



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VÍCEÚČELOVÁ IOT JEDNOTKA PRO BEZDRÁTOVÉ MĚŘENÍ PROUDU VE VN SÍTÍCH.

MULTIPURPOSE IOT UNIT FOR WIRELESS CURRENT MEASUREMENT IN HV NETWORKS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Haluška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Rusz

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Daniel Haluška

ID: 220816

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Víceúčelová IoT jednotka pro bezdrátové měření proudu ve VN sítích.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V průběhu řešení diplomové práce se student seznámí s problematikou bezdrátového měření veličin ve VN sítích, metodami časové synchronizace, zprostředkováním naměřených dat pomocí univerzálních výstupů, optimalizací HW návrhu s důrazem na energetickou náročnost a umístění zařízení.

Cílem práce bude podrobný teoretický rozbor problematiky měření a bezdrátového přenosu dat s vybranou bezdrátovou technologií ve VN sítích a dále výběr komponent pro sestrojení prototypu IoT jednotky.

Výstupem diplomové práce bude kompletní HW a SW návrh jednotky, včetně návrhu napájecího zdroje s ohledem na energetickou náročnost sestrojeného zařízení. Na sestrojeném zařízení bude na závěr provedena sada měření, které ověří důležité parametry a funkcionality celého řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Martin Rusz

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je navrhnúť a implementovať systém pozostávajúci z lokálnej jednotky a snímačov, ktorý umožní bezdrôtové meranie prúdov v energetických vedeniach. Úvod práce sa zameriava na prieskum a podrobnú analýzu bezdrôtových technológií, ich vlastností, parametrov a možností použitia pre navrhovaný systém. Ďalej práca skúma možnosti časovej synchronizácie na dosiahnutie koordinácie snímania jednotlivých fáz vedenia. Výsledkom práce je vytvorený model zariadenia, jeho zapojenie softvérové riešenie a mechanická konštrukcia. Značná časť práce sa venuje programovému riešeniu systému a komunikácii založenej na komunikačnom protokole ESP-NOW.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Bezdrôtová sieť, Časová synchronizácia, ESP-32, ESP-NOW, Frekvenčné pásma, Internet vecí, Merací transformátor, SD karta

ABSTRACT

The aim of this thesis is to design and implement a system consisting of a local unit and sensors that enable wireless current measurement in power lines. The introduction focuses on the exploration and detailed analysis of wireless technologies, their properties, parameters, and application possibilities for the proposed system. Furthermore, the thesis examines time synchronization methods to achieve coordinated current measurement across different phases of the power lines. The result of the thesis is a developed device model, its circuit design, software solution, and mechanical construction. A significant part of the work is dedicated to the implementation of the system's software solution and communication based on the ESP-NOW protocol.

KEYWORDS

Current Transformer, ESP-32, ESP-NOW, Frequency Bands, Internet of Things, SD Card, Time Synchronization, Wireless Network

HALUŠKA, Daniel. *Lokální IoT jednotka pro bezdrátové měření proudu ve VN sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 83 s. Diplomová práce. Vedúci práce: Ing. Martin Ruzs,

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Daniel Haluška
VUT ID autora: 220816
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Lokální IoT jednotka pro bezdrátové měření proudu ve VN sítích

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Martinovi Ruzzovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť, vecné návrhy k práci a hlavne za čas, ktorý mi venoval, ďalej by som chcel poďakovať spoločnosti MEgA Měřící Energetické Aparáty, a.s. za poskytnutú pomoc a vybavenie pri meraní.

Obsah

Úvod	13
1 Teoretická časť práce	14
1.1 Bezdrôtové technológie	14
1.1.1 Rozdelenie bezdrôtových technológií	14
1.1.2 Bluetooth	16
1.1.3 Bluetooth Low Energy (BLE)	18
1.1.4 UWB	18
1.1.5 WiFi (IEEE 802.11)	19
1.1.6 ESP-NOW	20
1.2 Technológie IoT a LPWAN	22
1.2.1 SigFox	23
1.2.2 NB-IoT	24
1.3 Zhrnutie výberu bezdrôtových technológií	26
1.4 Časová synchronizácia	27
1.4.1 Precision Time Protocol (IEEE 1588)	28
1.5 Meranie veličín	31
1.5.1 Merací transformátor	31
1.5.2 Rogovského cievka	33
1.5.3 Zvolená metóda	34
2 Praktická časť práce	35
2.1 Hardware	35
2.1.1 Výber riadiaceho modulu MCU	35
2.1.2 Lokálne ukladanie dát	41
2.1.3 Zvolený merací transformátor	42
2.1.4 Napájanie	44
2.1.5 Návrh dosky plošných spojov	46
2.1.6 Mechanická konštrukcia krabičky	46
2.2 Komunikácia	47
2.2.1 Prepojenie senzorickej a lokálnej jednotky	48
2.2.2 Knižnica ESP-NOW	49
2.2.3 Úprava rámca	51
3 Firmware	52
3.1 Zabezpečenie časovej synchronizácie	52
3.2 Meranie hodnôt	53

3.2.1	ULP koprocessor	54
3.2.2	Forma dát odosielaná lokálnou jednotkou	56
3.3	Spracovanie dát lokálnou jednotkou	56
3.3.1	DAC prevodník vzorkov	57
3.3.2	Forma lokálne ukladaných dát	58
3.4	Konfigurácia zariadenia	59
3.5	Nahrávanie firmvéru	60
3.6	Serverová časť	60
3.6.1	Databáza	61
3.6.2	Užívateľské zobrazenie	62
3.6.3	Inštalácia na server	63
3.7	Overenie funkčnosti	64
3.7.1	Testovanie dosahu	65
3.7.2	Testovanie časovej synchronizácie	66
3.7.3	Testovanie merania a výstupu DAC	68
3.7.4	Testovanie spotreby senzorovej jednotky	71
	Záver	73
	Literatúra	74
	Zoznam symbolov a skratiek	78
	Zoznam príloh	79
	A Zostrojené testovacie prototypy	80
	B Model meracieho systému	81
	C Obsah elektronickej prílohy	83

Zoznam obrázkov

1.1	Klasifikácia bezdrôtových sietí [1].	15
1.2	Protokolová sada ESP-NOW [15].	21
1.3	Vizualizácia rámca ESP-NOW [17].	21
1.4	Prevádzkové režimy NB-IoT [12].	25
1.5	Porovnanie bezdrôtových technológií [8].	26
1.6	Systém IEEE 1588 (PTP) z pohľadu komponentov [18].	30
1.7	Postupnosť správ pri synchronizácii PTP.	31
1.8	Transformátor prúdu - typické zapojenie.	32
1.9	Rogovského cievka s integračným článkom.	33
2.1	Funkčné bloky ESP32 SoC [22].	36
2.2	Zvolený mikrokontroler ESP32-WROOM32 [22].	37
2.3	Schéma zapojenia modulu ESP32.	39
2.4	Schéma zapojenia prevodníku CP2102 (USB/UART).	40
2.5	Schéma zapojenia obvodu automatického programovania.	41
2.6	Zapojenie konektoru pre microSD kartu.	42
2.7	Prúdová sonda a jej špecifikácia [28].	43
2.8	Zapojenie obvodu pre úpravu signálu z meracieho transformátoru.	44
2.9	Zapojenie regulátora LDO.	45
2.10	Zapojenie obvodu správy batérie BMS.	45
2.11	Zapojenie DC/DC meniča.	45
2.12	Rozloženie vrchnej (TOP) a spodnej (BOTTOM) vrstvy DPS.	47
2.13	Osadený polšný spoj lokálnej jednotky (vľavo) a senzoru (vpravo).	48
2.14	Segmentácia dátovej časti rámca ESP-NOW.	51
3.1	Postupnosť správ časovej synchronizácie zariadení.	53
3.2	Výstupy meraných hodnôt lokálnej jednotky.	57
3.3	Fungovanie DAC výstupu.	58
3.4	Štruktúra typov záznamov ukladaných na SD kartu.	59
3.5	Vyhotovený prototyp zariadenia	60
3.6	Proces aktualizácie firmwéru.	61
3.7	Sekcia okamžitého merania zobrazovacieho panelu.	63
3.8	Sekcia min. a max. merania zobrazovacieho panelu.	63
3.9	Grafy meraných priebehov zobrazovacieho panelu.	64
3.10	Osciloskopický priebeh signálu.	64
3.11	Meranie závislosti stratených paketov na vzdialenosti.	65
3.12	Časová neistota zariadení v priebehu 4 hodín.	67
3.13	Časová neistota zariadení v priebehu 3 minút.	67
3.14	Meraný signál pri $I_p = 0,1$ A.	68

3.15	Meraný signál pri $I_p = 1$ A.	69
3.16	Meraný signál pri $I_p = 2$ A.	69
3.17	Graf merania chyby a linearity.	70
3.18	Generovaný priebeh DAC pri I_p 0,5 A.	71
3.19	Spotreba sensorovej jednotky pred optimalizáciou.	72
3.20	Spotreba sensorovej jednotky po optimalizácii.	72
A.1	Testovací prototyp sensorovej jednotky	80
A.2	Testovací prototyp lokálnej jednotky	80
B.1	Osadenie akumulátoru do zariadenia	81
B.2	Model sensorovej jednotky	82
B.3	Model lokálnej jednotky	82

Zoznam tabuliek

1.1	Vybrané ISM pásma používané v IoT	17
1.2	Porovnanie bezdrôtových technológií lokálnej komunikácie	27
2.1	Režimy spánku čipu ESP32ESP32-WROOM-32 [23]	37
3.1	Režimy referenčného napätia ADC prevodníku[17]	53
3.2	Strata paketov závislá na vzdialenosti jednotiek	66
3.3	Výsledky chyby meranej hodnoty zariadenia	70
3.4	Odber senzorovej jednotky	72

Zoznam výpisov

3.1	Časť kódu zabezpečujúca snímanie vzorkov.	55
3.2	Časť kódu zabezpečujúca načasovanie.	55
3.3	Časť programu slúžiaca na kalkuláciu efektívnej hodnotu prúdu. . . .	56

Úvod

V energetike, najmä v prenosovej sústave, je dôležité neustále sledovanie parametrov vedenia, pretože na vedení môžu nastať nepredvídané udalosti ako napríklad nadprúd, spojenie vedenia so zemou, skrat a podobne. Aby operátor mohol rýchlo reagovať na tieto udalosti, potrebuje merací systém, ktorý umožní indikáciu prípadnú lokalizáciu problému. Ďalším benefitom systému je poskytovanie priebežných informácií o odberoch na vedení. Potreba systému spĺňajúceho tieto požiadavky je hlavným námetom pre diplomovú prácu.

Cieľom práce je vytvoriť merací systém, ktorý bude zaznamenávať priebeh prúdov na každej fáze vedenia. Systém bude pozostávať z meracej a zbernej časti, realizovaných ako samostatné zariadenia bez vodičového prepojenia, čo predstavuje hlavnú inováciu proti už existujúcim riešeniam na trhu. Meracia časť, teda snímač, bude spracovávať striedavý signál na vstupe a odosielať jeho úrovně na ďalšie spracovanie do zbernej časti. Zberná časť, tvorená lokálnou jednotkou, bude prijímať vyhodnocovať a ukladať dáta zo snímačov. Ďalšou úlohou zbernej časti je udržiavanie časovej synchronizácie snímačov, vzorky signálu z každej fázy musia byť snímané presne v rovnakom okamihu. Ak by táto podmienka nebola splnená, merané dáta by boli znehodnotené a nebolo by možné určiť fázový posun. Úplná synchronizácia snímačov nie je technicky možná, preto sme si stanovili za cieľ neprekročiť maximálnu prípustnú odchýlku synchronizácie 100 μ s, čo zodpovedá odchýlke fázového posunu 2°. Pričom maximálna prípustná odchýlka fázového posunu v energetike podľa normy pre Českú republiku je 10°. Práca je rozdelená na teoretickú a praktickú časť.

Teoretická časť práce sa sústreďuje na analýzu komunikačných technológií používaných v sieťach IoT, ich kategorizáciu, vlastnosti, základné parametre a oblasti použitia. Poznatky získané v tejto kapitole sú následne využité pri výbere tej správnej technológie pre zariadenie. Súčasťou teoretickej časti je aj podkapitola zameraná na metódy synchronizácie, pričom naše skúmanie sa sústreďí hlavne na princípy synchronizácie pomocou spoločného dátového kanálu.

Praktická časť diplomovej práce sa zameriava na návrh a konštrukciu jednotiek meracieho systému. V tejto časti sa podrobne venujeme výberu konkrétnych komponentov, z ktorých sú zariadenia zostavené. Výber komponentov sme rozdelili na funkčné logické bloky, ktoré sme opísali a realizovali ich zapojenie. Hlavným blokom zariadenia je mikroprocesor, ku ktorému sú pripojené bloky na snímanie prúdu a ukladanie dát. Tieto bloky sme zapracovali na plošný spoj, pre ktorý sme následne vymysleli spôsob uchytenia. Nedelnou súčasťou praktickej časti je aj softvérové riešenie, ktoré zahŕňa prepojenie sensorovej a lokálnej jednotky, úpravu metódy synchronizácie v praxi a spracovanie meraných dát. Na záver praktickej časti práce riešime dosiahnuté merateľné výsledky zhotoveného modelu.

1 Teoretická časť práce

V teoretickej časti práce je dôkladne analyzovaná problematika a súbor technológií, ktoré riešia bezdrôtové meranie prúdu. Táto časť diplomovej práce obsahuje podrobné predstavenie teoretických základov riešenia problému komunikácie, ako aj metód merania a časovej synchronizácie jednotiek meracieho systému. Tieto základy sú kľúčové pre vývoj modelu systému. Princípy fungovania jednotlivých technológií a ich aplikácie v kontexte problému systému sú predstavené tak, aby čitateľ získal podrobné pochopenie danej problematiky. Taktiež sa venuje pozornosť výberu vhodných technologických nástrojov a postupov, ktoré sú následne aplikované v praktickej časti diplomovej práce.

1.1 Bezdrôtové technológie

Naše riešenie je unikátne hlavne v bezdrôtovom a jednoducho inštalovateľnom princípe spojenia meracieho systému. Všetky podobné riešenia problému merania v energetike využívajú priame vodičové spojenie medzi snímačmi, ktoré sa nachádzajú na vedení, a spravujúcou jednotkou. Nasledujúca kapitola podrobne popisuje teoretické východiská k bezdrôtovému spojeniu systému.

Bezdrôtové technológie sú komunikačné a prenosové technológie, ktoré umožňujú prenos dát medzi zariadeniami bez potreby ich fyzického prepojenia pomocou vodičov. Na prenos informácií využívajú elektromagnetické rádiové vlny, ktoré slúžia ako nosný signál. Informácie, ktoré majú byť prenášané, sú kódované ovplyvňovaním niektorého parametru nosného signálu, čo nazývame modulácia. Cieľom modulácie je vložiť informáciu do nosného signálu tak, aby mohla byť prenášaná prenosovým kanálom. Existuje mnoho rôznych bezdrôtových technológií, ktoré sa využívajú v rôznych kontextoch a na rôzne účely. Snažili sme sa s portfóliom predstaviť tie, ktoré sú vhodné na využitie v meracom systéme. Na konci kapitoly je predstavená zvolená technológia.

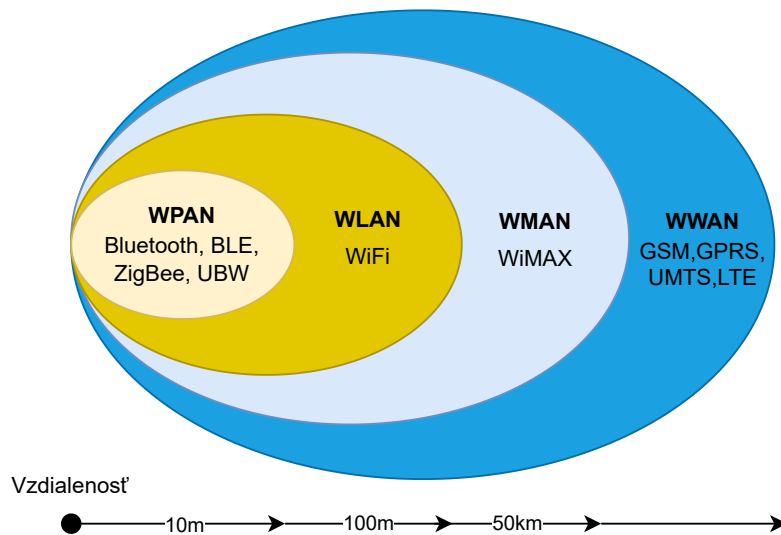
1.1.1 Rozdelenie bezdrôtových technológií

Existuje mnoho kritérií a faktorov, podľa ktorých môžeme kategorizovať bezdrôtové technológie. Jedným z najšpecifickejších kritérií je dosah siete. V diplomovej práci uvažujeme umiestnenie snímačov a lokálnej jednotky v dosahu max 50 m, preto sa komunikácia snímačov z lokálnou jednotkou sústreďuje v dosahu WLAN sietí. Na odosielanie meraných dát z lokálnej jednotky umiestnenej v teréne do zberného dátového úložiska plánujeme použiť komunikáciu s dosahom v jednotkách kilometrov.

Preto sa v teoretických východiskách venujeme aj komunikácii v dosahu WMAN sietí.

Delenie sietí podľa dosahu: (graficky znázornené na obrázku 1.1):

- WPAN (Wireless Personal Area Network) bezdrôtové personálne siete
- WLAN (Wireless Local Area Network) bezdrôtové lokálne siete
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) bezdrôtové veľkomestské siete
- WWAN (Wireless Wide Area Network) bezdrôtové rozľahlé siete



Obr. 1.1: Klasifikácia bezdrôtových sietí [1].

Ďalej môžeme toto rozdelenie špecifikovať do dvoch hlavných kategórií: siete malého dosahu a siete veľkého dosahu. Bezdrôtové siete malého dosahu obvykle poskytujú pokrytie len v obmedzenom rozsahu. Tento typ sietí zahŕňa miestne siete (WLAN), ktoré sa často používajú vo firmách, školských areáloch alebo domácnostiach, ako aj osobné siete (WPAN), ktoré umožňujú komunikáciu medzi dvoma zariadeniami na krátke vzdialenosti. Tieto siete zvyčajne operujú v bez-licenčnom frekvenčnom pásme vyhradenom na priemyselné, vedecké a medicínske účely ISM (Industrial, Scientific, and Medical), toto pásmo je podrobnejšie popísané v podkapitole 1.1.1. Na druhej strane, v sieťach veľkého dosahu je pripojenie zvyčajne realizované prostredníctvom licencovaných služieb. Príkladom takýchto sietí sú siete mobilných operátorov. Tieto siete môžu pokrývať rozsiahle oblasti až rozmermi celých miest (WMAN). Výhodou sietí veľkého dosahu je možnosť poskytnutia pripojenia na globálnej úrovni [1].

Bezlicenčné pásmo ISM

Rádiové spektrum je rozdelené do rôznych pásiem frekvencií, kde každé pásmo je používané na špecifické účely. ISM spektrum obsahuje rôzne časti rádio frekvenčného spektra, ktoré sú určené pre použitie v priemyselných aplikáciách, vedeckom výskume a medicínskych zariadeniach. Tieto frekvencie sú voľne dostupné a majú významné využitie pre bezdrôtové technológie a komunikáciu. Príkladom technológií a zariadení, ktoré využívajú ISM spektrum sú WiFi siete, Bluetooth, bezdrôtové senzory, RFID (Radio Frequency Identification) identifikátory a iné. Tieto pásma sú však pomerne úzke, často zarušené a bez akejkoľvek garancie prenosu [3].

Pásma ISM sú definované v rádiokomunikačnom poriadku ITU (Medzinárodná telekomunikačná únia), k tomuto nariadeniu sa však pridávajú miestne nariadenia a normy. V Českej republike sú bezlicenčné pásma spravované Českým telekomunikačným úradom (ČTU) všeobecným oprávnením č.VQ-R/10/06.2009-9 [4]. Prototyp meracieho systému využíva práve týchto pásiem na komunikáciu, z dôvodu jednoduchosti implementácie a vysokého množstva čipsetov podporujúcich jedno zo zmienovaných bezlicenčných pásiem.

Nasledujúca tabuľka obsahuje najpoužívanejšie frekvenčné pásma ISM aj s povoleným maximálnym vysielačím výkonom pre Českú republiku (Tab. 1.1). Vysielačiaci výkon je regulovaný v jednotkách efektívneho žiariaceho výkonu e.r.p alebo e.i.r.p. daného výpočtom 1.1. Jednotka e.i.r.p je vzťahovaná k vyžarovanému výkonu izotropickej (všesmerovej) antény. V tabuľke sa nachádzajú aj údaje o kanálovej rozteči udávajúcej vzdialenosť medzi strednými frekvenciami jednotlivých kanálov a kľúčovacím pomerom vyjadrujúcim pomer času vysielenia (obsadenia kanálu) a nečinnosti.

$$E.R.P - E.I.R.P = P_{\text{vysielača}} \cdot G_{\text{antény}} [W] \quad (1.1)$$

kde E.R.P je efektívny žiariaci výkon. $P_{\text{vysielača}}$ je výkon vysielača. $G_{\text{antény}}$ je zisk antény.

1.1.2 Bluetooth

Jednou z prvých možných bezdrôtových technológií umožňujúcich komunikáciu zariadení na krátku vzdialenosť, je technológia Bluetooth. Technológia Bluetooth Classic je definovaná medzinárodným štandardom IEEE 802.15.1 a spadá do kategórie sietí WPAN. Pracuje v rádiovýkvenčnom pásme ISM (od 2,402 GHz do 2,480 GHz) a ponúka optimálne vlastnosti z hľadiska robustnosti, spoľahlivosti a koexistencie s inými technológiami. Najnovšia verzia technológie Bluetooth umožňuje prenos dát rýchlosťou až 2 Mbit/s na vzdialenosť 200 m, pričom veľkosť prenášanej správy je

Tab. 1.1: Vybrané ISM pásma používané v IoT [4].

Ozn.	Frekvenčné pásmo [MHz]	Max. vyžiarený výkon [mW]	Kanálová rozteč	Kľúčovací pomer [%]
f	433,050–434,790	10 e.r.p	-	< 10
f1	433,050–434,790	1 e.r.p	-	< 100
f2	433,050–434,790	10 e.r.p	max 25kHz	< 10
g	863,000–870,000	25 e.r.p	-	< 0,1
g1	868,000–868,600	25 e.r.p	-	< 0,1
g2	868,700–869,200	25 e.r.p	-	< 0,1
g3	869,300–869,400	25 e.r.p	max 25kHz	< 100
g4	869,400–869,650	500 e.r.p	max 25kHz	< 10
h	2400–2483,5	25 e.i.r.p	< 10	< 100
i	5725–5875	25 e.i.r.p	< 10	< 100

255 bajtov. Na prenos dát využíva metódu FHSS (Frequency-hopping spread spectrum), ktorá počas jednej sekundy vykonáva 1600 skokov medzi 79 rôznymi kanálmi (nosnými frekvenciami) s odstupom 1 MHz. V prípade technológie Bluetooth Low Energy je množstvo kanálov obmedzené na 40 a odstup medzi nimi je 1 MHz. [5].

Topológia siete

Siete Bluetooth, označované ako piconet, využívajú model master/slave na pridelovanie časových úsekov, intervalov, kedy môžu zariadenia komunikovať. Master zohráva úlohu koordinátora v sieti a môže zasielať správy akémukoľvek priradenému zariadeniu slave, taktiež môže správy prijímať. Slave zariadenia môžu vysieľať a prijímať správy len od master zariadenia, s ktorým sú spárované, medzi sebou nemôžu komunikovať. V prípade že pikosieť tvorí jedno zariadenie master a jedno slave, označuje sa táto sieť ako Mono-Slave, čo predstavuje pripojenie typu Point-to-Point. Bluetooth podporuje aj režim Multi-Slave, v ktorom môže byť k jednému zariadeniu master pripojených až sedem zariadení slave, čo zodpovedá typu pripojenia Point-to-Multipoint. Bluetooth za cieľom zväčšiť sieť umožňuje vzájomné prepojenie pikosietí nazývané scatternet. Vzhľadom na to, že v každom piconete môže operovať iba jeden master, v režime scatternet môže byť niekoľko master zariadení. K prepojeniu jednotlivých pikosietí sa využívajú zariadenia typu „bridge node“, ktoré fungujú ako most medzi pikosieťami [6].

Interferencia

Najväčším problémom pri poskytovaní spoľahlivej bezdrôtovej dátovej komunikácie je rušenie. Na rozdiel od metalických alebo optických prenosov musia bezdrôtové technológie zdieľať rovnaké médium a v prípade technológií ako Bluetooth aj rovnaké frekvenčné pásmo ako WiFi. V dôsledku toho môže dochádzať k interferencii, čo môže viesť k poškodeniu alebo strate odosielanej informácie, ak sú v rovnakom čase odoslané viaceré rámce pomocou rôznych technológií.

Riešením tohto problému je implementácia techniky Adaptive Frequency Hopping (AFH) v technológii Bluetooth. Technika AFH prispôsobuje sekvenciu rozprestierania spektra FHSS. Kanály, ktoré sú rušené alebo zaneprázdnené, sú dynamicky monitorované a pri odosielaní paketov sa im systém vyhýba. Komponent Channel Classification vyhodnocuje jednotlivé kanály v závislosti na ich zaťažení. Príslušné informácie algoritmu AFH sú distribuované do všetkých uzlov prostredníctvom Link Managementu. Jednotlivé kanály sú selektívne redukované pomocou Hop Sequence Modification. Za opakované hodnotenie kvality kanálu je zodpovedný Channel Maintenance [6].

1.1.3 Bluetooth Low Energy (BLE)

Inováciou technológie Bluetooth prináša od verzie 4.0 rozšírenie Bluetooth Low Energy, ktoré je nekompatibilné s predošlými verziami Bluetooth Classic. Zameriava sa na nižšiu spotrebu ako klasická technológia Bluetooth pričom zachováva podobný rádiový dosah. Tak ako Bluetooth Classic využíva pásmo ISM 2,4 GHz, má však toto pásmo rozdelené na 40 kanálov s odstupom 2 MHz. Priradenie kanálov sa tiež líši. V pásme sú pridelené 3 kanály „Advertising Channels“, ktoré sa starajú o vyhľadávanie zariadení, pripojovanie a správy typu broadcast. Na týchto kanáloch sa nepripojené zariadenie hlási. BLE technológia podporuje topológiu Point-to-Multipoint, jedno zariadenie typu master a niekoľko zariadení slave. Pripojenie zariadenia do siete prebieha tak, že zariadenia master a slave si pomocou Advertising kanálov dohodnú parametre spojenia. Následne sa komunikácia presunie na zvyšných 37 kanálov nazývaných „Data Channels“. Tieto kanály slúžia na prenos dát, podobne ako pri klasickom Bluetooth je na prenos využívaná metóda FHSS [5, 7].

1.1.4 UWB

Ďalšou z menej známych technológií poskytujúcich prenos dát je technológia UWB (Ultra Wide Band). Táto technológia je založená na štandarde IEEE 802.15.3, ktorý je zaujímavý pre naše zariadenie predovšetkým preto, že umožňuje vysoko rýchlostnú komunikáciu na krátke vzdialenosti. UWB umožňuje prenos dát rýchlostou

od 110 Mbit/s do maximálne 1 Gbit/s, čo je pre našu aplikáciu nadmerné využitie pásma. Zaujímavosťou technológie je že môže slúžiť aj ako bezdrôtová náhrada káblov vysoko rýchlostnej sériovej zbernice ako je USB 2.0, FireWire (IEEE 1394). V USA sú pre technológiu UWB vyčlenené frekvenčné pásma od 3,1 GHz do 10,6 GHz. V Európe sú vyčlenené frekvencie rozdelené do dvoch častí: od 3,4 GHz do 4,8 GHz a od 6 GHz do 8,5 GHz [1].

UWB sa vyznačuje využívaním extrémne krátkych impulzov, pričom šírka pásma signálu presahuje 500 MHz. Pri prenosoch UWB sa informácia prenáša generovaním vysokofrekvenčnej energie v špecifických časových intervaloch a obsadením širokého pásma, čo umožňuje pulznú impulzovú, polohovú alebo časovú moduláciu (PWM, PPM, PCM). UWB impulzy môžu byť vysielané sporadicky s relatívne nízkymi frekvenciami impulzov, ale môžu sa vysielat len frekvenciami, ktoré nie sú vyššie ako prevrátená hodnota šírky pásma UWB impulzu [1, 13].

Ultra-Wideband (UWB) technológia navzdory dobrým prenosovým parametrom čelí niekoľkým problémom, z nich hlavnými sú interferencie s inými bezdrôtovými zariadeniami a menej robustné zabezpečenie. Má obmedzenú podporu od výrobcov čipsetov, čo vedie k vyšším nákladom a komplikáciám pri implementácii. UWB tiež trpí kratším dosahom a vyššou spotrebou energie a to pri vyšších rýchlostiach prenosu dát. Ďalším obmedzením je regulačné obmedzenie technológie v niektorých krajinách. Kvôli týmto problémom sa použitie technológie UWB pri vývoji systému nezvažuje.

1.1.5 WiFi (IEEE 802.11)

Jednou v dnešnej dobe najviac využívaných technológií na bezdrôtovú komunikáciu je WiFi. WiFi je technológia určená pre bezdrôtový prenos dát po lokálnej sieti WLAN a je kompatibilná so sadou protokolov Ethernet (IEEE 802.3). Táto technológia je popísaná rodinou noriem IEEE 802.11, pričom písmená na konci tejto normy označujú jej rôzne varianty. Pôvodným účelom sietí WiFi bolo sprístupniť internú lokálnu sieť bez nutnosti ťahania káblov, avšak dnes je nasadzovaná aj na externé spoje typu Point-to-Point [1].

Princíp fungovania

WiFi sieť je navrhnutá ako poloduplexná, čo znamená, že stanice pripojené do siete zdieľajú spoločný kanál (kolízne médium). Pre dosiahnutie úspešného prenosu je potrebné, aby v každom okamihu vysielala len jedna stanica, zatiaľ čo ostatné nasluchajú. Na zamedzenie kolízií využíva metódu CSMA (Carrier Sense Multiple Access), konkrétne variant CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), podobne ako Ethernet, ktorý používa variantu CSMA/CD (Carrier Sense

Multiple Access with Collision Detection). Hlavný rozdiel medzi týmito variantmi je v spôsobe detekcie kolízií. Metalický poloduplexný transceiver v Ethernet sieti môže priamo detegovať kolíziu na fyzickom médiu, zatiaľ čo rádiový vysielateľ túto možnosť nemá kvôli veľkému rozdielu medzi vysielaným a prijímaným výkonom. Riešením je použitie technológie potvrdzovania prijatia správ rámcami ACK. Pri chybe príjmu sú správy opakované priamo v rámci druhej vrstvy protokolu TCP/IP. Stanica v režime naslúchania sleduje prevádzku na kanáli a s vysielaním čaká na okamih, keď je prenosové médium voľné [14].

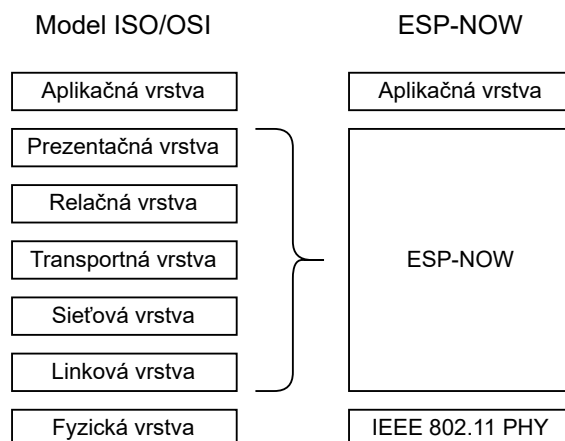
Okrem režimov ad-hoc a WDS (Wireless Distribution System), komunikácia prebieha medzi centrálnym nadradeným uzlom zvaným Access Point (AP) a podradenými uzlami staníc. Protokol v riadenom režime neumožňuje staniciam kontaktovať sa navzájom v rámci jedného rádiového kanálu a komunikovať medzi sebou samovoľne. Pripojenie prebieha tak, že stanice sa ku konkrétnemu AP najprv asociujú (väčšinou pomocou hesla), aby neskôr mohli v danej sieti komunikovať. Aby mohol byť AP viditeľný pre stanice vysielala periodicky na svojom kanáli krátke správy nazývané „beacon“. Tieto správy obsahujú hlavne informácie o názve SSID (Service Set Identifier) prístupového bodu a informácie o šifrovaní [14].

1.1.6 ESP-NOW

ESP-NOW je bezdrôtový komunikačný protokol typu peer-to-peer, vyvinutý spoločnosťou Espressif Systems pre nízkoenergetické a nízkonákladové zariadenia IoT. ESP-NOW kombinuje princípy technológií Bluetooth a WiFi. Je založený na norme IEEE 802.11 a využíva frekvenčné pásmo 2,4 GHz (ISM). Protokol ESP-NOW podporuje obojsmernú komunikáciu medzi viacerými vysielateľmi a prijímačmi (one-to-many, many-to-many) a umožňuje zasielanie unicastových aj broadcastových správ. Z hľadiska dosahu radíme protokol medzi WLAN siete [15].

Protokolová sada

Protokol ESP-NOW spája funkcie niekoľkých vrstiev ISO/OSI (Open System Interconnection) modelu do jednej vrstvy (Obr1.2). Fyzická vrstva protokolu je založená na pôvodnej norme IEEE 802.11 a na prevádzkovom režime Espressif Long-Range (LR). Jeho úlohou je zvýšenie citlivosti prijímača na úkor nižšej rýchlosti prenosu dát. Vďaka tomuto riešeniu môže signál prekonávať väčšie vzdialenosti v porovnaní s inými technológiami, ako je napríklad Bluetooth Low Energy (BLE), až približne 15-krát [16, 17].



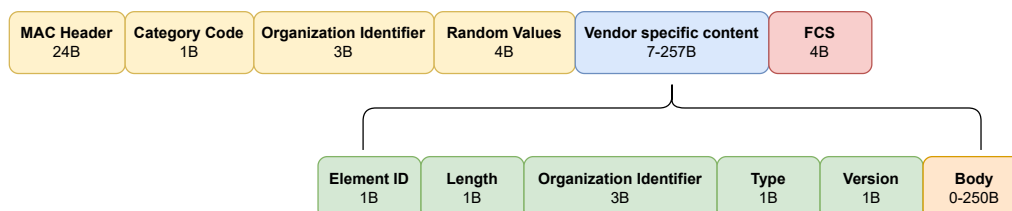
Obr. 1.2: Protokolová sada ESP-NOW [15].

Fyzická vrstva protokolu ESP-NOW využíva moduláciu Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), ktorá je použitá v pôvodnej verzii IEEE 802.11. Prenosová rýchlosť dosahuje 1 Mbit/s, avšak pri použití režimu Long-Range (LR) je rýchlosť obmedzená na 500 kbit/s. LR režim využíva vlastnú moduláciu a jeho použitie je možné len vtedy, ak je podporovaný všetkými zariadeniami v sieti [16].

Linková vrstva protokolu nevyžaduje vytvorenie spojenia medzi vysielateľom a prijímačom, spojenie funguje spôsobom ad-hoc peer-to-peer. V závislosti od použitia je potrebné párovanie na základe jedinečných MAC (Medium Access Control) adries. Kolízie na médiu sú riešené pomocou metódy CSMA/CA. Mechanizmus preposielania paketov je vo východnom nastavení prítomné, takže ak sa v krátkom čase po prenose neprijme potvrdzujúci signál ACK (Acknowledgement), vykoná sa niekoľko opakovaných prenosov [16].

Formát rámca

Aplikačné dáta prenášané protokolom ESP-NOW sú u odosielateľa zapúzdrené do krátkych akčných rámcov (Obr. 1.3) formát rámca vychádza z definície IEEE 802.11 (vendor-specific action frame) [17].



Obr. 1.3: Vizualizácia rámca ESP-NOW [17].

- **MAC Header** (24 B) obsahujúci MAC adresy odosielateľa a príjemcu
- **Category Code** (1 B) je označenie typu rámca. V prípade vendor specific rámca ktoré používa ESP-NOW je hodnota nastavená na 127.
- **Organization Identifier** (3 B) je pole obsahujúce jedinečný identifikátor *0x18fe34*, čo sú prvé tri bajty adresy MAC pridelené spoločnosti Espressif.
- **Random Value** (4 B) obsahom poľa je náhodná hodnota, ktorá zabraňuje relay útokom, čo sú kyberútoky využívajúci mechanizmu man-in-the-middle.
- **Vendor Specific Content** (7–257 B) je označenie pre samotný obsah protokolu ESP-NOW tvorený vloženým rámcem.
 - **ElementID** (1 B) fixne nastavená hodnota 221 pre označenie začiatku vendor-specific časti.
 - **Length** (1 B) je celková veľkosť vloženého rámca.
 - **Organization Identifier** (3 B) presne tá istá hodnota ako v nadradenom rámci *0x18fe34*.
 - **Type** (1 B) je parameter určujúci typ Akčného rámca od spoločnosti Espressif. ESP-NOW má túto hodnotu nastavenú na 4.
 - **Version** (1 B) identifikátor verzie protokolu.
 - **Body** (0–250 B) dáta obsahujúce srávu posielanú ESP-NOW protokolom.
- **FCS** sekvencia kontroly rámca (Frame Check Sequence).

1.2 Technológie IoT a LPWAN

Zber dát z lokálnej jednotky je efektívnejší bez potreby fyzického pripojenia k nej. Preto sme z vlastnej iniciatívy mimo zadania hľadali bezdrôtovú technológiu, ktorá umožní odosielanie dát s dostatočným pokrytím v oblastiach elektrického vedenia a zabezpečí komunikáciu s externým dátovým úložiskom. V rámci riešenia zvažujeme technológie IoT (Internet of Things) patriace do sietí LPWAN (Low Power Wide Area Network). Preto sú niektoré z nich predstavené v nasledujúcich podkapitolách následne je zvolená najvhodnejšia technológia s ohľadom na možnosti hardvéru.

IoT

IoT, skratka pre Internet vecí, je koncept, ktorý spočíva v prepájaní a vzájomnej komunikácii zariadení pomocou internetu. Tieto zariadenia sú vybavené senzormi, softvérom a ďalšími technologickými prvkami, ktoré im umožňujú zber, výmenu a spracovanie údajov. Cieľom IoT je vytvoriť inteligentné a vzájomne prepojené systémy, kde zariadenia môžu efektívne komunikovať a spolupracovať. Tento prístup prispieva k zlepšeniu efektivity, bezpečnosti a komfortu v rôznych oblastiach, ako sú domácnosti, priemysel, doprava a ďalšie.

LPWAN

Pre potreby Internetu vecí (IoT) bol vyvinutý nový typ siete známy pod názvom LPWAN (Low Power Wide Area Network). Táto sieť sa vyznačuje vysokou spoľahlivosťou a efektívnym využívaním energie, je navrhnutá tak, aby pracovala s použitím batériového napájania a umožňovala prevádzku zariadení až 10 rokov bez výmeny batérie. Hlavnými vlastnosťami siete LPWAN sú nízka spotreba energie a obmedzená prenosová rýchlosť, čo sieť LPWAN odlišuje od tradičných bezdrôtových sietí, ako sú WiFi, Bluetooth alebo mobilné siete GSM (Global System for Mobile Communications) GPRS (General Packet Radio Service), ktoré sú zamerané na pripojenie používateľov a prenos väčších objemov dát s vyšším vysielačím výkonom. LPWAN siete zvyčajne pracujú na rádiovkej frekvencii 800 MHz až 900 MHz. Používanie tohto pásma prináša výhody, ako sú nižšia spotreba energie, lepší dosah a lepšia priepustnosť signálu cez prekážky. Regulácia využitia pásma je riadená vysielačím výkonom a časovým oknom pre vysielačie [8].

1.2.1 SigFox

Jednou z uvažovaných technológií slúžiacich na komunikáciu IoT jednotky so zberným dátovým úložiskom je proprietárna technológia SigFox. SigFox je bezdrôtový komunikačný protokol vyvinutý francúzskou spoločnosťou SigFox. Špecializuje sa na komunikáciu v oblasti Internetu vecí (IoT) a vytvára bezdrôtovú komunikačnú sieť s veľkým dosahom, ktorá umožňuje prenos malého množstva informácií z meracích zariadení a snímačov. Táto technológia patrí do kategórie nízkoenergetických sietí LPWAN (Low Power Wide Area Network) pre IoT systémy.

Princíp technológie

Technológia SigFox pracuje v bezlicenčnom pásme ISM, konkrétne na frekvenciách 868 MHz pre Európu a 906 MHz pre USA. V tomto pásme nie sú prevádzkované populárne bezdrôtové technológie ako Bluetooth a WiFi, takže nie je ovplyvnená ich rušením. SigFox využíva UNB (Ultra Narrow Band) pásmo na prenos krátkych impulzov dát s vysielačím výkonom 100 mW a moduláciou pracujúcou v 200 kHz verejnom pásme. Každá prenášaná správa pri prenose zaberá šírku len 100 Hz pri rýchlosti prenosu 100 až 600 bit/s. Riešenie s týmito parametrami zabezpečuje dlhý rádiový dosah a vysokú odolnosť proti rušeniu. Vysielaná správa využíva moduláciu DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), ktorá na prenos 1 bitu/s zaberie šírku pásma len 1 Hz. Pri deklamovanej prenosovej rýchlosti komunikácie 100 bit/s je teda využívaná už spomínaná šírka frekvenčného pásma 100 Hz. Táto nízka bitová rýchlosť a úzko koncentrovaná šírka pásma modulácie DBPSK umožňujú veľmi

efektívne využitie prenosového spektra, jednoduchú implementáciu a schopnosť prijímača prijať a demodulovať signály blízko hranice šumu. Citlivosť prijímača SigFox sa prispôsobuje podľa požadovanej prenosovej rýchlosti (z ohľadom na energetickú spotrebu), pričom môže dosiahnuť -142 dBm pri prenosovej rýchlosti 100 bit/s a -134 dBm pri maximálnej rýchlosti 600 bit/s. Zariadenie SigFox vysiela pri prenosovej rýchlosti 100 bit/s za ideálnych podmienok s výkonom 16,15 dBm EIRP [9].

Architektúra siete

Samotná sieť SigFox je založená na bunkovom princípe s hviezdicovou topológiou. Podobne ako mobilné telekomunikačné siete, má základňové stanice (BS), ktoré pokrývajú určité oblasti. Tieto základňové stanice spravuje lokálny operátor SigFox, ktorý prijaté správy odosiela do cloudu SigFox prostredníctvom paketovej siete TCP/IP. Zariadenia nie sú viazané na konkrétnu základňovú stanicu, takže vysielané správy môže prijať ktorákoľvek základňová stanica v dosahu. Základňová stanica demoduluje prijaté správy a následne ich odošle na centrálny bod (back-to-end sieť), kde sú spracované a odoslané konkrétnemu zákazníkovi do jeho aplikácie (platformy).[10].

1.2.2 NB-IoT

Druhou technológiou s veľkým potenciálom využitia v zariadení lokálnej jednotky je technológia NB-IoT.

Rozsiahle zavedenie mobilných sietí LTE (Long Term Evolution) prinieslo možnosť nízkoenergetickej širokopásmovej konektivity pre zariadenia IoT, známe ako NB-IoT (NarrowBand-Internet of Things). NB-IoT je technológia založená na štandardoch s nízkou spotrebou energie (LPWAN), vyvinutá na umožnenie komunikácie M2M (Machine-to-Machine) pre širokú škálu IoT zariadení. V porovnaní s GSM/GPRS sieťami NB-IoT výrazne zlepšuje spotrebu energie používateľských zariadení, kapacitu systému a efektívnosť spektra, najmä pri veľkom pokrytí. Životnosť batérie zariadenia, u zariadenia využívajúce komunikáciu prostredníctvom NB-IoT, môže dosahovať viac ako 10 rokov. Táto technológia tiež zabezpečuje veľkú kapacitu siete, umožňujúc pripojenie viac ako 52 000 zariadení na kanál v jednej bunke. Latencia je voľným parametrom, hoci cieľom technológie je neprekročiť oneskorenie 10 sekúnd [11, 12].

NB-IoT je podporovaný všetkými veľkými výrobcami mobilných zariadení, čipsetov a modulov. Je navrhnutý tak aby bola možná jeho koexistencia s mobilnými sieťami 2G, 3G a 4G. Využíva tiež všetky funkcie zabezpečenia a ochrany súkromia mobilných sietí, ako je podpora: dôvery, identity používateľa, autentifikácie entity, integrity údajov, identifikácia mobilného zariadenia [11].

Pracovné režimy NB-IoT

NB-IoT je úzkopásmová technológia založená na funkciách LTE, ktorá využíva úzku šírku frekvenčného pásma spektra určeného pre mobilné siete GSM a LTE, pričom efektívne využíva ich malé časti. Výsledkom nasadenia je, že technológia v 200 kHz pásme GSM siete, okupuje frekvenčný rozsah 180 kHz na uplink a 180 kHz pre downlink. Frekvenčný rozsah 180 kHz predstavuje práve šírku jedného PRB (Physical Resource Block) v LTE. Tieto parametre umožňujú NB-IoT, nasadenie v 3 rôznych prevádzkových režimoch znázornených na obrázku 1.4 [12].

Prevádzkové režimi:

- **Standalone**

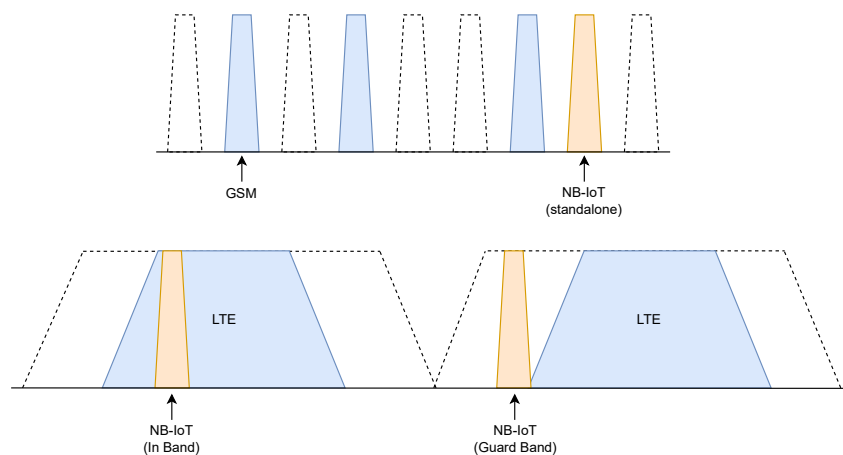
V tomto režime NB-IoT je nasadené na jednej alebo viacerých existujúcich nosných GSM s frekvenčným rozsahom 200 kHz. Výhodou režimu je jeho efektívne využitie GSM pásma pre IoT aplikácie a tiež možnosť využitia všetkého prenosového výkonu vysielacej stanice BS (Base Station) [12].

- **In Band**

NB-IoT je nasadený v rámci iných nosných LTE, využíva rovnaké PRB ako LTE, teda rozsah 180 kHz. Tento prevádzkový režim prináša obmedzenie z hľadiska časovania správy tak, aby nedošlo ku kolízii s LTE, ktorá nesmie byť narušená. Prenosový výkon je rozdelený medzi LTE a NB-IoT [12].

- **Guard Band**

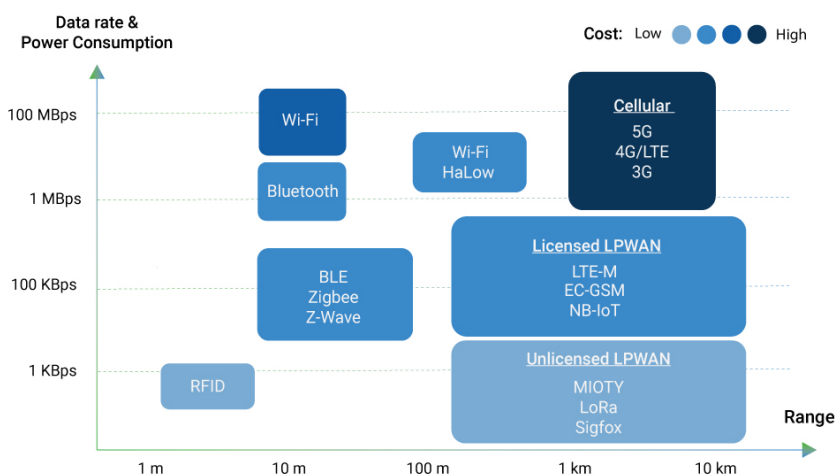
V poslednom režime sa využívajú nepoužitú PRB v rámci ochranného pásma nosných frekvencií LTE. Výkon BS je zdieľaný. Táto technika umožňuje využitie ochranného pásma dvoch susediacich LTE pásiem, čo predstavuje maximálnu šírku $100 \text{ kHz} + 100 \text{ kHz} = 200 \text{ kHz}$. V porovnaní s „in-band“ sa predpokladá menšie rušenie pretože rušenie LTE je umiestnené len na jednej strane nosnej NB-IoT [12].



Obr. 1.4: Prevádzkové režimy NB-IoT [12].

1.3 Zhrnutie výberu bezdrôtových technológií

Stručné zhrnutie dostupných technológií je znázornené v grafe 1.5. Tento graf poskytuje prehľad o vhodnosti rôznych bezdrôtových technológií pre rôzne typy aplikácií, pričom hlavnými sledovanými kritériami sú dátová prenosová rýchlosť a dosah komunikácie. Jednotlivé technológie sú farebne rozlíšené v súlade s prevádzkovými nákladmi, ktoré sa pohybujú v príslušných kategóriách. Voľba komunikačného protokolu pre snímač a lokálnu jednotku je detailne špecifikovaná v tabuľke 1.1, kde sú sledované konkrétne parametre jednotlivých technológií.



Obr. 1.5: Porovnanie bezdrôtových technológií [8].

Podľa výpočtu veľkosti dát generovaných snímačmi za jednu sekundu, vyjadreného vzorcom 1.2, bola stanovená minimálna požiadavka na prenosovú rýchlosť 100 kbit/s. Táto hodnota zohľadňuje množstvo prenášaných dát a potrebnú kompenzáciu réžie. Uvedená prenosová rýchlosť je kľúčová v celom systéme, pretože ovplyvňuje včasné doručenie dát do jednotlivých uzlov.

$$M_{\text{celkové}} = N_{\text{snímačov}} \cdot M_{\text{vzorky}} \cdot f_{\text{vzorkovania}} = 3 \cdot 12 \cdot 2000 = 72000 \text{ bit/s} \quad (1.2)$$

kde: $M_{\text{celkové}}$ je množstvo generovaných dát za sekundu, $N_{\text{snímačov}}$ je počet uvažovaných snímačov v jednom systéme, M_{vzorky} je veľkosť jednej meranej hodnoty, $f_{\text{vzorkovania}}$ je frekvencia vzorkovania snímaču.

Porovnaním technológií v tabuľke 1.2 sme zvolili ESP-NOW pre jeho výnimočnú kombináciu nízkej spotreby energie, vysokého dosahu, rýchlej odozvy a jednoduhosti použitia. Tieto vlastnosti robia z ESP-NOW ideálnu voľbu pre náš projekt,

Tab. 1.2: Porovnanie bezdrôtových technológií lokálnej komunikácie.

	WiFi	ESP-NOW	Bluetooth Clasic	Bluetooth Low Energy
IEEE špecifikácia	802.11 (a/b/g/n/ac)	Spadá pod 802.11	802.15.1	802.15
Frekvenčné pásmo [MHz]	2,4 GHz alebo 5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Modulácia	QPSK, 64-QAM, OFDM	QPSK, 16-QAM	GFSK, π 4-DQPSK, 8-DPSK	GFSK
Prenosová rýchlosť	50 Mbits až 1 Gbits	1 Mbits	1 Mbits až 3 Mbits	1 Mbits
Max. vysielací výkon [mW]	100	64 až 100	100	5 až 100
Max. payload správy [B]	9014	250	512	256
Max. vzdialenosť [m]	50	480	100	100

kde potrebujeme zvoliť efektívnu bezdrôtovú komunikáciu medzi senzоровou a lokálnou jednotkou. Jeho schopnosť rýchleho a spoľahlivého prenosu dát s minimálnou spotrebou energie je dôležitá pre optimalizáciu výkonu a životnosti batérií. Táto technológia navyše ponúka jednoduchú implementáciu a podporuje uvažovanú topológiu hviezdy s komunikáciou peer-to-peer, ďalej uľahčuje integráciu do nášho projektu bez zložitých nastavení nakoľko je plne podporovaná zvolenou čipovou sadou.

1.4 Časová synchronizácia

Aby sme mohli účinne spracovať a vyhodnotiť merané dáta z viacerých snímačov, je dôležité zabezpečiť časovú synchronizáciu. Preto je jednou zo základných požiadaviek systému implementovať metódu, ktorá zabezpečí primeraný stupeň synchronizácie snímaných dát. Stupeň synchronizácie vyjadruje mieru časovej odchýlky medzi synchronizovanými zariadeniami. Vysokú úroveň časovej synchronizácie možno dosiahnuť pomocou niekoľkých metód, z nich je následne bližšie popísaná metóda zvolená pre merací systém.

Metódy časovej synchronizácie:

- **Prídavným vodičom** Prídavný vodič nesúci časový synchronizačný impulz po inom než dátovom kanály.
- **Globálny čas GPS (Global Positioning System)** System GPS periodicky vysiela časové značky od satelitných družíc na obežnej dráhe, ktoré je možné využiť ako synchronizačný čas.
- **Synchronizáciou po prenosovom kanáli** Príkladom takejto technológie je NTP (Network Time Protocol) využívajúci globálnu paketovú sieť alebo protokol PTP využívaný na presnú časovú synchronizáciu v Peer-to-Peer sieťach.

1.4.1 Precision Time Protocol (IEEE 1588)

Precision Time Protocol označovaný ako PTP je riadený štandardom IEEE 1588. Jedná sa o efektívnu, cenovo dostupnú a technicky jednoduchú metódu synchronizácie spolupracujúcich zariadení. K synchronizácii využíva spoločný dátový komunikačný kanál.

Princíp a vlastnosti

Princíp synchronizácie podľa štandardu IEEE 1588 spočíva v periodickom zasielaním špeciálnych synchronizačných správ medzi synchronizovanými systémami v jednej doméne. Synchronizácia je založená na meraní časového posunu hodín a opozdenia prenosového média, medzi zariadením fungujúcim ako zdroj presného času (master zariadenie) a koncovým zariadením (slave zariadenie). Tento mechanizmus umožňuje zistiť odchýlku hodín reálneho času u každého účastníka od presného času a vykompenzovať dobu omeškania správy v komunikačnom kanáli (na všetkých prvkoch trasy). Takýto mechanizmus je ľahko použiteľný v sieťach Ethernet, presnejšie v sieťach určených pre priemysel, pretože zaručuje vysoký stupeň synchronizácie s časovou neistotou menšou než $1 \mu\text{s}$ a to pri prechode cez TCP/IP zásobník. PTP zavedené cez Ethernet dosahuje vyšší stupeň synchronizácie ako napríklad priemyselné siete typu fieldbus [18].

Toto splňoval protokol PTPv1, ktorý veľmi dobre vyhovuje potrebám menších sietí s málo účastníkmi. Vývojom a s rastúcimi požiadavkami siete vznikol upravený štandard IEEE 1588-2008 označený ako PTPv2. Tento upravený štandard definuje nové usporiadania siete a umožňuje ešte lepšiu synchronizáciu. To viedlo nakoniec ku vzniku štandardu IEEE 802.1AS (Timing and synchronization), ktorý určuje spôsob použitia PTP v súvislosti so štandardami IEEE 802.1D a IEEE 802.1Q. Tento štandard navyše ponúka rýchle konvergovanie a odolnosť proti poruchám [19].

Komponenty

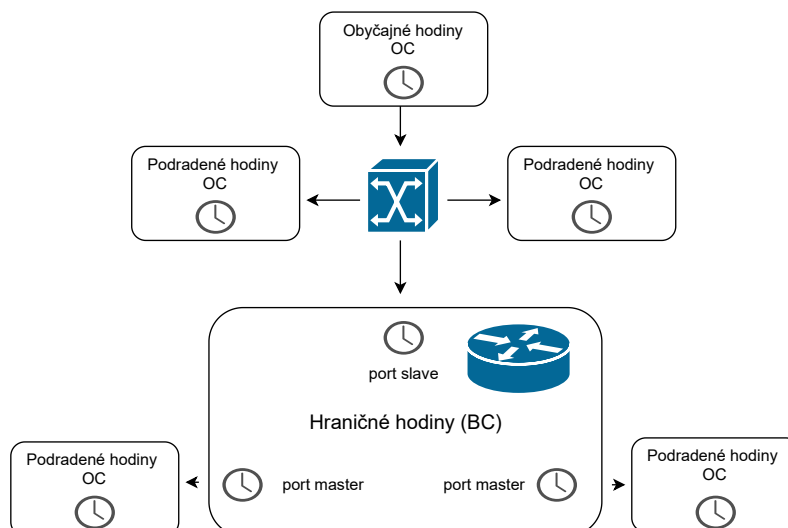
Hodiny (clock) môžu mať podľa štandardu IEEE 1588 štatút podradenej stanice (slave clock) alebo nadradenej stanice (master, grand master clock). Štandard IEEE 1588 definuje dva typy hodín: hodiny obyčajné (ordinary clock - OC) a hodiny hraničné (boundary clock - BC). Vo verzii PTPv2 sú ešte pridané transparentné hodiny (transparent clock - TC) [18].

Základným typom hodín sú obyčajné hodiny OC, ktoré majú len jeden port v celej doméne PTP. Hraničné hodiny BC rozširujú doménu na niekoľko portov v rôznych doménach PTP a sú určené k omedzeniu vplyvu premenlivých opozdení v prvkoch siete, z drvivej väčšiny sa jedná o smerovače. Hodiny BC neprenášajú správy protokolu PTP, z hľadiska PTP segmentujú sieť. Vnútri udržiavajú jedny hodiny s lokálnym časom, ktorý synchronizujú s nadradenou stanicou pomocou jedného portu (port funguje ako slave). Z tohto lokálneho času potom odvodzujú čas fungujúci na ostatných portoch ako čas nadradenej stanice (porty fungujú ako master). BC nikdy neprenášajú správy z nadradenej stanice ale zaujímajú miesto podružnej stanice k nadradenej, čo vedie ku kumulácii [19, 20]. Pre lepšie pochopenie princíp usporiadania hodín je zobrazený na obrázku 1.6.

Kvôli kumulácii chýb sa v rozšírení protokolu PTPv2 zaviedol ďalší typ hodín tzv. priepustné hodiny (transparent clock - TC). Hodiny TC nie sú synchronizované a používajú sa len ku kompenzácii premenlivých opozdení pri priechode správ protokolom PTP. V princípe merajú a kompenzujú latenciu, ktorá vzniká pri priechode paketu cez blok hodín TC. Podriadené stanice (slave) potom využívajú kumulovaný hodnotu opozdenia ku upresneniu výpočtu časového posunu vzhľadom k hodinám nadradenej jednotky (master). Hodiny TC môžu fungovať v dvoch variantách ako End-to-End Transparent Clock (E2E TC) a Peer-to-Peer Transparent Clock (P2P TC). Hodiny E2E TC kompenzujú dobu spracovania vnútri bloku TC, narozdiel od P2P TC, ktoré sú schopné kompenzovať opozdenie na priamo pripojenej linke. Používa pri tom predom zistené hodnoty opozdenia, čo umožňuje to aby sa po zmene sieť rýchlo zotavila [18, 20].

Synchronizácia hodín

Synchronizácia hodín medzi podriadenými stanicami a nadradenou stanicou prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku podriadená stanica, na základe prijatej správy *Sync* od nadradenej stanice, určí posun vlastných hodín. Správy typu *Sync* sú periodicky vysielané nadradenou stanicou. Ak to umožňuje komunikačná technológia je čas hodín nadradenej stanice priamo vložený do tejto správy. V opačnom prípade, ak to technológia neumožňuje, nasleduje správa *Follow Up*, ktorá prenáša



Obr. 1.6: Systém IEEE 1588 (PTP) z pohľadu komponentov [18].

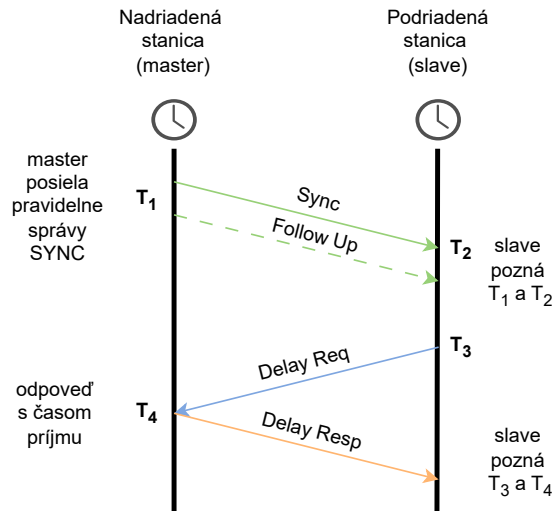
čas hodín nadradenej stanice v čase odoslania správy *Sync*. Táto synchronizácia nezohľadňuje opoždenie (latenciu) prenosového kanála, a preto je nutný druhý krok, ktorý kompenzuje toto opoždenie. V druhom kroku podriadená stanica žiada nadradenú o zmeranie opoždenia pri prenose pomocou správy *Delay Req*. Nadradená stanica odpovedá správou *Delay Resp*, ktorá obsahuje čas prijatia požiadavky od podriadeného zariadenia. Na základe času odoslania a času prijatia správy *Delay Req* podriadená stanica určí hodnotu opoždenia spôsobeného komunikačným rozhraním. Toto meranie je vykonávané podriadenou stanicou v časových intervaloch dlhších, ako je perióda odosielania správ *Sync*. Postupnosť a potrebné časové údaje správ, ktoré si zariadenia vymieňajú medzi sebou, sú zobrazené na obrázku 1.7. Keď je sekvencia správ dokončená, podriadená stanica pozná čas odoslania (T_1) a prijatia (T_2) správy *Sync*, čas odoslania správy *Delay Req* (T_3) a prijatia správy *Delay Resp* (T_4) od nadriadeného zariadenia [18].

Tento mechanizmus funguje za podmienok:

- posun hodín je na oboch zariadeniach konštantný
- oneskorenie spôsobené komunikačným kanálom je rovnaký
- nadradená aj podriadená stanica dokážu presne určiť čas prijatia a odoslania správy

Z týchto známych časov T_1 až T_4 je možné podľa vzorca 1.3 vypočítať posun hodín podradenej stanice p (offset). O získanú hodnotu p si podriadená stanica kompenzuje vlastný aktuálny čas. Výsledný stupeň synchronizácie je závislý na tom do akej miery sme schopný dodržať uvedené podmienky [18].

$$p = \frac{T_2 - T_1 + T_3 - T_4}{2} \quad (1.3)$$



Obr. 1.7: Postupnosť správ pri synchronizácii PTP.

1.5 Meranie veličín

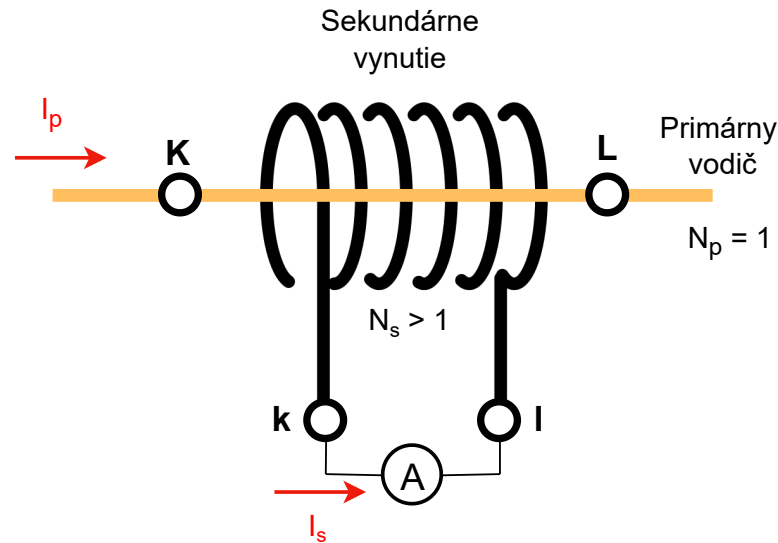
Senzorová jednotka má hlavnú úlohu v meraní veličiny elektrického prúdu I , ktorej základnou jednotkou je Ampér. Pri konštrukcii meracieho systému vyžadujeme aby zvolená meracia metóda dokázala analyzovať parametre strednej, efektívnej a maximálnu hodnotu prúdu. Počítame že meracia časť nemusí disponovať veľkou presnosťou meracieho systému. Chyba merania, ktorú by sme nechceli prekročiť je 2% z meraného rozsahu.

Elektrický prúd je bežne meraný priamou metódou pomocou snímania napätia na nočníku zapojeného v sérii s meraným obvodom. Populárne je aj meranie pomocou hallovho snímaču, ktorý sníma magnetické pole v okolí presne stanovenej vodivej cesty. Takéto meranie je v energetike prakticky nepoužiteľné (problémom sú vysoké prúdy a vysoké prierazné napätia). Na meranie prúdu v energetike sú preto využívané nepriame metódy. Najvyužívanejšími sú merania prúdu pomocou prúdových transformátorov prípadne meranie špeciálnou Rogowského cievky.

1.5.1 Merací transformátor

Merací prúdový transformátor je typ prístrojového transformátora, ktorý je navrhnutý tak, aby prevádzal meraný striedavý prúd v primárnom vinutí priamo úmerne na sekundárne vinutie, pričom pomer prevodu je známy a označujeme ho K_n . Meracie transformátory poskytujú taktiež galvanické oddelenie primárneho vinutia od sekundárneho, čo je v našom prípade použitia kľúčové. Typické zapojenie prúdového transformátora je znázornené na obrázku 1.9. Štandardné označenie svoriek je K (v schémach je niekedy označované bodkou) pre začiatok vinutia a L pre koniec vinu-

tia. Primárne vinutie je označované veľkými písmenami, sekundárne vinutie malými písmenami [27].



Obr. 1.8: Transformátor prúdu - typické zapojenie.

Okrem transformátorov so svorkami na pripojenie primárneho a sekundárneho vinutia existuje aj varianta prúdových transformátorov s možnosťou rozdelenia jadra. Tento typ transformátoru je možné inštalovať do meraného obvodu bez potreby rozpojenia. Podobne ako bežné meracie transformátory prúdu pracuje na princípe elektromagnetickej indukcie. Prietokom prúdu cez primárne vinutie preteká jadrom magnetický tok Φ a jadro je budené. Magnetický tok v jadre následne spôsobuje indukciu prúdu v sekundárnom vinutí. Prevodový vzťah prúdov je zobrazený v rovnici 1.5 a 1.4. V tejto rovnici index P označuje primárnu stranu a S sekundárnu stranu [27].

Merací transformátor s deleným jadrom má aj svoje nevýhody vyplývajúce hlavne so spojenia jadra. Relatívne veľkým problémom je vlhkosť a prach, ktorý sa tvorí na rozhraní spojenia jadra a ovplyvňuje magnetický tok Φ prechádzajúci jadrom a tým aj posúva konštantu transformačného pomeru.

Ako každá meracia metóda aj metóda merania pomocou meracieho transformátoru je zatažená odchýlkou, presnosť rádovo dosahuje hodnoty lepšej ako 0,5%.

$$K_n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{N_p}{N_s} [-] \quad (1.4)$$

kde K_n je prevodový pomer, N_p počet závitov primárneho vinutia (typicky 1), N_s počet závitov sekundárneho vinutia.

$$I_s = I_p \cdot \left(\frac{N_p}{N_s}\right) [A] \quad (1.5)$$

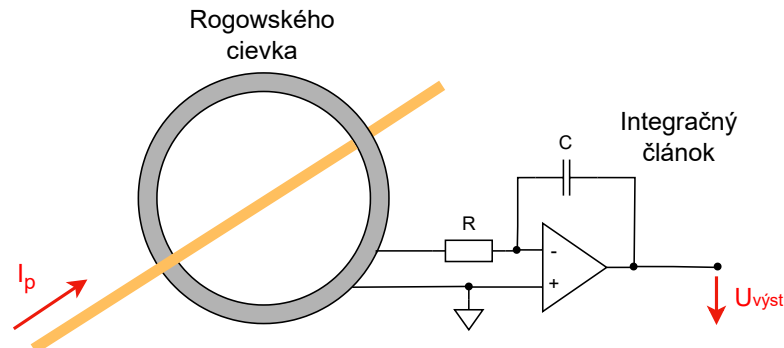
kde I_s je prúd sekundárneho vynutia, I_p je prúd primárneho vynutia (prúd prechádzajúci vodičom).

1.5.2 Rogowského cievka

Táto cievka, pomenovaná po Walterovi Rogowskom, je presný lineárny senzor striedavého prúdu určený na meranie striedavého prúdu (AC) alebo prúdových impulzov širokého rozsahu. Jedná sa o toroidálnu cievku bez železného jadra (vzduchovú cievku) umiestnenú okolo meraného vodiča. Skladá sa zo špirálovitej cievky, začiatok cievky je z jedného konca vyvedený, druhý koniec cievky sa vracia stredom ako keby jadrom celej cievky späť na začiatok t.j. obidve svorky cievky sú na rovnakom konci. Celá zostava cievky je omotaná okolo primárneho vodiča. Hustota navinutia, priemer cievky a tuhosť vinutia sú určujúce parametre pre nízku citlivosť voči vonkajším poliam [21].

Na rozdiel od prúdového transformátora je výstupný signál z Rogowského cievky napätový. Veľkou výhodou cievky je magnetická charakteristika vzduchového jadra, ktorá je lineárna v širokom rozsahu prúdov. Nevýhodou je nutnosť zapojenia integračného [21].

Indukované napätie na výstupe Rogowského cievky je dané vzťahom 1.6. Pričom vzájomná indukčnosť M je vyjadrená ako 1.7.



Obr. 1.9: Rogowského cievka s integračným článkom.

$$U_{\text{vyst}}(t) = M \cdot \frac{\delta i(t)}{\delta t} [V] \quad (1.6)$$

kde $U_{\text{vyst}}(t)$ je výstupné napätie, $\delta i(t)$ zmena prúdu za čas, δt čas zmeny prúdu.

$$M = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot A}{l} [-] \quad (1.7)$$

kde N je počet závitov, A je prierez cievky, l je dĺžka strednej siločiar (jadra cievky).

1.5.3 Zvolená metóda

V riešení diplomovej práce berieme do úvahy, že meracia metóda sa pri nasadení zariadenia môže zmeniť, a preto spracovanie vstupného signálu z meracieho člena rešpektuje najuniverzálnejšie zapojenie. Pre vývoj meracieho systému bola konkrétne zvolená metóda prúdového transformátora. Z hľadiska jednoduchej inštalácie bola, aj napriek nevýhodám, zvolená varianta s deleným jadrom. Pri nasadení zariadenia na vysokonapäťové vedenie je nutné zvolený transformátor vymeniť podľa menovitého prúdu vedenia. Po menšej úprave zapojenia vstupného člena by jednotka mohla teoreticky využívať aj metódu Rogowského cievky.

2 Praktická časť práce

Praktická časť diplomovej práce sa zameriava na konceptualizáciu princípov a následnú výrobu senzorov a lokálnej jednotky. V tejto časti výskumu sa dôkladne venujeme výberu konkrétnych komponentov, ktoré budú tvoriť konečné riešenie. Proces výberu sme štrukturovali do funkčných logických blokov, ktoré sme detailne opísali a následne realizovali ich fyzické zapojenie. V tejto časti práce venujeme pozornosť aj princípom softvérového riešenia meracieho systému.

2.1 Hardware

Pri výbere hardvérových komponentov pre aplikáciu lokálnej a senzorickej jednotky je potrebné dbať na požiadavky rýchleho spracovania surových dát, zabezpečenia konektivity a spoľahlivého prenosu dát medzi jednotkami. Zároveň je dôležité myslieť na možnosti efektívneho využitia napájania kvôli riešeniu problému spojeného s výpadkom primárneho zdroja napájania.

V prípade senzoru musí riadiaci mikrokontrolér (MCU) zabezpečiť meranie vzorkovanie analógového signálu a jeho rýchle spracovanie. Musí byť vhodnou bezdrôtovou technológiou spojený so senzorovou jednotkou a musí byť a schopný po určitú dobu byť napájaný z batérie.

Mikrokontrolér pre lokálnu jednotku spracúvajúcu dáta musí spĺňať požiadavky na príjem RF signálu zo senzorických jednotiek, ich demoduláciu, prípadne dešifrovanie a ukladanie pomocou vhodných periférií (modulov).

2.1.1 Výber riadiaceho modulu MCU

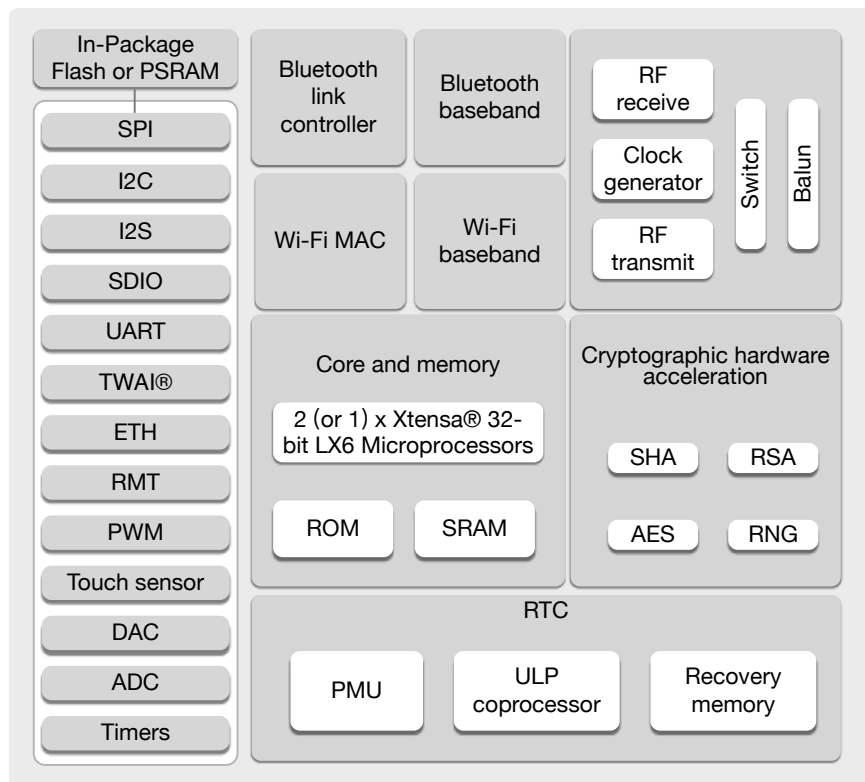
Pre aplikáciu riešenia práce bol zo širokej ponuky mikrokontrolérov zvolený modul ESP32-WROOM-32, ktorý je schopný splniť viacero požiadaviek súčasne. Týmito požiadavkami sú v prípade senzoru meranie tj. vzorkovanie z minimálne desať násobne vyššou vzorkovacou frekvenciou ako je sieťová frekvencia a ukladanie vstupných hodnôt ADC prevodníkom. MCU musí taktiež zabezpečiť rádio-frekvenčné spojenie niektorou s ponúkaných technológií. Lokálna jednotka spracúvajúca dáta využíva z vlastností modulu hlavne rádiofrekvenčné rozhranie, uchovávanie reálneho času pomocou RTC (Real Time Clock) čipu a ukladanie dát do periférie jednou z ponúkaných rozhraní modulu.

Parametre modulu ESP32

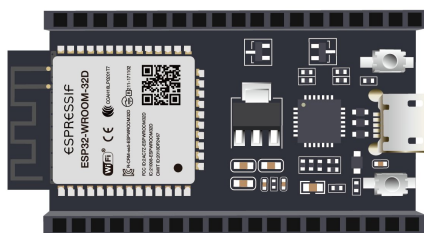
V rámci voľby vhodného riadiaceho modulu pre zadanie diplomovej práce sme sa rozhodli pre využitie modulu ESP32-WROOM-32, jeho hlavné parametre sú pred-

stavené na obrázku 2.2. Táto voľba bola motivovaná sériou kľúčových vlastností, ktoré poskytuje a ktoré sú v našom systéme nevyhnutné. Jedným z rozhodujúcich faktorov bol zabudovaný rádio-frekvenčný modul priamo na čipe. V súvislosti z našou aplikáciou, ktorá operuje v oblasti Internetu vecí (IoT), je bezdrôtová konektivita nevyhnutná pre prenos dát medzi zariadeniami. Prítomnosť integrovaného Wi-Fi modulu u ESP32 nám umožňuje implementovať vybranú komunikačnú technológiu ESP-NOW bez nutnosti použitia externých modulov. Druhým významným faktorom je existencia integrovaného ADC prevodníka priamo na čipe. Táto vlastnosť nám poskytuje možnosť pripojiť snímací transformátor priamo na prevodník senzoru, bez potreby dodatočného čipu spracúvajúceho prevod. Tieto vlastnosti nám pomohli dosiahnuť efektívnejšiu, lacnejšiu a jednoduchšiu implementáciu meracieho systému.

Modul môžeme zaradiť medzi tzv. SoC (System on a Chip) čipy, čo naznačuje vysoký stupeň integrácie funkčných blokov. Tieto funkčné bloky, zobrazené na obrázku 2.1, sú rozdelené podľa vlastností modulu do výpočtovej (procesorovej) časti, ktorá zahŕňa modul udržiavania presného času, komunikačnej rádio-frekvenčnej časti, pamäťovej časti, časti na obsluhu periférií a modulu na vykonávanie kryptografických výpočtov. [22].



Obr. 2.1: Funkčné bloky ESP32 SoC [22].



Procesor: 32-bit Xtensa LX6
 Pamäť: 4 MB Flash memory
 Komunikačné technológie: 2.4 GHz Wi-Fi,
 Bluetooth 5
 Anténa: Integrovaná na PCB
 Rozhrania: 3xUART, 3xSPI, SDIO,
 2xI2C, 2xI2S, IR

Obr. 2.2: Zvolený mikrokontroler ESP32-WROOM32 [22].

Režimy napájania ESP32

Modul ESP32 je v porovnaní s podobnými mikrokontrolérmi rodiny Arduino výkonnejší, čo znamená, že beží na oveľa vyšších frekvenciách. To však zvyšuje energetické nároky čipu. Implementácia rádiového modulu na čipe ešte viac zvyšuje požiadavky na napájanie. Pre aplikáciu IoT senzoru vyvíjaného v diplomovej práci je dôležitá schopnosť záložného napájania z batérie. Aby zariadenie dokázalo fungovať na batériové napájanie čo možno najdlhšie, ESP32 obsahuje niekoľko režimov napájania, v ktorých sú obmedzené jednotlivé funkčné bloky čipu, čím sa jeho energetická náročnosť výrazne znižuje. Tieto režimy napájania sú využívané hlavne v senzorovej jednotke, ktorá je v režime hlbokého spánku, pokiaľ neodosiela dáta. Medzi jednotlivými režimami je možné prepínať programovo. Prehľad spotreby jednotlivých režimov je zobrazený v tabuľke 2.1.

Tab. 2.1: Režimy spánku čipu ESP32ESP32-WROOM-32 [23].

Režim spánku	Aktívne bloky	Spotreba čipu [mA]
Aktívny režim	WiFi - režim vysielania (TX)	240 - 180
	WiFi - režim prijímania (RX)	95 - 100
	Bluetooth, BLE - kombi režim (RX+TX)	95 - 130
Spánok modemu	Taktovacia frekvencia "Slow Speed" 2 MHz	2 - 4
	Taktovacia frekvencia "Normal Speed" 80 MHz	20 - 25
	Taktovacia frekvencia "Max Speed" 240 MHz	30 - 50
Lahký spánok		0,8
Hlboký spánok	Koprocesor + RTC časovač + RTC pamäť	0,010
Hibernácia		0,005

ESP32 poskytuje používateľovi 5 voliteľných režimov napájania:

- **Aktívny režim** (Active Mode)

Je normálnym prevádzkovým režimom, v ktorom fungujú všetky periférne moduly, je povolené WiFi a Bluetooth, čip môže vysielat alebo prijímat RF signál [23].

- **Režim spánku modemu** (Modem Sleep Mode)

V tomto režime spánku modemu je jadro ESP32 funkčné, všetky periférne moduly sú funkčné okrem rádiového rozhrania (WiFi a Bluetooth) tie sú vypnuté. Spotreba v tomto móde je závislá od taktovacej frekvencie procesora, jej znížením je možné znížiť odber prúdu a naopak [23].

- **Lahký režim spánku** (Light Sleep Mode)

Režim ľahkého spánku prináša zníženie pozastavenie hodinového taktovacieho impulzu, procesor je v stave "clock-gated"čo spôsobí pozastavenie pamäte RAM a digitálnych periférií. Rádiové rozhranie je vypnuté a je znížené jeho napájacie napätie tak aby sa ušetrilo čo najviac energie. Latencia prebudenia v režime ľahkého spánku je menej ako 1 ms. CPU v tomto režime nestráca kontext. Po prebudení z režimu spánku sa vnútorné stavy pamäte RAM aj CPU zachovávajú a program pokračuje tam, kde skončil [23].

- **Režim hlbokého spánku** (Deep Sleep Mode)

V režime hlbokého spánku je CPU, väčšina pamäte RAM a všetky digitálne periférie, ktoré sú taktované z APB_CLK, vypnuté. Jedinou aktívnou časťou čipu je pamäť RTC, radič RTC a koprocesor ULP (Ultra Low Power). Koprocesor môže stále vykonávať niektoré jednoduché úlohy, hlavne čítanie údajov prichádzajúcich zo vstupno/výstupných portov konkrétne portov RTC GPIO. RTC je v tomto režime využívané pre generovanie udalostí „prebudení“, ktoré spôsobia prebudenie z režimu. Latencia prebudenia je podobná ako v režime ľahkého spánku.

Hlavným rozdielom medzi režimom ľahkého spánku a hlbokého spánku je že V režime hlbokého spánku CPU stratí kontext a po prebudení sa spustí vykonávanie programu úplne od začiatku [23].

- **Režim hibernácie** (Hibernation Mode)

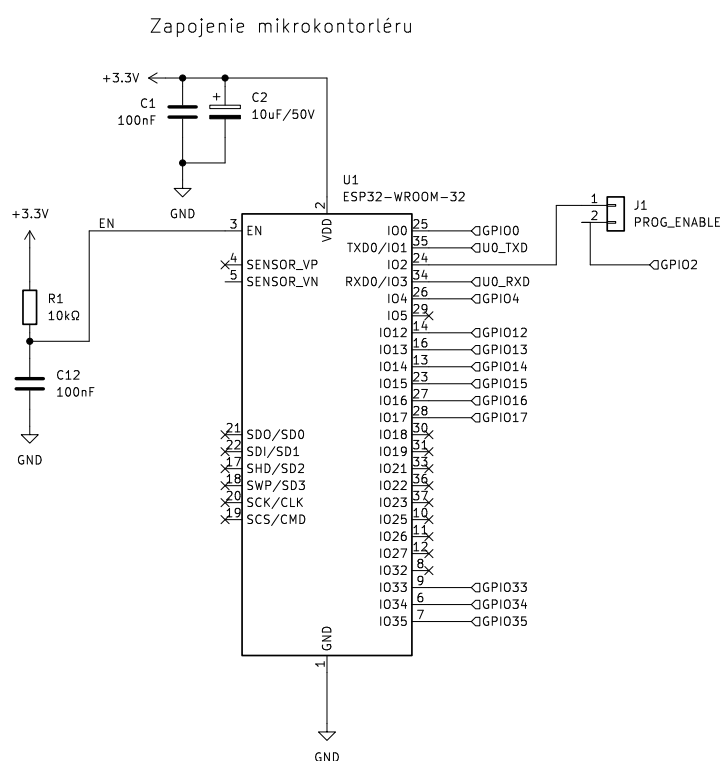
Najsilnejším režimom spánku je režim hibernácie. V tomto režime sú všetky oscilátory, periférie, RTC a ULP vypnuté. Jedinou zostávajúcou aktívnou časťou je jeden časovač RTC a niekoľko určitých RTC GPIO portov slúžiacich na prebudenie zariadenia z hibernácie. V tomto režime je najmenšia dosiahnuteľná spotreba čipu latencia prebudenia pomocou GPIO (jediné možné) je v tomto prípade 1 ms [23].

Cena modulu

Neoddeliteľnou súčasťou riešenia hardvérových komponentov je aj ich cena. ESP32 je ponúkaný v dvoch variantách a to samotného modulu kde je cena jedného kusu (v čase vypracovania práce) 122 Kč, a vývojovej dosky, ktorá obsahuje regulátor napätia s nízkym úbytkom LDO (Linear Dropout), RGB LED diódu, USB/UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) prevodník CP2102, ten je pripojený konektorom USB-C, zabezpečujúcim tiež funkciu napájania celej vývojovej dosky. Vývojová doska má vyvedených 30 GPIO portov v dvoch paralelných lištách. Cena takejto vývojovej dosky (v čase vypracovania práce) činila 256 Kč.

Zapojenie modulu MCU

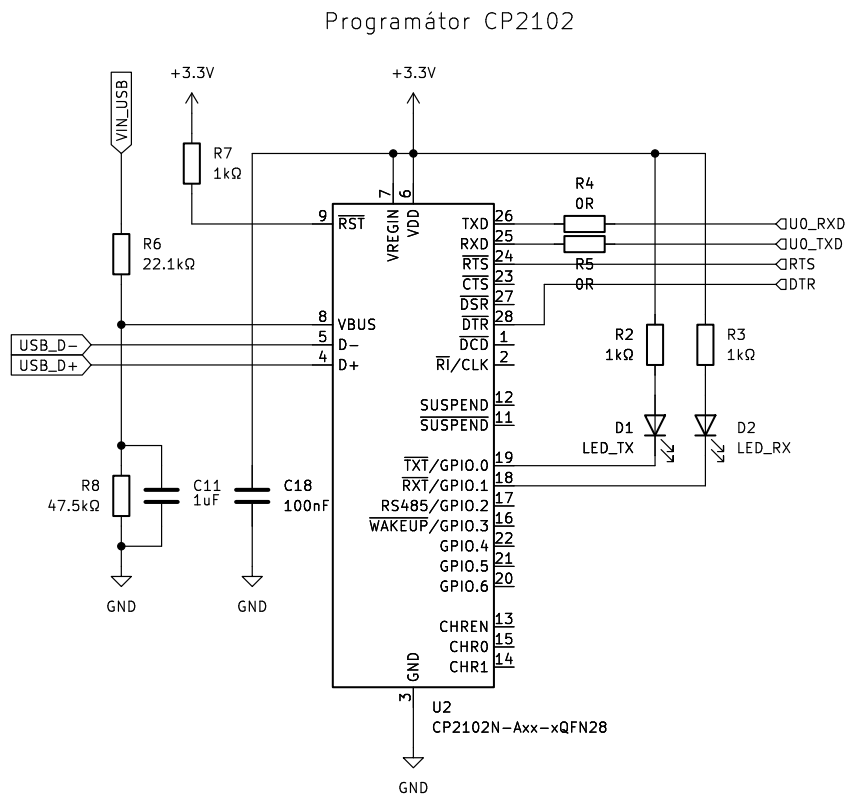
Modul je pre potreby obidvoch zariadení zapojený podľa schémy 2.3. Zapojenie vychádza z odporúčania výrobcu špecifikovaného v datasheete [22]. Napájanie celého modulu zabezpečuje zdroj konštantného napätia o hodnote 3,3V pripojený cez „decoupling“ kondenzátory C1 a C2, ktoré vyrovnávajú špičkové prúdové požiadavky čipu. Aby sa čip inicializoval pri pripojení napájania je EN-pin zapojený cez rezistor R1 na napájaciu vetvu. Periférie sú k mikrokontroléru pripájané na porty GPIO, konkrétne porty sú špecifikované v časti práce ktorá sa venuje konkrétnej periférii.



Obr. 2.3: Schéma zapojenia modulu ESP32.

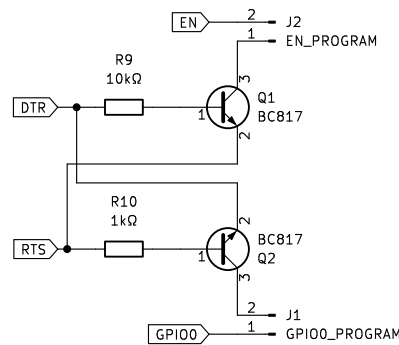
Programovanie modulu MCU

Programovanie MCU je zabezpečené pomocou MCU rozhrania UART0. Priame pripojenie rozhrania USB z programovacieho PC nieje možné, preto je na prevod medzi rozhraniami použitý prevodník. Zvolený je prevodník rozhraní USB/UART CP2102 od výrobcu Silicon Labs. Mikročip prevodníku je doplnený o pasívne súčiastky podľa schémy 2.4 opäť vychádzajúcej z doporučenía výrobcu tak aby bola zachovaná spoľahlivosť a funkčnosť. LED diódy D1 a D2 sú len informačné a neosadzovali sme ich na dosku plošných spojov.



Obr. 2.4: Schéma zapojenia prevodníku CP2102 (USB/UART).

Aby bolo možné nahráť program MCU sa musí dostať počas resetovania do „boot“ módu. To je možné zabezpečiť kombináciou logických úrovní na „strapping“ pinoch. Strapping pin GPIO0 má interný „pull-up“ rezistor plniaci funkciu zablokovaniu „boot“ módu pri resete MCU. Aby bol spustený „boot“ mód, musí byť tento pin na základe datasheetu pripojený do logickej 0 počas resetu [22]. Dosiahnutie skratovania GPIO0 môžeme pomocou fyzického tlačidla, ktoré pripojí pin na potenciál logickej 0, čo však nieje praktické. Spôsobom ako doceliť automaticky „boot“ mód je prepojenie pinov DTR (Data Terminal Ready) a RTS (Ready To Send) USB/UART prevodníka cez tranzistory Q1 a Q2 na piny EN a GPIO0. Zapojenie je zobrazené na schéme 2.5.



Obr. 2.5: Schéma zapojenia obvodu automatického programovania.

2.1.2 Lokálne ukladanie dát

Jednou z požiadaviek práce je ukladanie meraných dát vo vhodnom formáte do lokálnej jednotky. Na splnenie tejto požiadavky bola zvolená metóda ukladania dát na micro-SD kartu, ktorá je zmenšenou variantou klasických SD (Secure Digital) kariet z hľadiska rozmerov plošného spoja. SD karta je typ pamäťovej karty, používanej na ukladanie a prenášanie dát medzi zariadeniami, ako sú fotoaparáty, notebooky a mobilné telefóny.

Komunikačné módy úložiska

Pamäťová karta SD, ako jej predchodca MMC (MultiMediaCard), podporuje viac spôsobov pripojenia, ktoré ovplyvňujú rýchlosť prenosu. Oba štandardy kariet podporujú rozhranie SPI. Toto rozhranie využíva tri dátové signály, synchronizačný CLK signál a signál CS na špecifikáciu periférie s ktorou mikrokontroler práve komunikuje. Výhodou tohto rozhrania je, jeho univerzálnosť nakoľko väčšina mikrokontrolérov využíva SPI zbernicu. Okrem SPI pamäťová karta podporuje rozhranie SDMMC pracujúce v dvoch režimoch 1-bitovom a 4-bitovom. SDMMC linka je oproti SPI obojsmerná a využíva až 4 dátové linky [25].

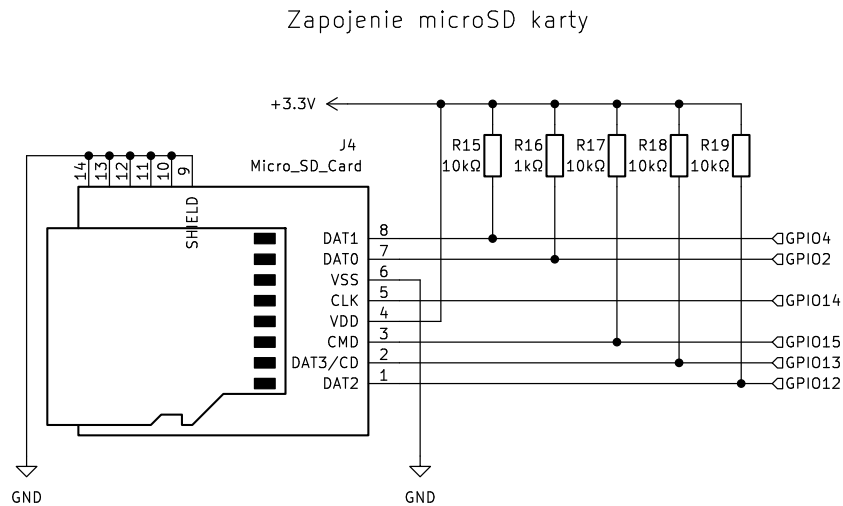
V diplomovej práci sme uprednostnili 4-bitový režim SDMMC pre zvýšenie rýchlosti zápisu na SD kartu. Pre lokálnu jednotku sme zvolili SD kartu s kapacitou 32 GB a rýchlostnou triedou UHS-1 (rýchlosť zápisu 10 MBs).

Požiadavky na zapojenie

Zbernica SD karty a mikroprocesoru pri využití ovládaču SPI alebo SDMMC vyžaduje zapojenie „pull-up“ rezistorov. Keď karta pracuje v režime SPI alebo SDMMC,

musia byť dátové linky zbernice CMD a DATA zapojené pomocou „pull-up“ rezistorov o hodnote odporu $10\text{k}\Omega$ na napájaciu vetvu mikrokontrolera. Pokiaľ sa táto požiadavka nesplní dôjde k indukcii rušenia na zbernici [26].

Zapojenie konektoru pre pripojenie SD karty do MCU je zobrazené na obrázku 2.6. Zvolený bol 4-bitový mód, ktorý využíva všetky dátové linky SD karty. Napájanie karty zabezpečuje 3,3V napájacia vetva. Jednotlivé dátové linky sú podľa požiadaviek zapojené cez „pull-up“ rezistory na napájaciu vetvu.



Obr. 2.6: Zapojenie konektoru pre microSD kartu.

2.1.3 Zvolený merací transformátor

Pre vývoj zariadenia bol zvolený transformátor určený pre napätie NN, pretože by bolo zložité testovať optimalizáciu systému na napätí VN. Pri nasadení zariadenia v energetike plánuje zadávateľ projektu zvolený merací transformátor vymeniť za typ vhodný pre VN poprípade upraviť zapojenie pre Rogowského cievku. Úprava transformačného pomeru môže rozhodnúť nastavenie pracovného bodu vstupného zosilňovača pri zmene je nutné zmeniť aj odpor zaťažovacieho odporu R26, R27 viz. 2.1.3. Konkrétna prúdová sonda zvolená pre model senzoru je SCT013 od spoločnosti YHDC jej špecifikácia sa nachádza na obrázku 2.7. Jedná sa o prúdový transformátor s deleným jadrom. Cena sondy sa v čase vypracovania práce pohybuje okolo 300 Kč.



Meraný prúd:	0 – 30 A(AC)
Výstupné napätie:	0 – 1 V(AC)
Prevodový pomer (K_n):	1/1800
Presnosť:	$\pm 1\%$
Pracovné napätie:	max. 660V
Pracovná frekvencia:	50 Hz – 1 kHz
Skratová odolnosť:	3kV

Obr. 2.7: Prúdová sonda a jej špecifikácia [28].

Zapojenie meracieho transformátoru

Signál z výstupu zvoleného prúdového transformátoru je potrebné spracovať tak, aby mohol byť vzorkovaný ADC prevodníkom v MCU. Podľa návrhnutého zapojenia zobrazeného v schéme 2.8 signál z meracieho transformátoru vstupuje cez 3,5 mm jack konektor na zaťažovací rezistor R26, R27, prevádzajúci prúd na napätie. Pri priechode maximálneho meraného prúdu (menovitá hodnota) primárnou stranou I_p 4 A je prúd sekundárneho vinutia I_s 2,22 mA. Hodnota rezistorov R26, R27 je stanovená z požiadavky maximálnej veľkosti vstupného napätia pre ADC prevodník 3,0 V. Táto veľkosť bude platiť pre dvojnásobok maximálneho prúdu sekundárnej vetvy transformátoru $2 \cdot I_s$. Pretože spracúvame signál skladajúci sa z kladnej a zápornej polvlny $2 \cdot I_s$ musí byť prevedené na napätovú úroveň $\frac{1,5V}{\sqrt{2}}$. Efektívna hodnota tohto napätia označovaného ako U_{sm} je rovná 1,06 V. Preto podľa rovnice 2.1 je zaťažovací rezistor nastavený na hodnotu 500 Ω . Následne tento signál je cez väzbový kondenzátor C11 privedený na invertujúci vstup operačného zosilňovača LM358. Jeho spätná väzba (zosilnenie) je variabilne nastaviteľné kvôli kalibrácii zariadenia trimrom RV1. Na neinvertujúci vstup operačného zosilňovača je privedená napätová referencia tvorená rezistormi R24 a R25, ktorá striedavý signál jednosmerne posúva o 1,65 V podľa rovnice 2.2. K nej sú paralelne pripojené kondenzátory C13 a C12 na tvoriace antialiasingový filter. Druhý operačný zosilňovač je zapojený ako sledovač napätia, jeho funkciou je impedančné oddelenie. Ako posledná je v obvode zapojená zenerova dióda D6 na ochranu vstupu ADC prevodníku pri prípadnom prepätí.

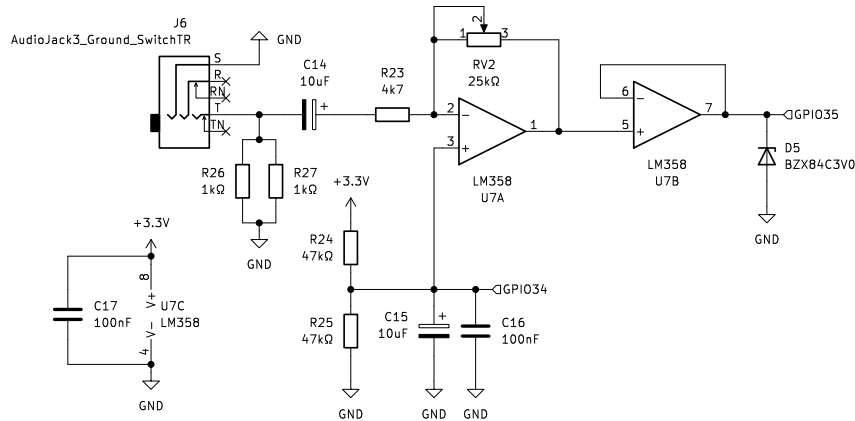
$$R = \frac{U_{sm}}{I_{sm}} = \frac{1,06}{0,00222} = 477,47 \Omega \quad (2.1)$$

kde U_{sm} je efektívna hodnota polovice vstupnej citlivosti ADC prevodníku, I_{sm} efektívna hodnota prúdu sekundárnej strany pri prechode prúdu menovitej hodnoty primárom.

$$U_{R25} = U_{cc} \cdot \frac{R_{25}}{R_{24} + R_{25}} = 3,3 \cdot \frac{47000}{47000 + 47000} = 1,65 \text{ V} \quad (2.2)$$

kde U_{cc} je napájacie napätie deliča 3,3 V, $R_{24,25}$ hodnota odporu rezistoru.

Zapojenie meracieho transformátoru

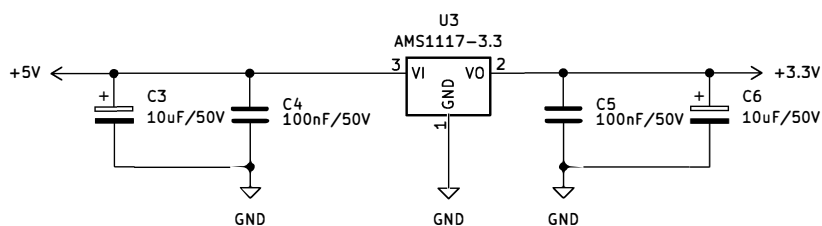


Obr. 2.8: Zapojenie obvodu pre úpravu signálu z meracieho transformátoru.

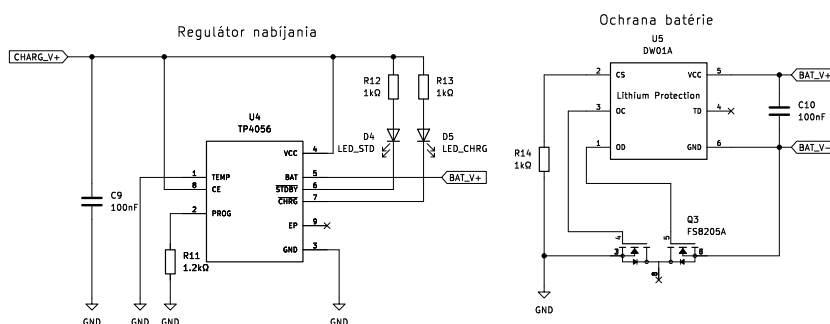
2.1.4 Napájanie

Napájacia časť zariadenia je konštruovaná s ohľadom na požiadavky batériového napájania. Základom napájania je Linear Dropout regulátor (LDO) AMS1117 (Obr. 2.9), z výstupným napätím 3,3 V, zabezpečujúci napájanie mikroprocesora aj všetkých periférií zariadenia. Batériu zariadenia tvorí štandardizovaný LiIon článok 18650, jeho nabíjanie zabezpečuje obvod TP4056. K tomuto obvodu sú pripojené dve signalizačné led diódy signalizujúce stav nabíjania. Prívod obvodu je zapojený na USB konektor a pinovú lištu zabezpečujúcu možnosť externého napájania. K článku je ešte pripojená BMS (Battery Management System) ochrana U5 tvorená obvodom DW01A, tento obvod zabezpečuje ochranu článku pred prepätím, pod-pätím a aj prílišným prúdovým zaťažením výstupu. Zapojenie je možné sledovať na schéme 2.10. Napätie z batérie je pre potreby LDO regulátoru navýšené DC-DC meničom MT3608 zobrazeným na obrázku 2.11 na hodnotu cca 5 V.

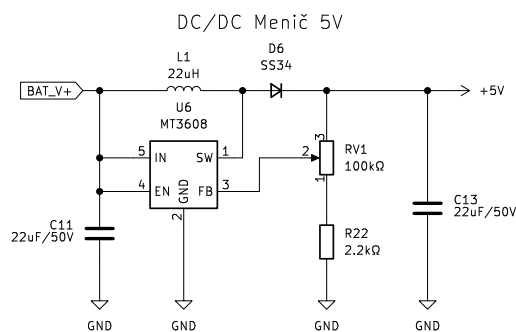
LDO Regulátor 3,3V



Obr. 2.9: Zapojenie regulátora LDO.



Obr. 2.10: Zapojenie obvodu správy batérie BMS.



Obr. 2.11: Zapojenie DC/DC meniča.

Pre komerčné nasadenie zariadenia je predpokladané pripojenie externý zdroj tvorený, solárnym článkom alebo energy harvester obvodom, ktorá zabezpečuje galvanicky oddelené napájanie snímaču prechodom prúdu vedením. Nasledovná úprava je na zadávateľovi projektu meracieho systému.

2.1.5 Návrh dosky plošných spojov

Návrh plošného spoja vychádzal z potreby testovania navrhovaného riešenia meracieho systému. Jeho základom je vybraný MCU SoC čip, ku ktorému sú pripájané vhodne umiestnené jednotlivé bloky hardvéru. Plošný spoj reflektoval umiestnenie všetkých komponentov na jednu dosku. Jediným prídavným modulom, ktorý neje priamo implementovaný na DPS je modul komunikácie SIM7600 pripájaným na rozhranie J5. Spoločnosť, pre ktorú je merací systém vyvíjaný špecifikovala požiadavku čo najlacnejšej výroby prototypu DPS preto je plošný spoj lokálnej jednotky aj snímaču rovnaký, jednotky sa líšia osadzovanými súčiastkami.

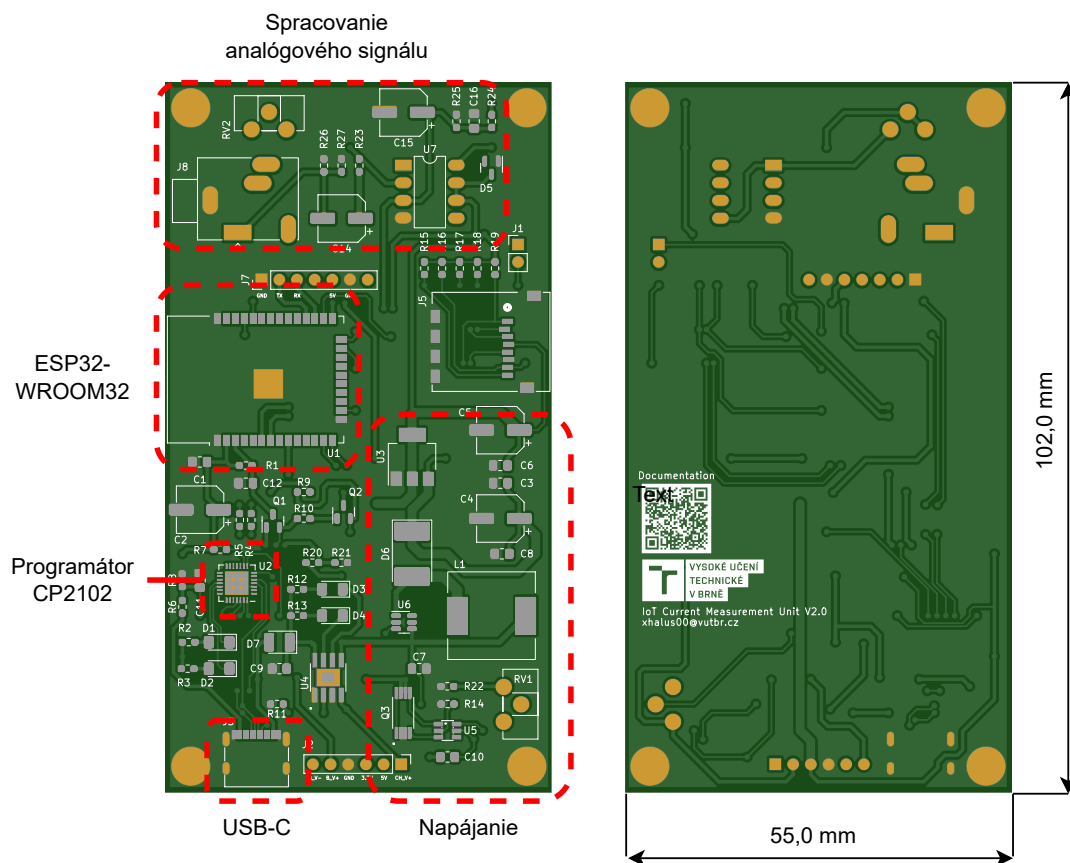
Výsledný návrh DPS pozostáva z dvoch vonkajších vrstiev TOP a BOTTOM. Vrchná vrstva TOP zobrazená na obrázku 2.12 vľavo, je hlavným nosičom signálov a sú na nej umiestnené všetky súčiastky. Vyznačené sú na nej jednotlivé funkčné bloky zariadenia. Vrstva BOTTOM zobrazená na obrázku 2.12 vpravo, má hlavnú úlohu v distribúcii napájania 3,3 V a 5 V. Na oboch vrstvách je rozliaty poligón pripojený na potenciál zeme (GND), výnimkou je miesto kde sa nachádza DC/DC menič z dôvodu možnosti indukcie vysokých frekvencií okolo cievky. Doska obsahuje vývod všetkých napájacích úrovní na jeden konektor z dôvodu merania energetickej náročnosti. Na obrázkoch PCB sa na vrchnej vrstve sú tiež vyznačené jednotlivé funkčné bloky.

Súčiastky boli na DPS osadzované ručne, v návrhu DPS sú z tohto dôvodu zväčšené spájkovacie miesta vývodov jednotlivých súčiastok. Procesor MCU a regulátor nabíjania batérie boli spájkovné s využitím „hot plate“ nakoľko súčiastky obsahujú miesto pre vývod tepla zospodu. Osadené dosky pre lokálnu jednotku a senzor sú zobrazené na obrázku 2.13. Celý návrh plošného spoja vrátane schém, návrhu plošného spoja a jeho výstupných výrobných súborov sa nachádzajú v externej prílohe diplomovej práce.

2.1.6 Mechanická konštrukcia krabičky

Osadené plošné spoje lokálnej jednotky aj senzoru boli umiestnené do krabičiek zobrazených v prílohe B.2, B.3. Krabičky sú zostrojené pomocou 3D tlačiarne technológiou FDM (Fused Deposition Modeling). Z ohľadom na mechanickú pevnosť a umiestnenie zariadení bol zvoleným materiálom PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol). Modely krabičiek a výstupné súbory pre výrobu sú súčasťou prílohy.

Krabička pre senzorovú jednotku je zhotovená z ohľadom upevnenia na vedenie. Zvolená bola samodržná konštrukcia upevnená na 2 bodoch vodiča, pričom jeden z upevňovacích bodov, je práve merací transformátor. Plošný spoj sa vkladá do krabičky pomocou otváracích dvierok so západkou. Pod vkladaným plošným spojom je umiestnený článok 18650 záložného napájania. Z dôvodu vývoja softvéru bol na



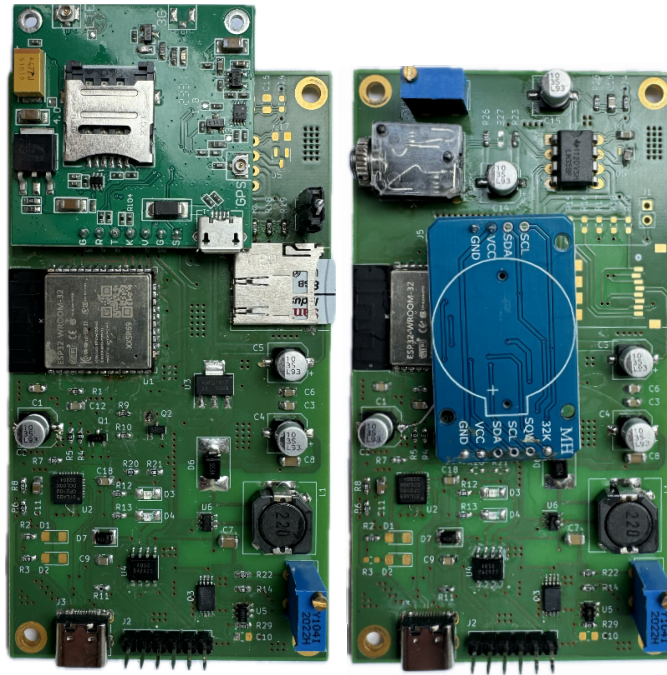
Obr. 2.12: Rozloženie vrchnej (TOP) a spodnej (BOTTOM) vrstvy DPS.

krabičku pridaný otvor v oblasti USB-C konektoru. Vodotesnosť návrhu v tejto fáze vývoja nebola riešená.

Lokálna jednotka je prispôsobená k montáži na DIN lištu. Spredu je na jednotku umiestnený otvor pre manipuláciu s SD kartou a na vrchnej strane sa nachádza otvor pre pripojenie komunikačných antén. Podobne ako v snímači je plošný spoj osadený cez montážne dvierka a pod ním je batéria.

2.2 Komunikácia

Jednou z kľúčových požiadaviek meracieho systému je komunikácia medzi senzormi a lokálnou jednotkou spracúvajúcou dáta. Preto sa nasledujúca časť práce bude zaoberať hlavne opisom zvolenej technológie na komunikáciu a časovou synchronizáciou, ktorá hrá významnú rolu v presnosti merania konceptu. Zo zadania je zvolená hviezdicová topológia, v ktorej lokálna jednotka bude tvoriť centrálny bod a jednotlivé snímače budú pripojené k tomuto centrálnemu bodu. Komunikácia medzi lokálnou jednotkou a úložiskom dát bola taktiež implementovaná pomocou modemu SIM7600



Obr. 2.13: Osadený polsný spoj lokálnej jednotky (vľavo) a senzoru (vpravo).

ale nakoľko zo strany spoločnosti, pre ktorú je projekt vyvíjaný od tejto komunikácie upustila vysvetlená nieje. Navzdory tomu bola komunikácia odskúšaná a je súčasťou programového riešenia (je možné ju povoliť v konfigurácii zariadenia viz. 3.4).

2.2.1 Prepojenie senzorickej a lokálnej jednotky

Navrhované riešenie musí spĺňať požiadavkou bezdrôtového prenosu dát tj. lokálna jednotka a snímač nesmú byť spojené pomocou akéhokoľvek typu vodiča. Tento rádiový prenos je uvažovaný na malú vzdialenosť maximálne 100 m, preto budeme vyberať z technológií primárne určených pre siete typu LAN a PAN. Z dostupných technológií pre bezdrôtové snímače, rozoberaných v kapitole 1.1.1, boli uvažované primárne dve. Technológia BLE a ESP-NOW. BLE tvorí hviezdicovú sieť založenú na štandarde IEEE 802.15, výhodou takejto siete je jednoduchosť správ vymieňaných medzi zariadeniami. Toto riešenie nebolo doporučené a to hlavne z hľadiska vytvárania spojenia medzi zariadeniami po zobudení z režimu spánku čipu pred komunikáciou, čo by celú komunikáciu spomaľovalo a zahlcovalo sieť. Druhou a zvolenou technológiou bol proprietárny protokol ESP-NOW založený na štandarde IEEE 802.11 (WiFi), ktorý ponúka tiež možnosť hviezdicovej topológie siete. Narozdiel od BLE dokáže komunikovať na väčšiu vzdialenosť s väčšou rýchlosťou až 1 Mbit/s. V prípade poruchy pri prenose sa snaží znovu odoslať správu a tým čiastočne rieši spoľahlivosť doručenia dát. Rozhodujúcim však bol fakt, že nemusí vytvárať spoje-

nie pred samotným vysielaním dát. Komunikujúce zariadenia sú spárované len pri inicializácii systému.

2.2.2 Knižnica ESP-NOW

Spoločnosť Espressif vyvíjajúca mikročipy ESP32 ponúka knižnicu, ktorá obsluhuje proprietárny protokol od tej istej spoločnosti. Knižnica pozostáva z niekoľkých súborov najhlavnejší z nich je `esp_now.h` ktorý obsahuje predpisy funkcií volaných v hlavnom kóde. Pre účely lokálnej komunikácie zariadenia sú využívané nasledovné funkcie.

Inicializácia a deinicializácia

Pre inicializáciu komunikačného protokolu je využívaná funkcia `esp_now_init(void)`, ktorá je volaná až po samotnej inicializácii RF rozhrania ako doporučuje výrobca. Ukončenie komunikačného protokolu vykonáva funkcia `esp_now_deinit(void)`, pri volaní funkcie je treba dbať pozor na to, že všetky párované zariadenia sú zavolaním funkcie vymazané [17].

Párovanie zariadení

Ako už bolo v práci zmienené pred samotnou komunikáciou je potrebné zariadenia spárovať tj. pridať známe zariadenie do "device listu". Pridanie zariadenia je vykonávané funkciou `esp_now_add_peer(const esp_now_peer_info_t *peer)` do ktorej sú ako premenná odoslané informácie o MAC adrese a použitom frekvenčnom kanály protistrany v prípade použitia šifrovania sa do funkcie odosiela kľúč LMK. Maximum spárovaných zariadení je 20 v prípade použitia šifrovania len 7 [17].

Odosielanie a príjem dát

Odosielanie dát zabezpečuje funkcia `esp_now_send()`, ktorá odošle dáta a viac sa o komunikáciu nestará. V prípade ak chceme dostať informáciu o správnom prijatí dát, musíme využiť callback funkciu `esp_now_register_send_cb()`, ktorá vracia v prípade úspešného prijatia na druhej vrstve protokolu, pozitívnu hodnotu inak nám oznámi, že dáta neboli prijaté. V prípade neprijatia dát sa funkcia automaticky stará o znovu-odoslanie v troch cykloch. Nevýhodou je o niečo väčšia réžia (posielané sú ACK rámce) [17].

Z týchto dvoch funkcií pre odosielanie bola zvolená callback varianta, nakoľko je žiadúce aby dáta, ktoré sú odosielené do lokálnej jednotky správne dorazili.

Príjem dát protokolom zabezpečuje funkcia `esp_now_register_recv_cb()`, táto funkcia príjme dáta z RF rozhrania a určí podľa poľa „Type“ druh komunikácie.

Podľa toho odosiela potvrdzujúcu správu ACK a následne sa stará o príjem a spracovanie dát [17].

Bezpečnosť správ

V prípade odpočúvania preposielaných správ alebo útoku na systém je žiadúce, aby boli správy posielané medzi zariadeniami vhodne zabezpečené. Protokol ESP-NOW toto zabezpečenie rieši metódou CCMP (Counter Cipher Mode with Block Chaining Message Authentication Code Protocol) popísanou v štandarde IEEE 802.11-2012 využívajúceho symetrického šifrovania AES (Advanced Encryption Standard) s maximálnou dĺžkou kľúčov 128 bitov. Zariadenie na šifrovanie používa dva druhy kľúčov PMK (Public Master Key), je spoločný kľúč nachádzajúci sa vo všetkých zariadeniach komunikujúcich v jednej doméne. Ďalším typom kľúču je LMK (Local Master Key) tento kľúč môže mať každé zariadenie unikátne, je však potrebné aby pri párovaní zariadenia obidve zariadenia tento kľúč poznali. PMK kľúč je využívaný na šifrovanie LMK kľúču šifrovacím algoritmom AES, ten následne šifruje vendor specific rámec v ktorom sa nachádzajú dáta. Maximálny počet LMK kľúčov použitých v jednom zariadení je 7, preto pri zabezpečenej komunikácii nemôže byť spojených viac ako 7 zariadení [29].

Metóda zabezpečenia CCMP je v plnom rozsahu využitá v navrhovanom riešení. Nakoľko by mohlo v prípade útoku dôjsť k znehodnoteniu snímaných dát. Podmienku počtu zariadení navrhované riešenie spĺňa, nakoľko sa predpokladá, že medzi sebou komunikujú 4 zariadenia. Zadávanie kľúčov prebieha vo fáze konfigurovania zariadenia, tato konfigurácia môže byť automatická (s využitím firemného programu) alebo manuálna. Zvolená je dĺžka kľúčov presne 128 bitov z dôvodu maximalizácie zabezpečenia.

Módy rádiového rozhrania

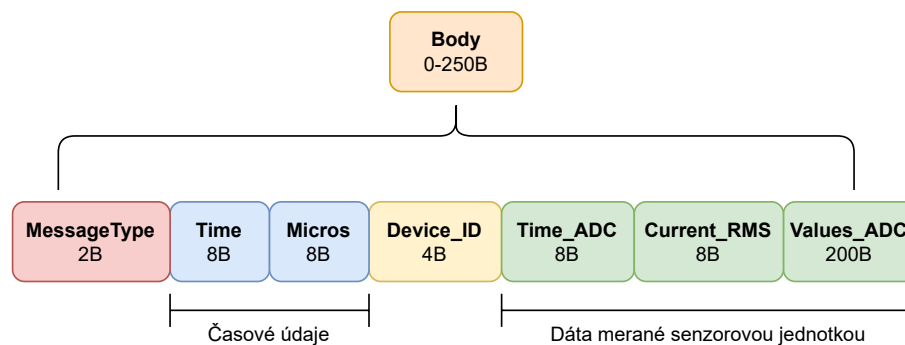
Rádiové rozhranie čipu ESP32-WROOM-32 môže pracovať pri použití štandardu IEEE 802.11 v 3 rozličných režimoch. Režim v ktorom bude stanica pracovať je nutné špecifikovať pri inicializácii rádiového rozhrania. Možné režimy:

- **STA**, režim stanice, rádiové rozhranie sa pripája k prístupovému bodu (AP).
- **AP**, režim prístupového bodu, ostatné zariadenia sa pripájajú k rádiovému rozhraniu.
- **AP/STA**, je mód koexistencie režimov, rádiové rozhranie súži aj ako prístupový bod aj ako stanica.

Pre realizáciu navrhovanej topológie bol pre lokálnu jednotku zvolený režim AP (centrálny bod hviezdicovej topológie), jednotlivé senzory využívajú STA režim v ktorom sú pripojené k lokálnej jednotke.

2.2.3 Úprava rámcu

Rámec zasielaný medzi komunikujúcimi zariadeniami v sieti ESP-NOW sa skladá z presne definovanej štruktúry popísane v podkapitole 1.1.6. Vzhľadom na to že v riešenie meracieho systému vyžaduje rozlíšenie dvoch tipov správ a to: rámce zasielajúce dáta a rámce pre časovú synchronizáciu. Bola dátová časť „Body“ akčného rámca segmentovaná na niekoľko polí. V prípade synchronizačnej správy sú odoslané len prvé 4 polia, veľkosť správy je teda 22 B. V prípade dátovej správy sú zasielané všetky polia a v tomto prípade má správa veľkosť 238 B. Vizualizácia segmentovanej dátovej časti akčného rámca je na obrázku 2.14.



Obr. 2.14: Segmentácia dátovej časti rámcu ESP-NOW.

Vysvetlenie významu polí:

- **MessageType** (2 B) typ prenášanej správy (Synchronizačná/Dátová).
- **Time** (8 B) časová značka odoslania správy vo formáte unix time v sekundách.
- **Micros** (8 B) rozšírenie časovej značky o mikrosekundy.
- **Device_ID** (4 B) výrobné číslo zariadenia.
- **Packet_Counter** (4 B) vyjadruje počet zaslaných paketov od poslednej synchronizácie.
- **Time_ADC** (8 B) čas začiatku snímania vzorkov vyjadrený v μs vztiahnutý k poslednej synchronizácii.
- **Current_RMS** (4 B) vypočítaná efektívna hodnota prúdu za 100 ms.
- **Values_ADC** (200 B) surové dáta snímané ADC prevodníkom za 100 ms.

3 Firmware

Najväčší dôraz pri riešení práce je venovaný vývoju firmwéru a návrhu algoritmov pre testovanie a vývoj meracieho systému podľa požiadaviek zadávateľa. Vyvíjaný firmwér by mal byť ľahko škálovateľný a prehľadný z dôvodu možnej implementácie dodatočných funkcií zadávateľom do budúcnosti. V rámci kapitoly sa zaoberáme programovému riešeniu princípov časovej synchronizácie, merania signálu, dátovému úložisku a možnej konfigurácii.

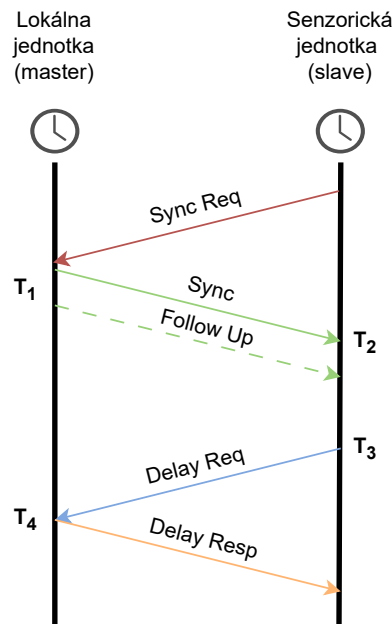
Táto kapitola nemá za cieľ vysvetliť detailne funkčnosť celého programu, ale opísať jeho hlavné časti a myšlienky.

3.1 Zabezpečenie časovej synchronizácie

Kľúčovou úlohou v celej práci je zabezpečiť časovú synchronizáciu lokálnej jednotky a jej priradených snímačov. Požiadavkou je, že lokálna jednotka a snímač nesmú byť spojené pomocou akéhokoľvek typu vodiča, a rozdiel v časovej synchronizácii nesmie presiahnuť $100\ \mu\text{s}$. Na základe týchto požiadaviek bola zvolená metóda popísaná protokolom PTP (IEEE 1588). Tento protokol je bližšie predstavený v teoretickej časti práce v kapitole 1.4.1. Splňa požiadavku koexistencie dátového a synchronizačného toku v jednom kanáli a jeho teoretická časová neistota je menšia ako $1\ \mu\text{s}$.

Implementácia PTP protokolu

Štandard IEEE 1588 presne špecifikuje vymieňané správy medzi synchronizovanými zariadeniami. Nakoľko je perspektíva využitia niektorého so šetriacich režimov čipu ESP32 musí byť synchronizačný algoritmus mierne pozmenený. Problém nastáva hlavne pri čakaní rádiového rozhrania na synchronizačnú správu, čo by pri využití režimu spánku (RF rozhranie je vypnuté) nebolo možné. Navrhovaná zmena aplikovaná v riešení, spočíva v zavedení nového typu správy SYNC_REQ. Táto správa je odoslaná v nultom kroku algoritmu. Cieľom správy je vyžiadať nadradenej stanice podriadenu (tj. senzor lokálnu jednotku) o SYNC správu. Ostatné kroky synchronizácie reflektovali algoritmus štandardu PTP. Jednotlivé kroky upraveného algoritmu je možné sledovať na obrázku 3.1. Všetky správy vymieňané medzi zariadeniami v dátovej časti packetu obsahujú časovú známku v 64 bitovom formáte UNIX time. Posun hodín je určený vzorcom 1.3 a nastavuje RTC (Real Time Clock) timer zariadenia.



Obr. 3.1: Postupnosť správ časovej synchronizácie zariadení.

3.2 Meranie hodnôt

Lokálna jednotka na prevod analógového meraného signálu využíva interný AD prevodník mikročipu MCU, umiestnený za operačným zosilňovačom.

Mikročip obsahuje dva ADC prevodníky typu SAR (Sequence Approximation Register) sa jedná o prevodníky s postupnou aproximáciou. Prevodníky sú multiplexované do 18 kanálov vyvedených na piny MCU. Referenčné napätie pre konverziu je nastaviteľné pomocou voliteľného útlmu, ako je uvedené v tabuľke 3.1. Pre testovanie zariadenia bol zvolený rozsah od 150 mV do 2450 mV. V prípade použitia viacerých vstupných rozsahov merania je vhodné použiť útlm na ich prepínanie. Bytová hĺbka prevodníka je nastaviteľná, pričom maximálne rozlíšenie ADC je 12-bitové (čo predstavuje analógový signál s 4096 úrovňami). Prevodník je riadený ULP (Ultra Low Power) koprocesorom čipu [17].

Tab. 3.1: Režimy referenčného napätia ADC prevodníku[17].

Voľba útlmu	Merateľný rozsah vstupného napätia
<i>ADC_ATTEN_DB_0</i>	100 mV - 950 mV
<i>ADC_ATTEN_DB_2_5</i>	100 mV - 1250 mV
<i>ADC_ATTEN_DB_6</i>	150 mV - 1750 mV
<i>ADC_ATTEN_DB_12</i>	150 mV - 2450 mV

Prevodník ADC je relatívne citlivý na šum, čo môže viesť k značným odchýlkam v meraných údajoch. Táto chyba sa bežne rieši blokovacím kondenzátorom s kapacitou 100 nF, ktorý však ovplyvňuje vstupnú impedanciu, a preto sme sa jeho použitiu chceli vyhnúť. Ďalšou technikou na zníženie šumu je metóda viacnásobného vzorkovania, pri ktorej sa v krátkom čase odoberie viacero vzoriek signálu a následne sa spriemerujú.

Prevodník v lokálnej jednotke pracuje tak, že zoberie dve vzorky po sebe na dvoch vstupoch prevodníka (jeden vstup je pripojený na prúdový signál a druhý na referenčnú hodnotu posunu signálu operačného zosilňovača). Tieto hodnoty spriemeruje a následne od seba odčíta. Výsledkom je perióda kvantového signálu obsahujúca 2^{11} kladných úrovní a 2^{11} záporných úrovní. Redukcia šumu je dosiahnutá nielen viacnásobným vzorkovaním, ale aj predpokladom, že šum na oboch kanáloch ADC je rovnaký a je matematicky odčítaný.

3.2.1 ULP koprocessor

ULP koprocessor je súčasťou čipovej sady ESP32 a zodpovedá za obsluhu niektorých periférií, ako sú I2C zbernica a ADC prevodník. Jeho hlavnou výhodou je, že pracuje nezávisle na jadrách hlavného procesora, čo umožňuje vykonávanie úloh, v úspornom „sleep“ režime. ULP koprocessor je užitočný pre jednoduché programové aplikácie vyžadujúce periodicky opakujúce sa úlohy a je využívaný v zariadeniach internetu vecí (IoT). Programovanie ULP koprocessora je vykonávané v inštrukčnom jazyku assembler.

Senzorová jednotka využíva ULP koprocessor na presné časovo definované snímanie vzoriek z ADC prevodníka. Prvá časť programu 3.1 zahŕňa zosnímanie vzoriek ADC prevodníkom, a ich spracovanie, spočívajúce v spriemerovaní a odčítaní. Po výpočte UML koprocessor uloží meranú hodnotu do jedného z dvoch bufferov recovery pamäti o dĺžke 200 hodnôt, ktoré sa periodicky striedajú, aby sa zaručilo nepretržité snímanie.

Výpis 3.1: Časť kódu zabezpečujúca snímanie vzorkov.

```

I_STAGE_RST(),
I_MOVI(R0, 0),
I_MOVI(R2, 0),
    M_LABEL(LBL_MEAS_ADC),
        I_ANALOG_READ(R1, ADC_IN),
        I_ADDR(R0, R0, R1),
        I_ANALOG_READ(R3, ADC_REF),
        I_ADDR(R2, R2, R3),
        I_STAGE_INC(1),
M_BSLT(LBL_MEAS_ADC, (1 << ULP_oversampling_factor)),
I_RSHI(R0, R0, ULP_oversampling_factor),
I_RSHI(R2, R2, ULP_oversampling_factor),
I_SUBR(R1, R0, R2),

```

Zobudenie hlavného procesora nastáva po naplnení bufferu hodnotami a je realizované sériou inštrukcií. Cieľom inštrukcií je v prvom kroku zistiť v akom režime napájania sa nachádza hlavný procesor, kontrolou registru *RTC_CNTL_LOW_POWER_ST_REG*, pokiaľ je hlavný procesor v stave spánku tak je zobudený makro inštrukciou *M_WAKE_WHEN_READY()*.

Časovanie snímania je zabezpečené RTC registrom *RTC_CNTL_TIME0_REG*, ktorý zmení svoju hodnotu každých 30 μ s. Na konci ULP programu je čakacia slučka znázornená vo výpise 3.2, na nej môžeme sledovať, že pri zmene registru o 16 tj. v prepočte na čas 488 μ s dôjde k znovu spusteniu ULP programu.

Výpis 3.2: Časť kódu zabezpečujúca načasovanie.

```

M_LABEL(LBL_HALT),
    // Set update bit
    I_WR_REG_BIT(RTC_CNTL_TIME_UPDATE_REG,
        RTC_CNTL_TIME_UPDATE_S, 1),
    // Loop until valid bit is set
    I_RD_REG_BIT(RTC_CNTL_TIME_UPDATE_REG,
        RTC_CNTL_TIME_VALID_S),
        I_BL(-1, 1),

    I_RD_REG(RTC_CNTL_TIME0_REG, 0, 16),
    I_SUBR(R0, R0, R1),
        //Compare it with wakeup perriode
M_BGE(LBL_PROGRAM_BEGIN, 16),

M_BX(LBL_HALT),

```

3.2.2 Forma dát odosielaná lokálnou jednotkou

Po navzorkovaní a základnom spracovaní signálu ULP koprocesorom sa zo snímaných vzoriek vypočíta efektívna hodnota prúdu. Výpočet vychádza zo vzorca 3.1 a jeho implementáciu možno vidieť v programovom výpise 3.3. Najprv sú vzorky v slučke `while` umocnené a následne sčítané. Táto slučka je tiež využívaná na pridávanie surových vzoriek do dátovej štruktúry na odoslanie. V ďalšom kroku je suma kubických vzoriek podelená počtom vzoriek a výsledok je odmocnený. Celá aritmetika je kvôli jednoduchosti vykonávaná v celočíselných kvantových hodnotách. Na prepočet do skutočnej hodnoty prúdu sa použije kalibračný faktor, ktorý zohľadňuje parametre vstupného odporu, prevodového pomeru meracieho transformátoru a hĺbku kvantovania. Tento faktor je vypočítaný podľa vzorca 3.2. Hodnota efektívneho prúdu je pridaná do správy na odoslanie (dátovej štruktúry) a následne je správa odoslaná lokálnej jednotke prostredníctvom protokolu ESP-NOW.

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum I_s^2} [\text{A}] \quad (3.1)$$

kde I_{RMS} je efektívna hodnota prúdu, I_s je okamžitá hodnota vzorky.

$$\text{CAL}_{\text{FACT}} = \frac{U_{\text{ADCmax}} \cdot K_n}{R_z \cdot \text{ADC}_{\text{max}}} [-] \quad (3.2)$$

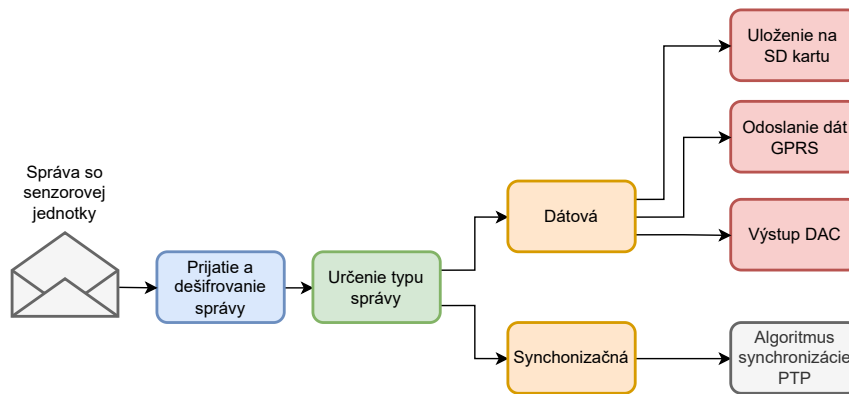
kde U_{ADCmax} je maximálne citlivosť ADC prevodníku, K_n je transformačný pomer prúdového transformátoru, R_z je zaťažovací odpor transformátoru (R26, R27), ADC_{max} je hĺbka vzorkovania.

Výpis 3.3: Časť programu slúžiaca na kalkuláciu efektívnej hodnoty prúdu.

```
while (i < lengthOfBuffer)
{
    d_ADC[j] = ulp_vars.ULP_ADC_result[i].val ;
    sum_sqared_values += d_ADC[j] * d_ADC[j];
    ADC_VALUES[j] = (ulp_vars.ULP_ADC_result[i].val >> 4)+127;
    i++;
    j++;
}
float mean_sqare_current = sum_sqared_values / bufor_lnght;
RMS_CURRENT = calibration_factor * sqrt(mean_sqare_current);
```

3.3 Spracovanie dát lokálnou jednotkou

Lokálna jednotka poskytuje niekoľko možností výstupov meraných hodnôt. V prvej verzii meracieho systému sa dáta ukladali na SD kartu vo formáte CSV (Comma-separated values), odkiaľ boli načítané do excelu. Tento systém slúžil k ladeniu prog-



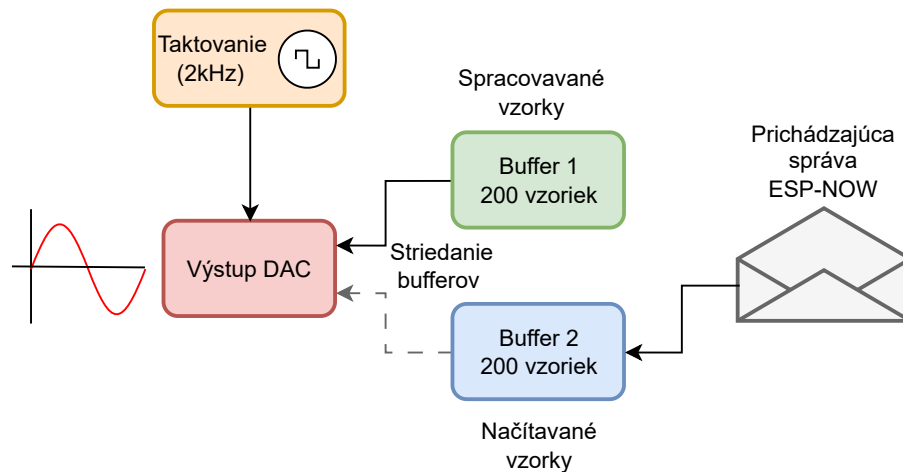
Obr. 3.2: Výstupy meraných hodnôt lokálnej jednotky.

ramu ULP koprocesora. Po otestovaní vzorkovania a merania bola pridaná možnosť ukladať dáta priamo do databázového systému pomocou modulu SIM7600. Druhá verzia zariadenia, ktorá zohľadňovala požiadavky zadávateľa, obsahovala analógový výstup meraného priebehu. Konečná verzia systému implementuje tri výstupy, ako je zobrazené na obrázku 3.2.

3.3.1 DAC prevodník vzorkov

Podľa požiadaviek zadávateľa projektu meracieho systému bola implementovaná funkcionálna analógového výstupu meraného prúdu v lokálnej jednotke. Výstup má slúžiť pre externé zariadenie vyhodnocujúce kvalitu siete. Z princípu merania dát je jasné že výstup analógového signálu má určité opozdenie voči reálnemu času, toto opozdenie je priamo úmerné veľkosti bufferu napĺňaného UML koprocesorom a činí 200 ms. Pre testovacie účely je využitý DAC prevodník integrovaný na čipe MCU. ESP32-WROOM32 ponúka dva takéto prevodníky. Princípiálne má prevodník niekoľko režimov. Lokálna jednotka využíva režim priameho výstupu napätia (One-shot/Direct Mode). Kanály DAC v tomto režime pri volaní funkcie `dac_oneshot_output_voltage()` prevádzajú 8-bitovú digitálnu hodnotu (vzorku) na analógové napätie v úrovni 0 mV až 3500 mV. Analógové napätie je udržiavané na kanáli DAC až do zmeny vykonanej predošlou funkciou.

DAC prevodník funguje na rovnakej vzorkovacej frekvencii ako ADC prevodník sensorovej jednotky. Zabezpečuje to prerušenie jedného z hardvérových časovačov. Pri vyvolaní prerušenia je do kanálu DAC prevodníku načítaná hodnota z bufferu vzorkov. Pre zachovanie kontinuálneho výstupu je nutné striedanie dvoch bufferov, do ktorých sú postupne vkladané vzorky tak, že jeden je spracovávaný DAC a do druhého sú ukladané dáta z práve prichádzajúcej správy od senzoru. Princípiálne fungovanie celého systému výstupu DAC môžeme sledovať na obrázku 3.3.



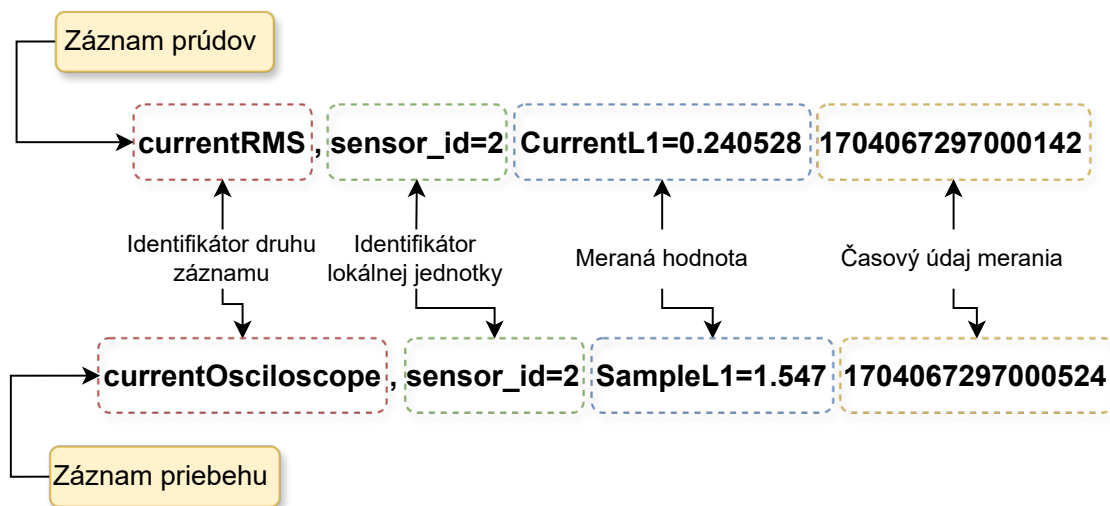
Obr. 3.3: Fungovanie DAC výstupu.

3.3.2 Forma lokálne ukladaných dát

Jedným z výstupov lokálnej jednotky sú dáta ukladané lokálne na SD kartu. Pre jednoduchosť nie sú dáta na SD karte nijak zabezpečené a sú ukladané v textovom formáte. Pri vložení SD karty lokálna jednotka kartu identifikuje a vytvorí preddefinovaný súbor v koreňovom adresár. Jednotlivé merané hodnoty sú následne zapisované ako riadky do tohto súboru. V prípade zaplnenia úložiska sú najstaršie záznamy premazané.

V prvej verzii systému bol zvolený formát CSV. Každý riadok obsahoval informáciu o čase vo formáte unixtime s presnosťou na mikrosekundy, nasledovanú identifikáciou snímača a hodnotou prúdu. Aby bolo možné jednotlivé polia od seba odlíšiť, medzi každé pole bola pridaná bodkočiarka ako separátor. Táto reprezentácia meraných dát sa však ukázala ako nevhodná, pretože načítanie dát do databázového systému bolo zložité a vyžadovalo veľa výpočtového výkonu. Napriek tomu je tento formát stále podporovaný serverovou časťou pomocou nastaveného API.

V druhej verzii systému sú dáta ukladané do tzv. „Line protokolu“. Ide o špecifický textový formát používaný na import dát do databázového systému, ktorý je týmto systémom priamo podporovaný. Tento formát umožňuje efektívne škálovateľné spracovanie a triedenie veľkých objemov dát naraz. Hlavnou výhodou je, že údaje z lokálnej jednotky môžu byť v jednom kroku nahrané do databázy a okamžite prístupné všetkým používateľom. Ďalšou výhodou protokolu je jednoduché rozšírenie systému o ďalšie zaznamenávané údaje bez nutnosti úpravy databázového systému na strane servera. Štruktúra dvoch typov záznamov ukladaných lokálnou jednotkou je zobrazená na obrázku 3.4. Prvý typ (zobrazený navrchu) slúži na ukládanie efektívnych hodnôt prúdov. Druhý typ záznamu (zobrazený naspodku) slúži na zaznamenávanie jednotlivých vzoriek meraného striedavého priebehu, čo umož-



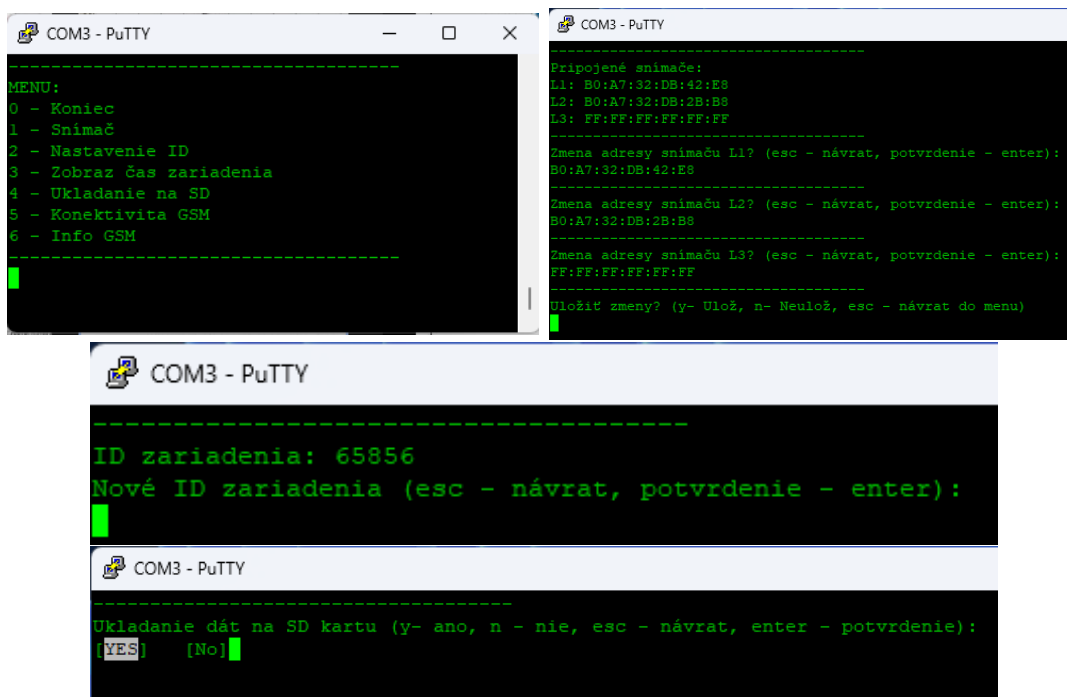
Obr. 3.4: Štruktúra typov záznamov ukladaných na SD kartu.

ňuje vykreslenie osciloskopického zobrazenia priebehu prúdu. Bližšie informácie o prezentácii dát sú uvedené v kapitole 3.6.

3.4 Konfigurácia zariadenia

Konfigurácia lokálnej jednotky sa vykonáva pomocou rozhrania UART. Toto rozhranie je pripojené k počítaču cez USB-C kábel, pričom konverziu medzi USB a UART zbernicami zabezpečuje prevodník CP2102, ktorý je inštalovaný na doske zariadenia. Konfigurácia prebieha v menu zobrazenom na obrázkoch 3.5 v niekoľkých krokoch.

Najprv je potrebné v sekcii „Snímač“ (obrázok hore vpravo) nakonfigurovať pripojené snímače na jednotlivých fázach L1 až L3 zadaním ich MAC adries. Ďalej je nutné nastaviť identifikátor zariadenia (výrobné číslo), ktorý slúži na identifikáciu konkrétneho meracieho systému v databáze. Posledným krokom je povolenie ukladania meraných hodnôt na SD kartu alebo zasielanie dát vzdialene pomocou GSM modulu. V konfiguračnom menu si užívateľ navyše môže zobraziť aktuálny čas zariadenia získaný prostredníctvom GPS a informácie o pripojení GPRS.



Obr. 3.5: Vyhotovený prototyp zariadenia.

3.5 Nahrávanie firmvéru

Nahrávanie firmvéru do jednotiek je možné dvoma spôsobmi:

1. Pripojením k PC

Pomocou pripojenia k počítaču cez USB zbernicu. Preklad a nahrávanie programu v tomto prípade zabezpečuje vývojové prostredie Platformio. Táto možnosť slúži na prvotné nahranie firmvéru do MCU pri výrobe.

2. Súborom z SD karty

Aktualizácia firmvéru pomocou binárneho súboru uloženého na SD karte. Po spustení zariadenie skontroluje, či sa na SD karte nachádza súbor s názvom „firmware.bin“. Ak ho nájde, začne s aktualizáciou. Priebeh nahrávania možno sledovať prostredníctvom zbernice UART 3.6. Po dokončení nahrávania sa prípona súboru zmení na „.bak“, aby sa zabránilo nechcenému opätovnému spusteniu nahrávania firmvéru pri ďalšom spustení zariadenia.

3.6 Serverová časť

V rámci návrhu systému bola stanovená požiadavka na lokálne odčítanie meraných hodnôt. Napriek tomu bolo rozhodnuté, že merací systém bude napojený na databázu, do ktorého sa budú merané hodnoty ukladať. Aby sa zachovala možnosť lokálneho odpočtu, bola implementovaná funkcionálna načítania meraných hodnôt

```
Search for firmware..Try to update!  
Update process at 0 of 1022480 bytes...  
Update process at 4096 of 1022480 bytes...  
Update process at 8192 of 1022480 bytes...  
Update process at 12288 of 1022480 bytes...  
Update process at 16384 of 1022480 bytes...  
Update process at 20480 of 1022480 bytes...  
Update process at 24576 of 1022480 bytes...
```

Obr. 3.6: Proces aktualizácie firmvéru.

z SD karty do databázy prostredníctvom vloženia súboru, ako je opísané v podkapitole 3.3.2, cez webovú aplikáciu. Nasledujúca kapitola sa venuje výberu vhodného databázového systému, jeho stručnej špecifikácii a opisu implementácie. Na záver kapitoly je opísané užívateľské zobrazenie meraných hodnôt.

3.6.1 Databáza

Na ukladanie meraných dát merací systém vyžaduje databázu schopnú rýchleho spracovania časovo orientovaných údajov. Takúto funkcionality poskytujú databázy časových radov (TSDB - Time-Series Database). Tieto databázové systémy sú optimalizované na spracovanie a uchovávanie údajov, ktoré sú spojené s časom. TSDB databázy dokážu prijímať milióny údajových bodov za sekundu, čo poskytuje vysoký výkon spracovania, ktorý je pre merací systém kľúčový. Najlepšie hodnotenou TSDB databázou je InfluxDB, preto bola zvolená v implementácii diplomovej práci.

InfluxDB je open-source časová databáza, ktorá je optimalizovaná na ukladanie, vyhľadávanie a analýzu časovo orientovaných dát. Je vyvinutá v jazyku Go a má robustné možnosti dotazovania, schopnosť spracovať veľké objemy dát a možnosť horizontálneho škálovania. InfluxDB je často používaná v kombinácii s nástrojmi na vizualizáciu dát, ako je napríklad Grafana využívaná v časti zobrazenia pre užívateľa viz. 3.6.2. Dáta sú organizované podľa časových značiek v takzvaných kontajneroch „bucketoch“, zoskupeniach dát s rovnakým názvom. Dáta sú ďalej organizované pomocou „tagov“ a „fieldov“ [30].

- **Tag**

Sú označenia, slúžiace na identifikáciu merania a nezmenia v čase. Tagy sú indexované a veľmi efektívne pri vyhľadávaní a filtrovaní. Môžeme si ich predstaviť ako identifikátor tabuľky.

- **Field**

Sú označenia samotných polí dát, ktoré sa ukladajú. Na rozdiel od tagov, fieldy môžu byť aktualizované a menené. Môžeme si ich predstaviť ako identifikátory

stĺpcov v tabulke.

Pri implementácii databázového systému využívame jeden kontajner „Measurement“, v ktorom sú dva tagy použité na rozlíšenie osciloskopických hodnôt (tag: currentOscilloscope), teda vzorkovaného priebehu, od vypočítaného efektívneho prúdu (tag: currentRMS). Jednotlivé namerané hodnoty sú následne ukladané do „fieldov“ slúžiacich na rozdelenie meraných hodnôt na jednotlivé fázy a „fieldom“ označujúcim identifikátor zariadenia z ktorého záznam pochádza. Fieldami sú „L1“, „L2“, „L3“ a „sensorID“. Toto rozdelenie slúži na efektívnu filtráciu dát z databázového systému.

3.6.2 Uživatelské zobrazenie

Pre reprezentáciu nameraných dát systému bol zhotovený prístupový panel. Prístupový panel je založený nad vizualizačnou platformou Grafana. Grafana je open source platforma slúžiaca na pozorovanie a na vizualizáciu zhromaždených údajov. Ide o natívne cloudové riešenie na zostavenie informačných panelov, naplnených údajmi pochádzajúcimi z databázových systémov. Služba Grafana je v serverovom riešení práce spojená pomocou loopback adresy s databázou Influx DB konkrétne s kontajnerom Measurements. Dátové spojenie je zabezpečené pomocou prístupového tokenu generovaného databázovým systémom. Všetky dotazy spojené so získavaním údajov z databázy sú skriptované jazykom Flux. Flux je funkčný dátový skriptovací jazyk navrhnutý špeciálne pre zjednodušené a rýchle filtrované dotazovanie dát.

Zobrazenie meraných údajov je delené do sekcií:

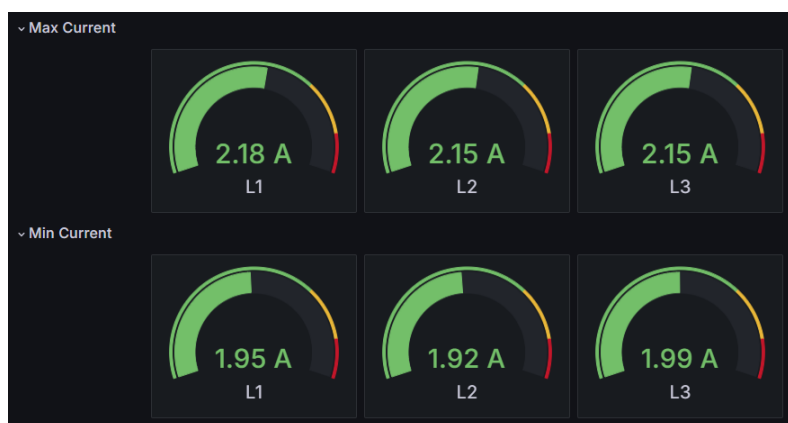
Prvou sekciou, obrázok 3.7, je zobrazenie aktuálne meraných hodnôt. Základom tejto sekcie je ručičkový ukazovateľ znázorňujúci okamžitú hodnotu prúdu na jednotlivých fázach tj. fyzických snímačov nachádzajúcich sa na vedení. Pod každým ukazovateľom okamžitej hodnoty sa nachádza graf zobrazujúci priebeh meraného prúdu za poslednú hodinu. Operátorovi distribučnej siete toto meranie poskytuje informáciu o okamžitom využití vedenia na ktorom je montovaný merací systém.

Druhou sekciou informačného panelu, obrázok 3.8, je zobrazenie minimálnej a maximálnej meranej hodnoty prúdu v priebehu operátorom zvoleného času. Hodnota je zobrazovaná taktiež na ručičkovom ukazovateli. Toto meranie môže operátorovi siete pomôcť v odhaľovaní udalostí ktoré sa na vedení stali.

Posledná sekcia, obrázok 3.9 a 3.10, obsahuje dva grafy. Na hornom grafe je zobrazený priebeh efektívneho prúdu. Časové rozpätie ako tomu je aj v predošlej sekcií si volí operátor a je možné meniť ho na hornej lište. Spodný graf slúži na zobrazenie osciloskopického prebehu prúdu tento graf je vytvorený so samotných kvantovaných vzoriek vstupného signálu snímaču.



Obr. 3.7: Sekcia okamžitého merania zobrazovacieho panelu.

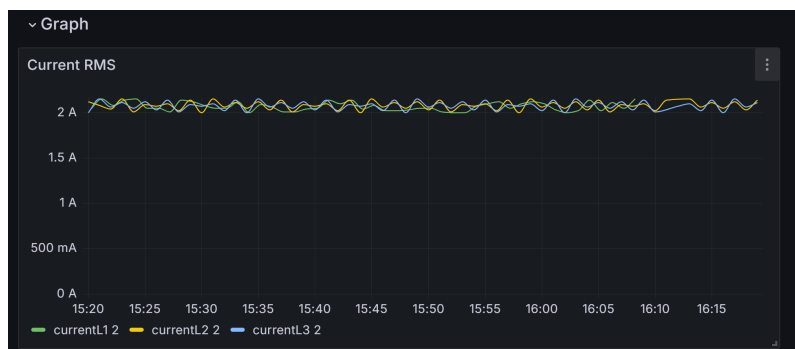


Obr. 3.8: Sekcia min. a max. merania zobrazovacieho panelu.

3.6.3 Inštalácia na server

Celý zobrazovací aj databázový systém je nainštalovaný nad operačným systémom Linux, konkrétne na distribúcii Ubuntu 22.04. Na testovanie systému bola zvolená desktopová varianta bez grafického rozhrania. Pre inštaláciu databázy InfluxDB sme využili repozitár vývojárov, z ktorého sme stiahli poslednú stabilnú verziu databázy. Stiahnutie sme overili pomocou doplnku systému gnupg2 a verejného kľúča. Podobným postupom sme nainštalovali aj webovú aplikáciu na tvorbu grafov, Grafana. O spúšťanie služieb databázy a webovej aplikácie Grafana sa stará nástroj systemctl. Pomocou tohto nástroja sme nakonfigurovali automatické spúšťanie služieb po štarte serveru.

Na zjednodušenie krokov inštalácie bol vytvorený skript, ktorý je súčasťou elektronickej prílohy diplomovej práce.



Obr. 3.9: Grafy meraných priebehov zobrazovacieho panelu.



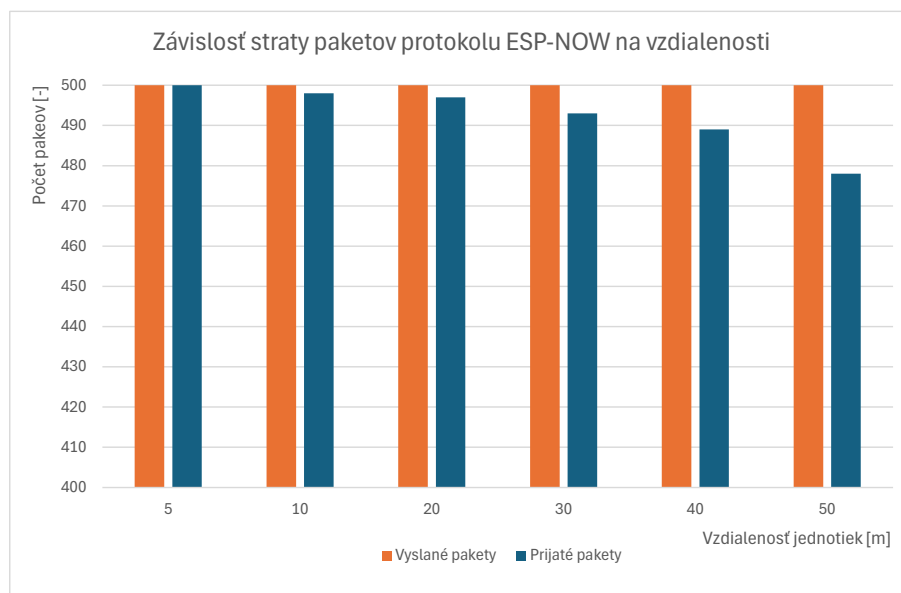
Obr. 3.10: Osciloskopický priebeh signálu.

3.7 Overenie funkčnosti

Po dokončení teoretických východísk, vytvorenia schém zapojení a skonštruovaniu modelu vyvíjaného systému, nasledovala fáza testovania funkčnosti a optimalizácie. Pre účely testovania sme vytvorili dva modely senzoru a lokálnej jednotky. Prvý model bol zhotovený na univerzálnom plošnom spoji, z neho sme následne odvodili úpravy zapojenia obvodov a prvotný firmvér. Zhotovené jednotky prvého modelu sú vizualizované na obrázkoch A.1 a A.2 v prílohe. Po navrhnutí a osadení dosiek plošných spojov, ako je popísané v podkapitole 2.1.5, sa následný vývoj systému a všetky merania odohrávali už na konečnej verzii hardvéru. V priebehu práce sme dostali požiadavku od zadávateľa na optimalizáciu spotreby sensorovej jednotky, čo viedlo k problému s udržiavaním časovej synchronizácie. Tento problém sme vyriešili prídavným 32, kHz oscilátorom. Z dôvodu nedostatku času a potreby výroby ďalšieho modelu sme sa rozhodli neimplementovať obvod generátoru na plošný spoj a pripojiť ho externým spôsobom. Nasledujúce podkapitoly práce prezentujú dosiahnuté výsledky zhotoveného modelu meracieho systému.

3.7.1 Testovanie dosahu

Kľúčovou vlastnosťou meracieho systému je jeho rádiový dosah medzi senzorovými jednotkami a lokálnou jednotkou. Na overenie dosahu komunikačného protokolu ESP-NOW sme vykonali jednoduché meranie. Jeho princípom bolo určiť percentuálny podiel stratených paketov voči doručeným na základe vzdialenosti oboch jednotiek. Pre tento účel sme vytvorili jednoduchý program spočívajúci v tom, že jedna jednotka vysiela 500 po sebe idúcich paketov bez opakovania, pričom každý paket bol naplnený generovanými dátami tak, aby jeho veľkosť bola 200 B. Druhá jednotka tieto pakety prijímala a po úspešnej kontrole dát inkrementovala počítadlo úspešne prijatých dát. Meranie prebiehalo vo vonkajšom prostredí nakoľko je predpoklad, že merací systém bude práve inštalovaný v tomto prostredí. . Vzdialenosť bola určená pomocou zvinovacieho metra s maximálnym dosahom 50 m, pričom sme vykonali merania vo 6 rôznych vzdialenostiach. Výsledky merania sme vizualizovali v grafe 3.11 z ktorého sme dáta preniesli do prehľadnej tabuľky 3.2. . Z grafu sme vyčítali maximálnu stratu paketov vo výške 4,4 %, pričom zohľadňujúc využitie RF antény na plošnom spoji MCU, je tento výsledok považovaný za uspokojivý. Vzhľadom na to, že priemerná výška elektrického stĺpa pre distribučné siete s napätím do 110 kV sa obvykle pohybuje medzi 12 m až 25 m, v závislosti od konkrétnych podmienok a bezpečnostných noriem je hodnota straty paketov na túto vzdialenosť maximálne 1 %. Táto strata je v meracom systéme kompenzovaná znovu-odosielaním dát pri nepotvrdení prijatia.



Obr. 3.11: Meranie závislosti stratených paketov na vzdialenosti.

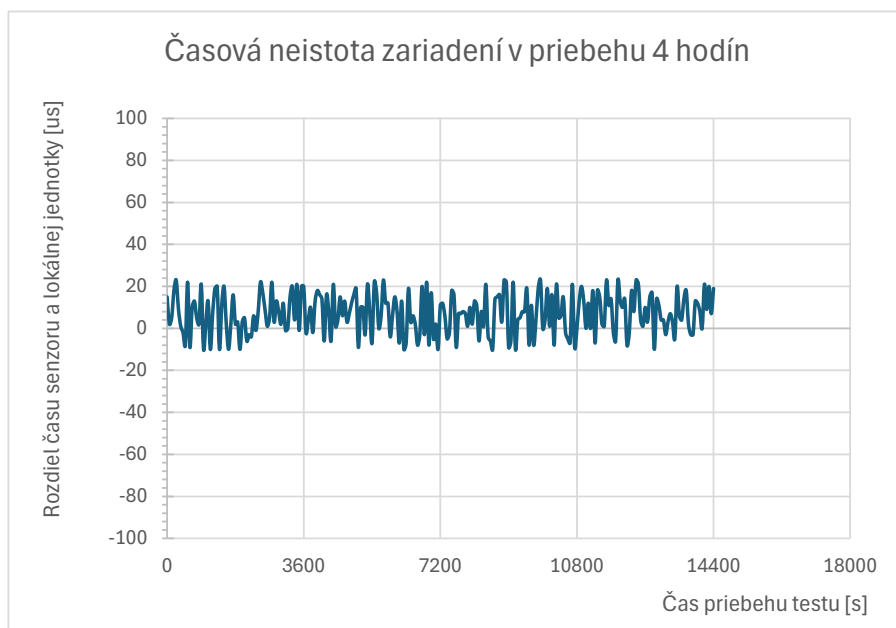
Tab. 3.2: Strata paketov závislá na vzdialenosti jednotiek.

Vzdialenosť [m]	Paketová strata [%]
5	0
10	0,4
20	0,8
30	1,4
40	2,2
50	4,4

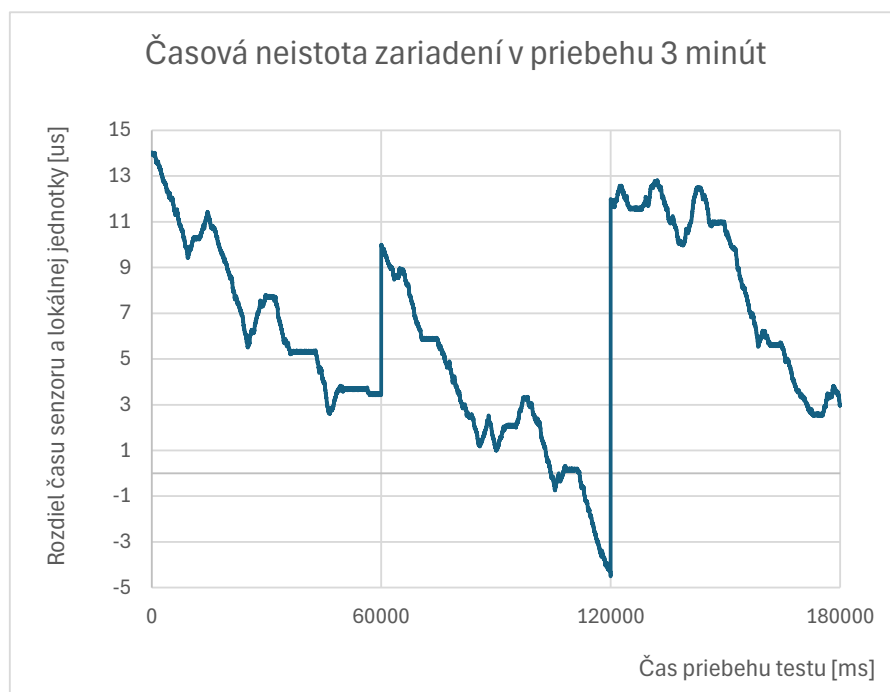
3.7.2 Testovanie časovej synchronizácie

V kapitole 3.1 sme predstavili implementáciu metódy synchronizácie času medzi lokálnou jednotkou a bezdrôtovými snímačmi. Metóda bola vybraná s požiadavkou na stupeň synchronizácie do $100\ \mu\text{s}$, ktorá bude analyzovaná v nasledujúcej časti. Na overenie časovej synchronizácie sme využili pripojenie dvoch zariadení (lokálnej jednotky a snímaču) k PC cez zbernicu UART. Do zariadení bol nahratý zjednodušený firmwér, obsahujúci hlavné časti algoritmu PTP. Testovanie spočívalo v tom že zariadenia odosieli periodicky každých 60 s zbernicou ich aktuálny čas RTC vo formáte UNIX time s presnosťou na μs . Perióda správ protokolu PTP bola 30 s (cyklus synchronizácie 60 s) rovnako ako vo finálnej verzii systému. Zhromaždené dáta obsahovali čas prijatý zo snímacej jednotky, a z neho sme odčítali čas lokálnej jednotky. Výsledkom bol graf 3.12 zobrazujúci stupeň synchronizácie v priebehu cca 4 hodín behu testu zariadenia. Maximálna časová odchýlka, ktorá sa v priebehu merania vyskytla, bola $+23\ \mu\text{s}$, čo spĺňa požiadavku stanovenú v projekte.

Pre zlepšenie vypovedacej schopnosti merania sme mierne upravili podmienky testu. Pri druhom teste sme sa zameriavali na časovú neistotu medzi synchronizačnými periódami PTP protokolu. Celý test trval v tomto prípade 3 minúty čo odpovedá 3 cyklom synchronizácie. Perióda zaznamenávania bola 10 ms a zaznamenával sa len mikrosekundový časový údaj formátu UNIX time, aby sme minimalizovali možné časové odchýlky zbernice medzi PC a zariadením. Výsledné meranie môžeme sledovať na grafe 3.13, kde je viditeľné, že časová neistota sa upravuje po každom synchronizačnom cykle a ku koncu cyklu sa mierne zvyšuje. Napriek tomu zostáva stále v rozsahu $100\ \mu\text{s}$, ktorý bol stanovený v cieľoch práce.



Obr. 3.12: Časová neistota zariadení v priebehu 4 hodín.

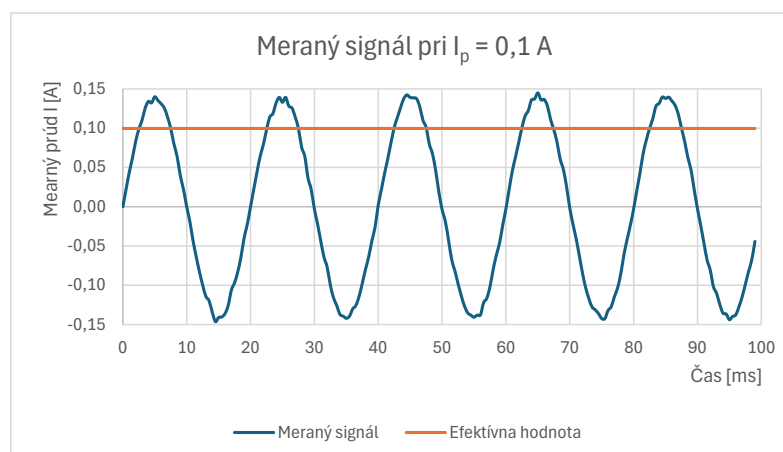


Obr. 3.13: Časová neistota zariadení v priebehu 3 minút.

3.7.3 Testovanie merania a výstupu DAC

Presnosť merania nebola prioritou pri vývoji systému, keďže sa očakáva, že analógová časť sensorového zariadenia bude ešte upravená podľa požiadaviek zadávateľa, ktoré zatiaľ neboli špecifikované. Napriek tomu sme podrobili meranie zariadenia systému testovaniu. Hlavný dôraz sme kládli na kontrolu deformácie meraného signálu a na lineárnu presnosť/odchýlku efektívnej hodnoty meraného prúdu.

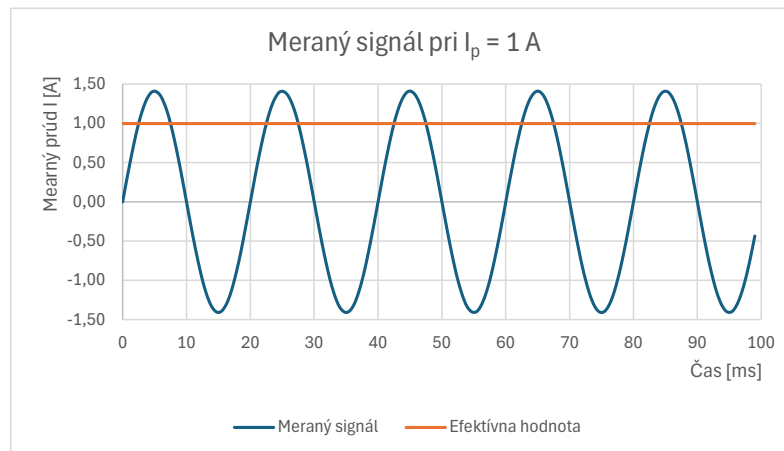
Obrázky 3.14, 3.15, 3.16 zobrazujú priebehy signálu meraného pri 0,1 A , 1 A a 2 A, prijaté lokálnou jednotkou prijímacej dáta zo snímaču. Grafy sú zostavené tak, aby signál začínal s nulovou fázou. Na prvom meranom priebehu možno pozorovať mierne skreslenie signálu. Toto skreslenie je spôsobené prevažne nízkou vstupnou úrovňou signálu 55 mV na vstupe ADC prevodníku, ktorú už nezvláda presne vzorkovať. S ohľadom na tak nízke vstupné napätie nie je nereálne očakávať, že ADC prevodník bude pracovať správne, a preto nebola deformácia signálu kompenzovaná. Merania pri prúde 1 A a 2 A už nevykazovali žiadne odlišnosti oproti vstupnému sínusovému signálu.



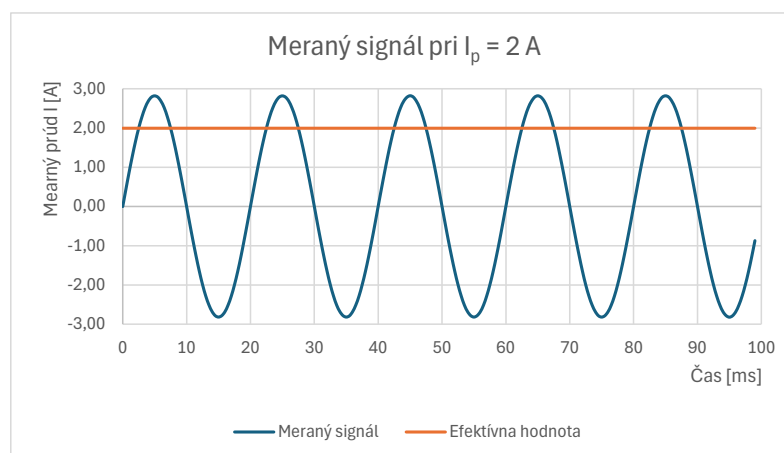
Obr. 3.14: Meraný signál pri $I_p = 0,1 \text{ A}$.

Meranie chyby a linearity bolo rozdelené do šiestich bodov z meraného rozsahu, a jeho výsledky sú uvedené v tabuľke 3.3. Vrchol meraného rozsahu nebol dosiahnutý, pretože zdroj slúžiaci na simuláciu záťaže mal maximálne zaťaženie 2,15 A. Preto je meranie vyhodnotené len do 50 % rozsahu. Údaje o prúde na zdroji boli porovnané s multimetrom Voltcraft VC890, ktorý disponuje presnosťou 0,6 % na prúdovom rozsahu. Hodnota označená ako „Údaj zariadenia“ bola získaná sprimerovaním 5 meraných hodnôt zaznamenaných efektívnej hodnoty prúdu. Chyba meraného údaje bola určená vzorcom 3.3, pričom sme ako konvenčne pravú hodnotu I_k zvolili údaj z multimetra a rozsah meraného prúdu zariadenia sme ponechali na 4 A. Najvyššia zaznamenaná chyba činila 0,7 %. Meranie bolo vyhodnotené ako relatívne presné,

pretože zariadenie nepresiahlo chybu 1 %, čo v rámci merania kvality elektrickej energie spadá do triedy S.



Obr. 3.15: Meraný signál pri $I_p = 1$ A.



Obr. 3.16: Meraný signál pri $I_p = 2$ A.

$$Chyba\ merania = \frac{I_m - I_k}{\frac{I_{max}}{100}} [\%] \quad (3.3)$$

kde I_m je meraná hodnota zariadenia, I_k je konvenčne pravá hodnota, I_{max} je menovitá hodnota rozsahu.

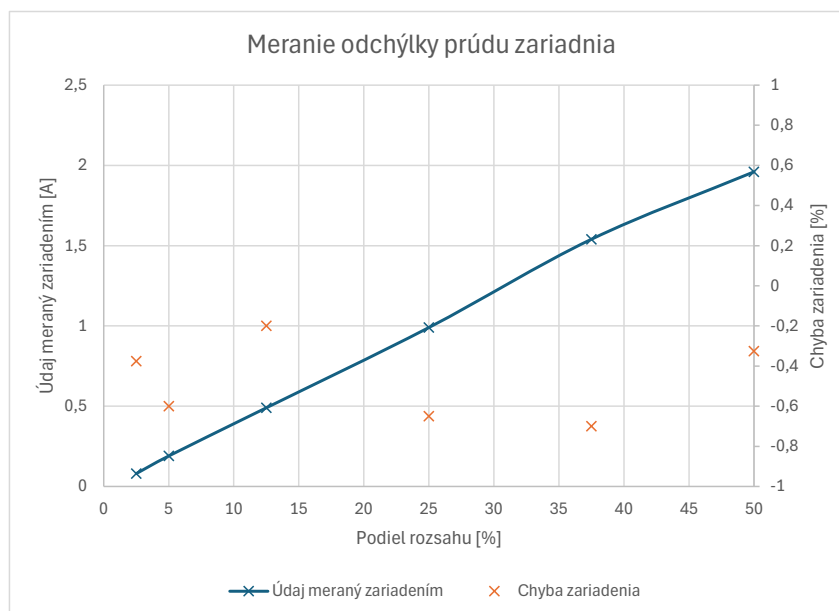
Vynesením hodnôt do grafu 3.17, môžeme sledovať že navzdory mierne skreslenému signálu pri 0,1 A je meranie lineárne. V grafe je taktiež vynesená chyba merania v jednotlivých bodoch na pomocnej osi.

Podľa požiadaviek zadávateľa projektu meracieho systému bola zapracovaná funkcionálna analógového výstupu meraného prúdu v lokálnej jednotke. Pre tvorbu

Tab. 3.3: Výsledky chyby meranej hodnoty zariadenia.

Podiel rozsahu [%]	Zdroj [A]	Kontrola multimetrom [A]	Údaj zariadenia [A]	Chyba merania [%]
2,5	0,1	0,095	0,080	-0,37
5	0,2	0,214	0,190	-0,60
12,5	0,5	0,498	0,490	-0,20
25	1,0	1,016	0,990	-0,65
37,5	1,5	1,568	1,540	-0,70
50	2,0	1,973	1,960	-0,33

signálu jednotka využíva interný DAC prevodník na ktorého výstup je pripojený rekonštrukčný filter typu DP z prahovou frekvenciou 2 kHz. Výstup má slúžiť pre pripojenie existujúcich zariadení vyhodnocujúcich kvalitu siete. Signál pochádzajúci z výstupu DAC je presnou kópiou signálu pochádzajúceho so snímaču s časovým opozdením $200\mu s$. Jeho jednosmerný ofset činí 1,65 V, nakoľko MCU pracuje s logikou 0 - 3,3 V okolo ktorej toto napätie kmitá. Generovaný signál pri prechádzajúcom prúde I_p 0,5 A môžeme sledovať na obrázku 3.18 pochádzajúceho z osciloskopu sledujúceho výstup. Vidíme, že perióda priebehu odpovedá 50 Hz a úroveň signálu po prepočte zodpovedá prechádzajúcejmu prúdu.



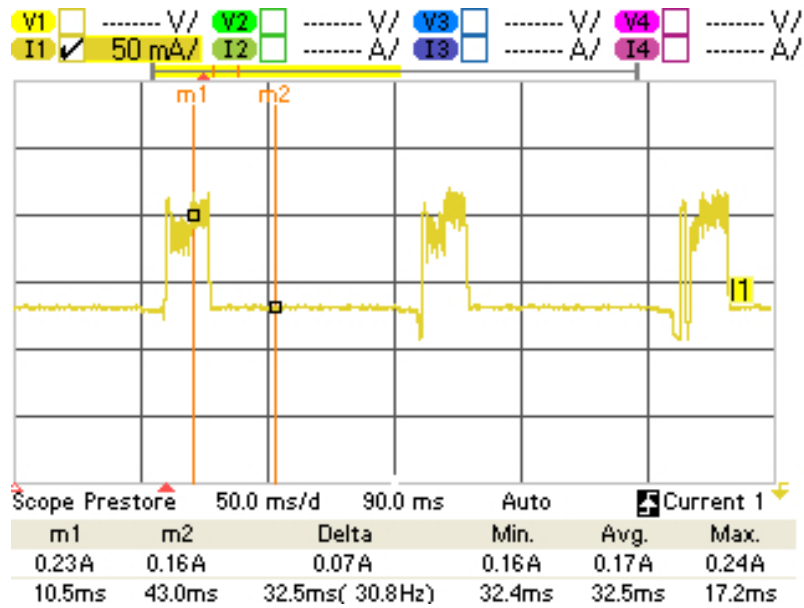
Obr. 3.17: Graf merania chyby a linearity.



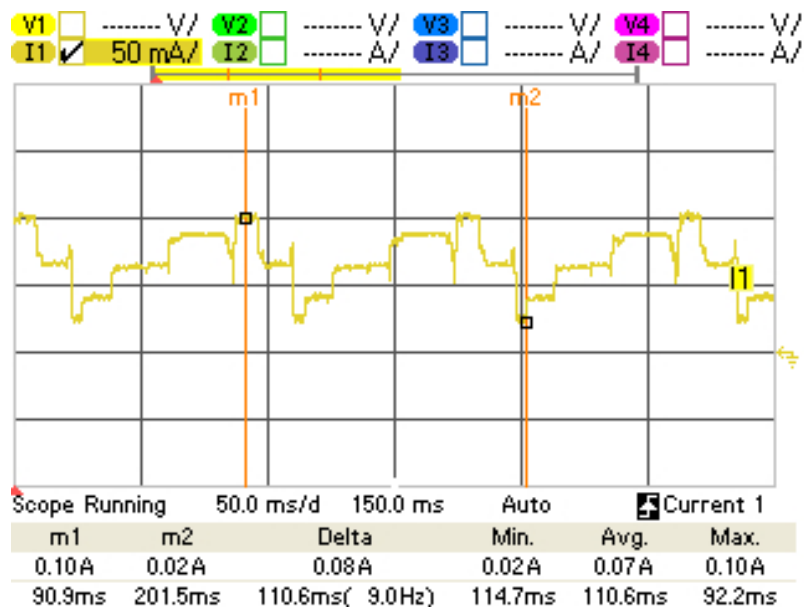
Obr. 3.18: Generovaný priebeh DAC pri I_p 0,5 A.

3.7.4 Testovanie spotreby senzorevej jednotky

potreba senzorevej jednotky nebola predom určená. Počas vývoja práce sa vyskytlo niekoľko problémov, najmä s uvažovaným externým napájaním pomocou energy harvesteru, čo vyvolalo potrebu riešenia tohto problému. Energy harvester má slúžiť ako obvod, ktorý bude napájať senzorevú jednotku prúdom prechádzajúcim vedením. Tento obvod nie je súčasťou riešenia diplomovej práce ale má byť implementovaný do projektu meracieho systému neskôr. S ohľadom na to, že energy harvester, podľa jeho konštruktéra, počíta so zaťažením maximálne 1 W je potrebné aby senzorevá jednotka optimalizovala svoj výkon. Spotreba senzorevej jednotky pred optimalizáciou dosahovala 183 mA, jej priebeh je možné sledovať na grafe 3.19. Optimalizáciu sme dosiahli pomocou uvedenia MCU senzoru do režimu Deep Sleep predstaveného v kapitole 2.1.1, pri spánku zostáva funkčná len snímacia časť zariadenia tvorená ULP koprocesorom. Po naplnení dátového zásobníku ULP koprocesorom sa MCU prebudí zo šetriaceho režimu a vyšle dáta s vyššou energetickou náročnosťou. Napájacia špička pri prebudení zariadenia dosahuje 100 mA. Pred odoslaním dát prechádza zariadenie cez niekoľko energetických úrovní (závislých na využití procesoru). Celá energetická krivka je zobrazená na grafe 3.19. Priemerná spotreba zariadenia pred aj po implementácii šetriaceho režimu je uvedená v tabuľke 3.4.



Obr. 3.19: Spotreba senzornej jednotky pred optimalizáciou.



Obr. 3.20: Spotreba senzornej jednotky po optimalizácii.

Tab. 3.4: Odber senzornej jednotky.

Šetrenie energie	Napájacie napätie [V]	Odber zariadenia [W]
Nie	3,76	0,688
Áno	3,85	0,266

Záver

Cielom diplomovej práce bolo oboznámenie sa s problematikou merania prúdu v energetickej sieti a zostrojenie meracieho systému schopného merania elektrického prúdu bezdrôtovo. Navrhovaný systém bol rozdelený do meracieho a zberného subsystému, pričom tieto subsystémy komunikujú prostredníctvom bezdrôtového komunikačného kanálu protokolom ESP-NOW. Merací subsystém je tvorený snímačmi na každej fáze a spracúva striedavý signál z meracieho transformátora, ktorý prevádza úroveň meraných prúdov do menších spracovateľných hodnôt. Spracovanie prebieha pomocou integrovaného ADC prevodníka na čipe zvoleného mikrokontroléra. Zo snímaných hodnôt je vyhodnotená efektívna hodnota prúdu a je so surovými vzorkami odosielaná cez bezdrôtový komunikačný kanál do zberného subsystému. Zberný subsystém je tvorený lokálnou jednotkou, ktorý konvertuje namerané hodnoty do štandardizovaného výstupného súboru a zabezpečuje synchronizáciu času snímačov tak, aby vzorky signálu boli snímané v rovnakom časovom okamihu. To je nevyhnutné pre ďalšie vyhodnotenie a spracovanie.

Teoretická časť práce je zameraná na analýzu technológií, slúžiacich ku komunikácii medzi senzorom a lokálnou jednotkou. Skúmanie je orientované predovšetkým na bezdrôtové technológie IoT, ktoré sú delené podľa dosahu. Popisuje používané modulácie, prenosové rýchlosti a ich parametre. Podrobne je predstavený komunikačný protokol ESP-NOW, ktorý je využívaný v praktickej časti práce. Neoddeliteľnou súčasťou teoretickej časti je aj zoznámenie sa s princípmi časovej synchronizácie, ktorá je využívaná na synchronizáciu merania prúdov na jednotlivých fázach. Súčasťou teoretickej časti práce je aj predstavenie metód merania prúdu využívaných v energetike.

V úvode praktickej časti sa diplomová práca venuje výberu hardvérových komponentov využitých vo výslednom zariadení. Výber komponentov je rozdelený na funkčné bloky mikroprocesora, periférie snímania prúdu a ukladania dát. Všetky bloky sú napájané pomocou interného záložného zdroja s perspektívou využitia „Energy harvesting“. Ďalšia kapitola praktickej časti venuje dôraz na úpravy a nastavenie komunikačného protokolu. Softvérové riešenie je tiež neoddeliteľnou súčasťou práce a patrí do praktickej časti. V tejto časti sa čitateľ môže oboznámiť s konceptmi programového riešenia firmwéru a užívateľského rozhrania v rámci meracieho systému. Na záver praktickej časti práce riešime dosiahnuté merateľné výsledky zhotoveného modelu.

Na základe vyššie stanovených cieľov a požiadaviek zadávateľa diplomovej práce, môžeme predpokladať, že sa nám cieľ zhotovenia meracieho systému podarilo splniť.

Literatúra

- [1] Jordi Salazar: *Bezdrôtové siete* [online]. 1. vydanie, 2017, Vydalo: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. ISBN 978-1-5090-1701-0. Dostupné z URL:
<https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2009/vo-r_10-06_2009-09.pdf>.
- [2] KEVIN ASHTON: *That 'Internet of Things' Thing* [online]. 2009, [cit. 14. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/7934184>>.
- [3] Mark Harris: *ISM Bands Around the World* [online]. 28. 9. 2021, posledná aktualizácia 25. 6. 2023 [cit. 14. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://resources.altium.com/p/ism-bands-around-world>>.
- [4] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD: *Všeobecné oprávnění č. VOR/10/09.2010-11 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. [online]. Dostupné z URL:
<https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2009/vo-r_10-06_2009-09.pdf>.
- [5] Bluetooth®: *Bluetooth® Wireless Technology* [online]. 2023, [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>>.
- [6] ControlSystem, s.r.o.: *Popis technológie Bluetooth* [online]. [cit. 23. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://www.controlsystem.sk/dodavatelja/schildknecht/ako-funguje-bluetoothr>>.
- [7] Microchip Technology, Inc.: *Introduction to Bluetooth® Low Energy* [online]. 2021, [cit. 23. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-introduction>>.
- [8] Sectron s.r.o.: *Novinky ze sítě LPWAN* [online]. 2020, [cit. 31. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/7934184>>.
- [9] IoT portál: *SIGFOX – princip, struktura, protokol, použití* [online]. Redakčný článok, 29.5.2017, [cit. 6. 11. 2023]. Dostupné z URL:

- <<https://www.iot-portal.cz/2017/05/29/sigfox-princip-struktura/-protokol-pouziti/>>.
- [10] FOSTER, Landon D.: *What Is SIGFOX?* [online]. In: CBT Nuggets [online]. CBT Nuggets, 2022, [cit. 6. 11. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.cbtnuggets.com/blog/technology/networking/what-is-sigfox>>.
- [11] GSMA Association: *Narrowband – Internet of Things (NB-IoT)* [online]. 2017, [cit. 5. 11. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/>>.
- [12] Beyene, Yihew Dagne and Jantti, Riku and Tirkkonen, Olav and Ruttik, Kalle and Iraj, Sassan and Larmo, Anna and Tirronen, Tuomas and Torsner, and Johan: *Data Channel Design and Performance for LTE Narrowband IoT* [online]. in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 26-32, June 2017, DOI: 10.1109/MWC.2017.1600418 Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7955908>>.
- [13] Rogobete, Marius a Mihailescu, Marius I. a Marin, Eugen: *ltra-Wideband Technology in Telematics Security - A short Survey* [online]. 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ECAI52376.2021.9515057. ISBN: 978-1-6654-2534-6. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7934184>>.
- [14] FCC průmyslové systémy s.r.o.: *Základný prehľad technológie WiFi* [online]. Článok spoločnosti, 2023, [cit. 8. 12. 2023].. Dostupné z URL: <<https://www.fccps.cz/zakladni-prehled-o-technologie-wifi>>.
- [15] Dnislam Urazayev, Aida Eduard, Muhammad Ahsan, and Dimitrios Zorbas: *Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW* [online]. 05. 2023, [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/369626626_Indoor_Performance_Evaluation_of_ESP-NOW>.
- [16] Hiertz, Guido R. and Denteneer, Dee and Stibor, Lothar and Zang, Yunpeng and Costa, Xavier Perez and Walke, Bernhard: *The IEEE 802.11 universe* [online]. 2010, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, DOI: 10.1109/MCOM.2010.5394032. ISSN: 1558-1896. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7880951>>.
- [17] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd.: *ESP-NOW* [online]. 2016 - 2023, [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z URL:

- <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html>.
- [18] Zezulka, F.; Hynčica, O.: *Synchronizácia v distribuovaných riadniacich systémoch: Precision Time Protocol(PTP)* [online]. Článok z ústavu automatizácie a meracej techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií VUT v Brně. Dostupné z URL: <https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40557.pdf>.
- [19] EDISON,J.: *IEEE-1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurement and Control Systems -A Tutorial*. In: Proceedings of the Workshop on IEEE 1588, 2005.
- [20] EDISON,J.: *IEEE-1588 Standard Version 2* [online]. -A Tutorial. In: Conference on IEEE 1588 Gaithersburg, MA, October 2006. Dostupné z URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html>.
- [21] Havlíček, M.: *Měření kolem nás* [online]. Časopisu Elektro, číslo 8-9, 2006. Dostupné z URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-kolem-nas-23--17408>>.
- [22] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd.: *ESP32 Technical Reference Manual*. 2023, verzia 5.0.
- [23] Magdy K.: *ČESP32 Sleep Modes & Power Consumption in Each Mode* [online]. [cit. 7.12.2023]. Dostupné z URL: <<https://deepbluembedded.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>>.
- [24] Elektrolab: *História a vývoj pamäťových kariet* [online]. Článok v magazíne, posledná aktualizácia 7.5.2021 [cit. 13.11.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.elektrolab.eu/blog/co-je-prudovy-transformator-a-aky-je-jeho-princip>>.
- [25] Panasonic, SanDisk, Toshiba: *SD Specifications* [online]. Špecifikácia výrobcov SD Group (Panasonic, SanDisk, Toshiba), verzia 2.0, 25.9.2006, [cit. 13.11.2023]. Dostupné z URL: <https://users.ece.utexas.edu/~valvano/EE345M/SD_Physical_Layer_Spec.pdf>.
- [26] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd.: *SD Pull-up Requirements* [online]. 2016 - 2023, [cit. 8.12.2023]. Dostupné z URL: <<https://docs.espressif>>.

com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/
sd_pullup_requirements.html>.

- [27] Elektrolab: *ČO JE PRŮDOVÝ TRANSFORMÁTOR A AKÝ JE JEHO PRINCÍP* [online]. 2020, poslední aktualizace 13.10.2020 [cit. 13.11.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.elektrolab.eu/blog/co-je-prudovy-transformator-a-aky-je-jeho-princip>>.
- [28] YHDC: *Product specification SCT013-030* [online]. Katalógový list, 26.5.2017, [cit. 13.11.2023]. Dostupné z URL: <<http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>>.
- [29] Carrasco D.: *Security on your ESP32 with ESP-Now* [online]. 23.5.2021, [cit. 7.12.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.electrosoftcloud.com/en/security-on-your-esp32-with-esp-now/>>.
- [30] Nair A.: *Úvod do InfluxDB: Databáza časových radov* [online]. 2021, poslední aktualizace 12.3.2021 [cit. 2.5.2024]. Dostupné z URL: <<https://wearecommunity.io/communities/india-java-user-group/articles/891>>.

Zoznam symbolov a skratiek

ADC	analogovo-digitálny prevodník – Analog Digital Converter
AVR	označenie 8-bit mikropočítačov
DAC	digitálno-analógový prevodník – Digital Analog Converter
DB	databáza – Database
DC	jednosmerné napájanie
DPS	doska plošného spoja
EEPROM	elektricky zmazateľná pamäť
<i>I</i>	elektrický prúd
IDE	vývojové prostredie – Integrated Development Environment
LAN	miestna sieť – Local Area Network
LED	luminiscenčná dióda – Light Emitting Diode
LSB	najmenej významný bit – Least Significant Bit
MAC	identifikačné číslo sieťového adaptéra – Media Access Control
MCU	mikrokontrolér
MSB	najvýznamnejší bit – Most Significant Bit
<i>P</i>	elektrický výkon
RMS	efektívna hodnota – Root Mean Square
RF	radiofrekvenčné – Radio Frequency
SPI	sériové periferiálne rozhranie – Serial Peripheral Interface
TCP IP	riadiaci prenosový protokol/protokolu Internet – Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<i>U</i>	elektrické napätie
USB	univerzálna sériová zbernica – Universal Serial Bus
UART	zbernica pre asynchrónny prenos dát – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Zoznam príloh

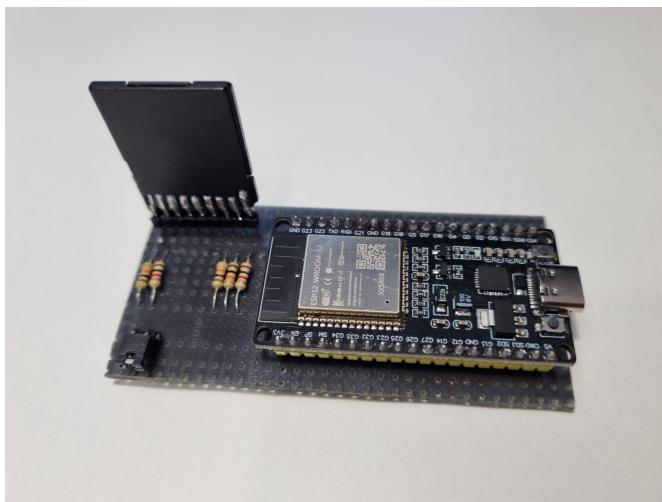
A Zostrojené testovacie prototypy	80
B Model meracieho systému	81
C Obsah elektronickej prílohy	83

A Zostrojené testovacie prototypy

V rámci práce bol zhotovené dva testovacie prototypy zariadení. Prototyp prvej verzie bol zostrojený na nepájivom poli, jeho účelom bolo otestovanie funkčnosti komponentov. Druhý testovací model bol zhotovený na základe zistenia vysokých prechodových odporov medzi plôškami na napájom poli na univerzálny plošný spoj, jeho zhotovenie je možné sledovať na obrázku A.1 a A.2. Osadený je celou vývojovou doskou s čipom ESP32-WROOM32. Jeho napájanie je riešené externým 5 V zdrojom cez USB konektor. Tento prototyp slúžil hlavne na doladenie zapojenia analógovej časti a testovanie skúšobnej verzie firmvéru.



Obr. A.1: Testovací prototyp senzorevej jednotky



Obr. A.2: Testovací prototyp lokálnej jednotky

B Model meracieho systému

Konečný prototyp zariadenia meracieho systému, zobrazený na obrázkoch B.2 a B.3, je vyhotovený na navrhnutých plošných spojoch a osadený do ochranných krabičiek. S ohľadom na rozdielnu montáž zariadení sú ochranné krabičky prispôbolené konkrétnym požiadavkám. Lokálna jednotka je montovaná na DIN lištu, zatiaľ čo senzor je priamo upevnený na vodič vedenia. Osadenie záložného napájacieho akumulátora pod plošným spojom je znázornené na obrázku B.1. Celé miesto upevnenia je ešte ošetrené kaptonovou páskou z dôvodu zabráneniu skratu na článku.



Obr. B.1: Osadenie akumulátora do zariadenia



Obr. B.2: Model senzornej jednotky



Obr. B.3: Model lokálnej jednotky

C Obsah elektronickej prílohy

Táto diplomová práca obsahuje elektronicnú prílohu, ktorá zahŕňa súbory so schematickými zapojeniami a návrhom plošného spoja vytvorenými v programe KiCad 7.0, generované výrobné dáta plošného spoja, firmvér pre lokálnu jednotku a snímač programovaný pomocou doplnku PlatformIO IDE v4.3.3 pre Visual Studio Code. Mechanická časť zahŕňa modely a výrobné súbory pre krabičky zariadení, navrhnuté v programe Autodesk Fusion 360. Poslednou súčasťou je skript na konfiguráciu servera pre operačný systém Linux Ubuntu 22.04.4 LTS.

Všetky tieto súbory sú usporiadané v nasledovnej štruktúre elektronickej prílohy.

```
/.....koreňový adresár priloženého archívu
├── Schéma zapojenia.....
│   ├── Lokálna_jednotka.pdf.....schéma zapojenia lokálnej jednotky
│   ├── Sensorová_jednotka.pdf.....schéma zapojenia senzorickej jednotky
│   └── Zdrojové_súbory_Kicad.....zdrojové súbory schémy a plošného spoju
├── Plošný spoj.....výrobné súbory plošného spoju
├── Firmvér.....
│   ├── ESP_NOW_SENDER_V5.....firmvér sensorovej jednotky
│   └── ESP_NOW_RECIEVER_V5.....firmvér lokálnej jednotky
├── Konštrukcia.....
│   ├── Držiak_snímač.....komponent upevnenia senzoru
│   ├── Krabička_snímač.....krabička senzoru
│   ├── Krabička_lokálna_jednotka.....krabička lokálnej jednotky
│   └── Mechanizmus_pántov.....cvakací mechanizmus dvierok
├── Server.....
│   ├── Konfiguračný_skript.....inštalácia doplnkov serveru
│   └── Influx_API.....konfiguračné api pre InfluxDB
```