s dynamickými hranicami monitorovaných veličín** - správnym využitím tejto vlastnosti sa dá efektívnejšie monitorovať chybové stavy s nízkou spotrebou energie
- **Vhodná voľba akumulátorov** - kúpou kvalitnejších a drahších akumulátorov sa znižujú náklady na prevádzku menej častou údržbou

Faktorom so značným vplyvom na rýchlosť detekcie chybových stavov je tiež vhodné či nesprávne umiestnenie senzora.

7.5 Vplyv zvoleného hardvéru na praktické aspekty zberu dát

Zvolený hardvér, primárne hlavný mikrokontrolér, vplyva na zbieranie dát v praxi rôznymi spôsobmi.

7.5.1 Nepresnosť sledovania aktuálneho času

Nepresnosti vznikajú z dvoch dôvodov - nepresnosti interného oscilátora a vplyv doby behu programu. Tieto vplyvy sa počas behu, spánku a opakovaného prebúdzania a behu firmvéru sčítavajú a vzniká odchýlka času mikrokontroléru a skutočného času. Z tohto dôvodu je nutné nahrávanie dát na webovú API minimálne v mesačných intervaloch. Týmto spôsobom sa dá do veľkej miery zabrániť strate dát kvôli poškodeniu senzora.

7.5.2 Nepresnosti vstavaného analógovo-digitálneho prevodníka

Mikrokontroléry spoločnosti Espressif sú známe nepresnými analógovo-digitálnymi prevodníkmi. Tento fakt má za následok nízku mieru presnosti čítania napätia akumulátorov. Z tohto dôvodu je napätie akumulátora vhodné len ako približná indikácia stavu a využiteľné primárne na určenie vhodného času na výmenu.

7.6 Analýza spotreby energie

Približný výpočet spotreby energie nám pomôže odhadnúť očakávanú výdrž na jednu sadu akumulátorov. Budeme uvažovať dva scenáre:

- **Vysoká granularita dát a časté nahrávanie** - zbierať dáta budeme každých desať minút a nahrávať na webovú API štyrikrát denne. Okrem periodického čítania meraných veličín budeme počítať s 5% meraní navyše vzniknutými detekciou pohybu. Rovnako budeme uvažovať 6 po sebe idúcich prekročení nastavených medzí meraných veličín a teda dve neperiodické nahrania na webovú API navyše.
- **Nízka granularita dát a menej časté nahrávanie** - zbierať dáta budeme každých tridsať minút a nahrávať na webovú API dvakrát denne. Okrem periodického čítania meraných veličín budeme počítať s 1% meraní navyše vzniknutými detekciou pohybu. Rovnako budeme uvažovať 3 po sebe idúce prekročenia nastavených medzí meraných veličín a teda jedno neperiodické nahranie na webovú API navyše.

Konštantná spotreba senzoru počas spánku je približne $56\mu\text{A}$. Čítanie dát zo senzorov a zápis do pamäte trvá približne 0.2s počas ktorých je mikrokontrolér v režime Modem-sleep¹ so spotrebou približne 28mA . Nahrávanie dát na webovú API trvá približne 3s pričom 1s je v režime Modem-sleep so spotrebou približne 28mA a dve sekundy so zapnutým modemom, komunikujúcim s prístupovým bodom so spotrebou približne 240mA .

V prvom skúmanom prípade prebehne 151 meraní s celkovým časom 30s. Ďalej prebehne šesť nahraní dát v celkovom čase 6s v režime Modem-sleep a 12s v režime zapnutého modemu. Zvyšný čas je senzor v režime spánku. Celková spotreba senzoru počas jedného priemerného dňa je približne **2.431mAh**.

V druhom skúmanom prípade prebehne 49 meraní s celkovým časom 9.7s. Ďalej prebehnú tri nahrania dát v celkovom čase 3s v režime Modem-sleep a 6s v režime zapnutého modemu. Zvyšný čas je senzor v režime spánku. Celková spotreba senzoru počas jedného priemerného dňa je približne **1.841mAh**.

Pri výpočtoch výdrže sme vychádzali z údajov dostupných v dokumentácii AAA článkov Energizer L92 a uvažovali približnú kapacitu jedného článku 1200mAh . Pri sériovom zapojení troch článkov sú výsledné hodnoty výdrže nasledovné:

- **Vysoká granularita dát a časté nahrávanie** - približne 1480 dní (4 roky a 15 dní)
- **Nízka granularita dát a menej časté nahrávanie** - približne 1955 dní (5 rokov, 4 mesiace a 6 dní)

Tieto teoretické hodnoty sú v skutočnosti vplyvom rôznych negatívnych externalít značne nižšie, stále však môžeme počítať výdrž senzorov v desiatkach mesiacov. Po detailnejšom rozbere sme zistili, že primárny vplyv na výdrž na jednej sade akumulátorov má spotreba

¹Režim s vypnutým bezdrôtovým modemom

senzora počas spánku, ktorá predstavuje asi 1.34mAh za jeden priemerný deň, v závislosti na nastavenej perióde zberu dát a nahrávania dát na webovú API. Rovnako nezanedbateľná je aj spotreba počas nahrávania dát, ktorá predstavovala približne 0.8534mAh za priemerný deň v prvom príklade a 0.42164mAh v príklade druhom. Zvýšenie frekvencie nahrávania malo za následok nárast priemernej dennej spotreby takmer o 30%.

Užívateľské rozhranie a webová API

Na zber dát, spravovanie senzorov a export výsledkov sme využili informačný systém ponúkaný zamestnávateľom riešiteľa práce. Ukážky užívateľského rozhrania tohto systému sme umiestnili do príloh.

Kapitola 8

Závěr

Ciele práce sa podarilo naplniť návrhom a realizáciou IoT senzora na zisteniach z prieskumu o aktuálne používaných zariadeniach v oblasti monitorovania potravinového reťazca a typických postupoch či chybách vyplývajúcich z praktickej realizácie zákonných požiadaviek. Navrhnutý senzor nielen plní legálne požiadavky kladené na zariadenia určené na monitorovanie rôznych druhov skladov potravín ale prináša aj pridanú hodnotu v súlade s praktickými požiadavkami skúmanej verejnej inštitúcie na Slovensku.

Výsledné zariadenie je fyzicky odolné, jednoduché na inštaláciu a obsluhu a zároveň značne flexibilné. Jeho nasadenie prináša benefity nielen pri monitorovaní skladov potravín ale aj bežných kancelárskych priestorov či technických miestností. Realizované zariadenie je použiteľné v praxi s nízkymi nákladmi na údržbu a skutočnou výdržou v desiatkach mesiacov v závislosti na konfigurácii.

Možné pokračovanie práce môže skúmať potenciálne benefity výmeny alkalických či primárnych lítiových článkov za nabíjateľné či prídanie funkcionality v podobe rôznych atmosférických senzorov a alternatívnych spôsobov komunikácie v IoT sieťach. Zvýšenie výdrže na jeden set akumulátorov by tiež mohlo byť možné využitím prechodu na energeticky efektívnejšiu radu mikroprocesorov, napríklad od výrobcu NordicSemi, prípadne utilizovať ULP koprocesor. Rovnako je možné vyvinúť webový informačný systém prezentujúci získané dáta či navrhnúť mobilnú aplikáciu, ktorá by uľahčila prvé spustenie a uvedenie do chodu.

Literatura

- [1] *AHT21 dokumentácia*. Dostupné z: <http://www.aosong.com/userfiles/files/media/Data%20Sheet%20AHT21.pdf>.
- [2] *Dokumentácia protokolu GATT*. Dostupné z: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=555004.
- [3] *Energizer L92 dokumentácia*. Dostupné z: <https://data.energizer.com/pdfs/l92.pdf>.
- [4] *ESP32-C3-WROOM-02 dokumentácia*. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-wroom-02_datasheet_en.pdf.
- [5] *LIS2DW12 dokumentácia*. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis2dw12.html>.
- [6] *Preferences SPI dokumentácia*. Dostupné z: <https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/preferences.html>.
- [7] *Repozitár knižnice NimBLE-Arduino*. Dostupné z: <https://github.com/h2zero/NimBLE-Arduino>.
- [8] *SPIFFS (SPI Flash File System) repozitár*. Dostupné z: <https://github.com/pellepl/spiffs>.
- [9] *TPS62000 dokumentácia*. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62000.pdf>.
- [10] *Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky č. 533/2007 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na zariadenia spoločného stravovania*. Dostupné z: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2007/533/>.
- [11] *Výnos Ministerstva pôdohospodárstva a zdravotníctva SR č. 28167/2007-OL*. Dostupné z: https://www.svps.sk/dokumenty/legislativa/28167_2007.pdf.
- [12] *Zákon č. 157/2018 Z. z. o metrológii*. Dostupné z: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2018/157/>.
- [13] *Štátna veterinárna a potravinová správa Slovenskej republiky - Potravinový kódex*. Dostupné z: https://www.svps.sk/legislativa/legislativa_kodex.asp.

Příloha A

Zoznam súčiastok

Nasledujúca tabuľka A.1 obsahuje zoznam súčiastok (mimo samotného plošného spoja) nutných na osadenie jedného kusu navrhnutého zariadenia. Približné náklady na jedno zariadenie pri objednávke súčiastok na 100 kusov v Apríli 2023 boli vo výške približne 250Kč.

Počet	Zariadenie (súčiastka)	Ploška	Rozmery
4	CL10A106MP8NNNC	C1,C3,C4,C7	C0603
2	0402B104K160NT	C2,C5	C0402
1	0603CG0R4C500NT	C6	C0603
1	MF-NSMF050-2	F1	F1206
1	2.54-1x6P	H1	-
1	CSME0418D-100M-LRH	L1	L4.0-W4.0
1	XL-1608UBC-04	LED2	LED0603
1	HSS3404A	Q1	SOT-23-3
2	RC-02W101JT	R1,R8	R0402
6	FRC0402J103 TS	R2,R3,R4,R5,R6,R16	R0402
1	RC-02W1652FT	R7	R0402
1	RC-02K2203FT	R9	R0402
1	RC0402JR-07130KL	R10	R0402
1	GL5516	R11	RES-TH_L5.1-W4.3
1	AC0402FR-07820KL	R14	R0402
1	TSC016A03526A	SW1	KEY-TH_4P-L4.5-W4.5
7	Testovacia ploška	U2,U5,U6,U8,U9,U10,U20	-
1	SS-12D01-G4	U3	SW-TH_DEALON_SS-12D01-GX
1	ESP32-C3-WROOM-02-N4	U4	-
1	TPS62000DGSR	U7	VSSOP-10
1	AHT21	U12	SENSOR-SMD_L3.0-W3.0
1	LIS2DW12TR	U13	LGA-12
1	BH-AAA-B5AA005	U21	BAT-SMD_BH-AAA-B5AA005

Tabuľka A.1: Zoznam súčiastok

Příloha B

Obsah priloženého paměťového média

Priložené paměťové médium obsahuje nasledovné súbory a priečinky:

zdrojove_subory

Tento priečinok obsahuje zdrojové súbory firmvéru, knižnice potrebné na beh a konfiguráciu vývojového prostredia PlatformIO. Rovnako obsahuje generovanú dokumentáciu Doxygen.

Gerber_PCB_zariadenie.zip

Tento .zip súbor obsahuje Gerber schémy nutné na výrobu dosky plošných spojov.

schema_PCB.pdf

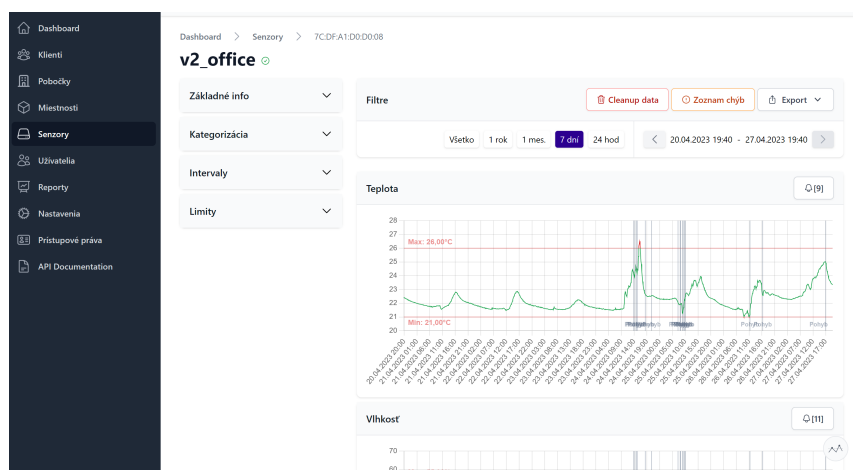
Tento .pdf súbor obsahuje elektrickú schému zariadenia.

text_prace.pdf

Tento .pdf súbor obsahuje najnovšiu verziu textu bakalárskej práce.

Příloha C

Použité webové uživatelské rozhraní



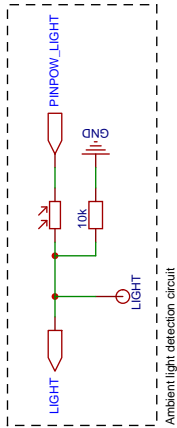
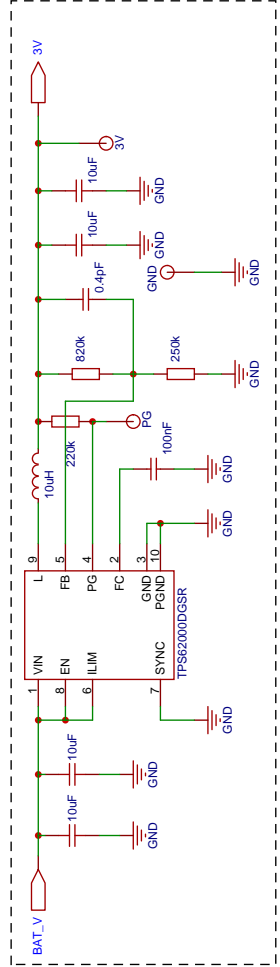
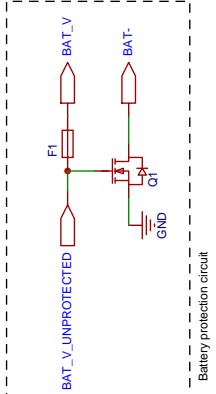
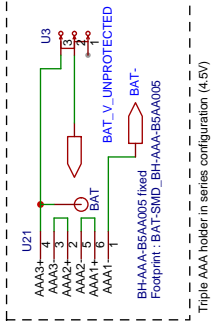
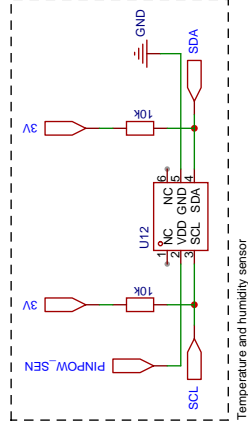
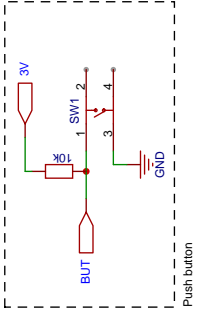
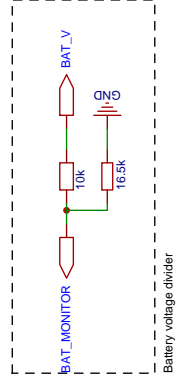
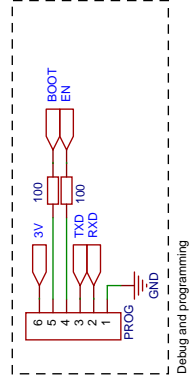
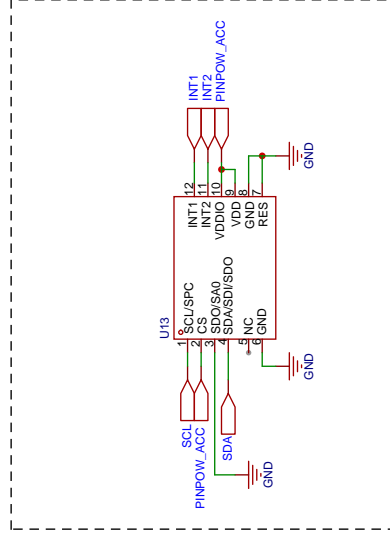
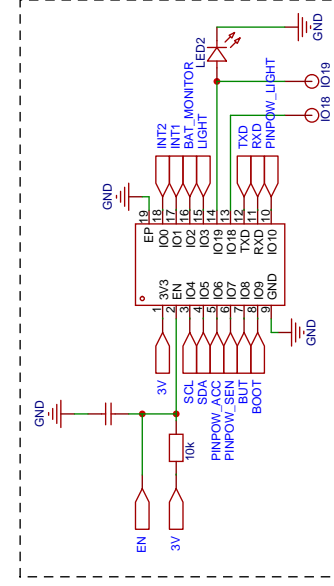
Obrázek C.1: Uživatelské rozhraní - ukážka 1



Obrázek C.2: Uživatelské rozhraní - ukážka 2

Příloha D

Elektrická schéma senzoru



Schematic	pcb_1	Update Date	2023-04-24
Page	P1	Create Date	2023-04-24
Drawn	Kovac	Part Number	
Reviewed	Kovac	VER	1
		SIZE	A3
		PAGE	1 OF 1

Environmental_sensor_thesis

