

Bakalářská práce



**České
vysoké
učení technické
v Praze**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

System pro pokročilé monitorování stavu zařízení

Ladislav Štefka

**Vedoucí: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D
Studijní program: Kybernetika a Robotika
Květen 2019**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štefka** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **469913**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systém pro pokročilé monitorování stavu zařízení

Název bakalářské práce anglicky:

Advanced Machine Condition Monitoring System

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte a realizujte systém pro monitorování stavu rotačních zařízení pomocí modulu měření teploty a analýzy vibrací a jeho připojení k IoT síti pomocí rozhraní LoRa nebo NB-IoT.
2. Použijte low-power mikrokontroler řady STM32 a vytvořte pro něj software, který bude zajišťovat připojení senzoru teploty a akcelerometru, předzpracování a analýzu signálu, výpočet příznaků a bezdrátový přenos do nadřazeného IoT systému.
3. Zaměřte se na implementaci pokročilejších metod analýzy signálu.
4. Vyhodnoťte funkci pomocí simulátoru rotačních mechanismů.
5. Vytvořte demonstrační aplikaci pro manipulaci se získanými daty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Randall, Robert Bond: Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley & Sons, Ltd. 2011
- [2] firemní literatura Analog Devices, STmicroelectronics, LoRa aliance, ThingsNetwork
- [3] George Vachtsevanos et al.: Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems, 2006 John Wiley & Sons, Inc.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D., katedra měření FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2019/2020

doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Radislavu Šmídovi, Ph.D především za jeho trpělivost, vstřícnost při konzultacích a odborné rady. Dále bych poděkoval panu doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za jeho pomoc a rady s praktickou částí úlohy.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2019

Abstrakt

Tato práce je zaměřená na prediktivní údržbu rotačních zařízení založenou na monitorování vibrací a teploty. Cílem je navrhnout a realizovat komplexní monitorovací systém podle moderních konceptů IIoT, který se od existujících řešení bude odlišuje konfigurovatelností, flexibilitou a především využitím bezdrátové LPWAN komunikační sítě LoRa, což umožní monitorovat rotační zařízení i na místech, kde to dříve nebylo možné nebo bylo příliš nákladné.

Systém je tvořen měřicími jednotkami, jejichž úkolem je sběr dat z akcelerometru a teplotního čidla, předzpracování těchto dat a výpočet různorodých analýz signálu. Dále centrální jednotkou pro řízení komunikace, aplikačním serverem s uživatelským rozhraním pro vizualizaci dat a konfigurování systému, který je napojen na databázi pro ukládání naměřených hodnot.

Klíčová slova: Monitorovací systém, Prediktivní údržba, Vibrační analýza, LoRa, IIoT, Raspberry Pi, Node-RED, STM32, Digitální zpracování signálu

Vedoucí: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D

Abstract

This thesis is focused on predictive maintenance based on vibration and temperature monitoring. The aim is to design and implement complex self-sufficient monitoring system according to modern concepts of IIoT and fill the gap in the market due to its configurability, flexibility and the usage of wireless LPWAN network LoRa for communication that would result in the possibility of monitoring rotating machines also in places where it was previously impossible or too expensive. The system consists of measuring units that serve the purpose of collecting data from accelerometer and digital thermometer. They preprocess data and compute a variety of signal analysis. Then a central unit which is in charge of controlling the communication, application server with a graphical user interface for displaying measured and computed data and database for storing them.

Keywords: Monitoring system, Predictive maintenance, Vibration analysis, LoRa, IIoT, Raspberry Pi, Node-RED, STM32, Digital signal processing

Title translation: Advanced Machine Condition Monitoring System

Obsah

1 Úvod	1		
1.1 Diagnostika stavu rotačních zařízení	2		
1.2 Monitorování zařízení v rámci IIoT	2		
1.3 LPWAN a vibrační analýza	3		
2 Stávající řešení a přínos práce	5		
2.1 Situace na trhu	5		
2.1.1 ABB WiMon Condition Monitoring System	5		
2.1.2 IFM VSExxx	6		
2.1.3 Fluke 3561 FC Vibration Sensors	7		
2.1.4 Flexs C2 Wireless Condition Analyzer	8		
2.2 Cíl práce	9		
3 Využití LPWAN sítí v IIoT	11		
3.1 Drátové vs bezdrátové sítě v průmyslu	11		
3.2 LPWAN mezi bezdrátovými IIoT sítěmi	12		
3.3 Komunikační řetězec LPWAN sítě	13		
3.4 LoRa™	13		
3.5 LoRa jako použitá LPWAN síť	14		
4 Vibrační signály a jejich digitální zpracování	17		
4.1 Poruchy indukčních motorů	17		
4.2 Snímání vibračního signálu	19		
4.3 Techniky zpracování signálu	19		
4.3.1 Techniky pracující se signálem v časové oblasti	20		
4.3.2 Techniky pracující se signálem ve frekvenční oblasti	23		
4.4 Určení převodní konstanty	24		
5 HW Design	27		
5.1 Měřicí jednotka (LoRa Node)	27		
5.1.1 Výběr komponent	27		
5.1.2 Celkový design	32		
5.1.3 Druhá verze	32		
5.2 Řídicí jednotka (LoRa Gateway)	34		
5.2.1 Výběr komponent	34		
6 Softwarová implementace	39		
6.1 Architektura a chování celého systému	39		
6.1.1 Komunikační řetězec	39		
6.1.2 Rádiový komunikační protokol	41		
6.1.3 Konfigurace	42		
6.2 Měřicí jednotka (LoRa Node)	42		
6.2.1 Použité softwarové nástroje	42		
6.2.2 Nastavení periférií a vzorkování	43		
6.2.3 Měření a odeslání rádiového paketu Statusinfo	44		
6.3 Řídicí jednotka (LoRa Gateway)	45		
6.3.1 Použité softwarové nástroje	45		
6.3.2 Struktura aplikace – vícevláknový přístup	45		
6.3.3 Řízení přístupu k rádiovému rozhraní	46		
6.4 Aplikační IoT server a databáze	47		
6.4.1 Použité softwarové nástroje	47		

6.4.2	Komunikace s řídicí jednotkou	47
6.4.3	Komunikace s aplikacemi třetích stran – REST API	48
6.4.4	Datový model	49
6.4.5	Uživatelské rozhraní	49
7	Testování systému	53
7.1	První experiment – nevyváženost osy	53
7.1.1	Výsledky	54
7.2	Druhý experiment – přítomnost trhliny ve vnějším kroužku ložiska	55
7.2.1	Výsledky	55
8	Závěr	57
8.1	Budoucí práce	58
A	Přiložené obrázky, schémata, grafy	59
B	Seznam zkratk	63
C	Literatura	65
D	CD	69

Obrázky

1.1 Pracovník kontrolující stav motoru. Převzato z [3].	2	4.5 Typické zdroje vibrací – hřídel, převodovka, turbína a ložiska. Převzato z [32].	19
2.1 Upevnění senzoru ABB WiMon k motoru. Převzato z [1].	6	4.6 Časový průběh krest faktoru vzhledem ke změnám efektivní a maximální hodnoty napětí. Převzato z [21].	20
2.2 Jednotka VSE002 pro připojení 4 akcelerometrů. Převzato z [12].	7	4.7 Oříznutí signálu pro výpočet kurtosis ratio. Převzato z [31].	21
2.3 Upevnění akcelerometru VSE002 k motoru. Převzato z [12].	7	4.8 Grafické znázornění technik využívajících komparační napěťovou úroveň. Převzato z [10].	22
2.4 Brána a monitorovací jednotky Fluke. Převzato z [8].	8	4.9 Algoritmus pro vyhledávání extrémů amplitudového spektra.	23
2.5 Upevnění Fluke senzoru k motoru. Převzato z [8].	8	4.10 Přípravek NEXUS. Převzato z [5].	24
2.6 FlexSCADA Condition Analyzer. Převzato z [7].	9	4.11 Výpočet převodní konstanty v laboratoři.	25
3.1 Rozdělení komunikačních technologií v průmyslu v roce 2019. Převzato z [14].	12	5.1 Blokový diagram MCU STM32L072xx. Převzato z [27].	28
3.2 Komunikační řetězec LPWAN sítí. Převzato z [15].	13	5.3 Akcelerometr ADXL1002.	30
3.3 LoRa modulace – porovnání strmosti rozmítání SF 7-12. Převzato z [9].	14	5.4 Teplotní senzor TMP75.	31
3.4 Komunikace pod úrovní hladiny šumu. Převzato z [16].	15	5.5 První verze měřicí jednotky.	33
3.5 Oficiální LoRa brána od firmy Multitech využívající čipy SX13xx. Převzato z [17].	15	5.6 Druhá verze měřicí jednotky.	33
4.1 Příčiny poruch indukčních motorů. Převzato z [32].	17	5.7 Vybavení Raspberry Pi 3 model B. Převzato z [22].	34
4.2 Příklady poškození ložisek	18	5.8 Zjednodušený blokový diagram RFM95W.	35
4.4 Výhody analýzy vibrací. Převzato z [32].	18	5.9 Centrální jednotka s připojeným dotykovým displejem.	35
		5.10 První verze centrální jednotky.	36
		5.11 Druhá verze centrální jednotky.	37
		5.12 Schéma zapojení RFM95W do Raspberry Pi.	37

6.1 Vizualizace chování celého systému. Hexadecimální čísla označují parametr <i>CMD</i>	41	A.1 Schéma zapojení monitorovací jednotky.	59
6.2 Hierarchie SW nástrojů dodaných firmou ST. Převzato z [26].	43	A.2 Node-RED flowchartový program pro obsluhu grafů.	60
6.3 Struktura rádiového paketu Status Info.	44	A.3 Node-RED flowchartový program pro obsluhu konfigurace.	61
6.4 Hlavní smyčka obsluhující LoRa modul.	46	A.4 Přehled rádiových paketů použitých v aplikaci.	62
6.5 Program pro obsluhu UDP socketu serveru.	48		
6.6 Seznam URL adres namapované na údaje v databázi.	48		
6.7 Program pro obsluhu RESTového serveru.	49		
6.8 Ukázka SQL query pro výběr konfigurace příslušné jednotky z databáze.	49		
6.9 UML diagram datového modelu aplikace.	50		
6.10 První panel uživatelského rozhraní pro nahrání konfigurace.	51		
6.11 Druhý panel uživatelského rozhraní.	52		
7.1 Rotační zařízení včetně navržené měřicí jednotky.	53		
7.2 První experiment – časový průběh RMS, krest faktoru a kurtosis ratio.	54		
7.3 První experiment – amplitudová spektra.	54		
7.5 Druhý experiment – amplitudová spektra.	55		
7.7 Druhý experiment – časové průběhy.	56		

Tabulky

5.1 Proudový odběr pro jednotlivé režimy čipu a vybrané vysílací výkony.	30
6.1 Nejvýznamnější konfigurovatelná nastavení.	42
6.2 Základní TxRx nastavení LoRa modulu.	43



Kapitola 1

Úvod

Funkčnost a spolehlivost technických zařízení se výrazně podepisuje na provozních nákladech a bezpečnosti moderních systémů v průmyslu po celou dobu jejich fungování. Za pomoci diagnostiky stavu zařízení a následné údržby je cílem každé firmy minimalizovat ztráty a rozsah škod způsobených jejich poruchami nebo úplným selháním. Tato diagnostika stavu a údržba zařízení je prováděna všude kolem nás, ve všech technologických oblastech, od průmyslových zařízení, strojních a stavebních přístrojů, letecké techniky až po biotechnologická zařízení. . .

Na otázku, jak efektivně vyřešit poruchy nejrůznějších strojů, existuje jednoduchá odpověď – předejít jejím vznikům. Tato myšlenka nese filosofii konceptu údržby podle technického stavu (anglicky Condition Based Maintenance, dále jen jako CBM) a prediktivní údržby (Predictive Maintenance), které jsou jedním ze základních stavebních kamenů moderní diagnostiky zařízení v průmyslu.

Preventivní predeterminovaná údržba s pravidelnými kontrolami a diagnostikou stavu zařízení (anglicky Time Based Maintenance, dále jen TBM) byla po dlouhou dobu v minulosti nejspolehlivější metodou, jak předejít poruše stroje. V dnešní době, kdy je ale kladen důraz na maximální efektivitu, nese tento koncept údržby mnohá úskalí. Pravidelné kontroly zvyšují finanční náklady na provoz, mrhají jak lidskými tak materiálními zdroji, často musí kvůli nim být pozastavena výroba a navíc TBM zcela selhává při náhlých poruchách [13].

Naproti tomu CBM díky mnoha moderním technologiím dnešní doby, které umožňují monitorovat a diagnostikovat stav zařízení v reálném čase, dokáže předvídat poruchu ještě před tím, než k ní dojde, a rozhoduje tak o provedení údržby v tu chvíli, kdy jí je opravdu třeba. Tento koncept je tedy proto v mnoha aplikacích výhodnější, přináší časové, pracovní a materiálové úspory a je velice vhodný zejména pro zařízení, jejichž selhání má fatální následky [13].

1.1 Diagnostika stavu rotačních zařízení

K selhání motorů může dojít mnoha způsoby. Fakta ale ukazují, že 40 až 90 % poruch je zapříčiněno defektem ložisek [21] a tyto poruchy navíc často způsobují selhání celého motoru. Monitorování jejich stavu se tedy stává důležitým úkolem a nejčastěji se k němu používá vibrační analýza a měření teploty. Tyto veličiny nejlépe reflektují stav ložisek – jejich mechanické namáhání, opotřebení materiálů či vznikající trhliny. Z vlastností vibračního signálu lze také identifikovat příznaky přicházejících poruch.

Poruchami motorů a analýzou signálu se dále zabývá kapitola 4.1 a 4.3.



Obrázek 1.1: Pracovník kontrolující stav motoru. Převzato z [3].

1.2 Monitorování zařízení v rámci IIoT

Internet věcí (anglicky Internet of Things, dále IoT) je jedním z fenoménů dnešního technologického světa. Pro mnohé se ale tento pojem stal symbolem své pouze jedné větve – spotřebitelského internetu věcí, který je z popularizačního hlediska zajímavější, zaměřen na chytrá města a domácnosti.

Stejný, ne-li vyšší význam, ale nese Průmyslový internet věcí (anglicky Industrial Internet of Things dále IIoT), často zaměňovaný s pojmem Průmysl 4.0. IIoT v první řadě poskytuje lepší přehled o aktivitách v průmyslové výrobě a to prostřednictvím monitorujících senzorů, konektivity a cloud computingu. Díky zpětné vazbě získané z datové analýzy umožňuje transformovat a především optimalizovat výrobní operace, což zvyšuje zejména produktivitu, efektivitu a náklady [25].

IIoT je tedy klíčovým faktorem umožňující realizovat moderní prediktivní údržbu a CBM.

1.3 LPWAN a vibrační analýza

Bezdrátový IIoT představuje další větev Průmyslového Internetu věcí. Bezdrátové komunikační sítě se ale obzvláště v průmyslovém prostředí potýkají s řadou úskalí jako je například dovolená šířka pásma, EMC, spolehlivost komunikace a výdrž baterie. Většina dřívějších řídicích a monitorovacích systémů ve výrobních halách využívala proto pro komunikaci již dobře dostupná rozhraní a protokoly jako průmyslový Ethernet, Fieldbus nebo HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol).

V mnoha případech je ale použití drátových technologií příliš problematické. Konkrétně pro vibrační analýzu je třeba také uvažovat rotační zařízení pracující na obtížně dostupných místech, například v malých vodních elektrárnách, tunelech nebo na rozlehlých větrných elektrárnách. Funkčnost těchto zařízení ale bývá stěžejní, a proto je třeba je pravidelně monitorovat. Vytvoření drátové sítě by zde ovšem bylo velmi nákladné či úplně nemožné. V těchto případech je tedy nasnadě použít bezdrátové komunikační sítě LPWAN (Low Power Wide Area Network) jako například LoRa, SigFox či NB-IoT, jejichž dlouhý dosah, jednoduchá instalace a energetická nenáročnost představují hlavní argumenty jejich upřednostnění před ostatními komunikačními technologiemi. Postavením LPWAN sítí v rámci IIoT se dále zabývá kapitola 3.2.

Kapitola 2

Stávající řešení a přínos práce

2.1 Situace na trhu

V současné době se již existujících systémů pro monitorování vibrací na trhu objevuje hned několik. Obecně se od sebe liší především oblastí použití, komplexností, přesností monitorování a hlavně konektivitou. Rozdílné požadavky zákazníků poté rozhodují o konkrétním výběru. Ačkoliv obecnější informace a statistiky o rozložení trhu se mi nalézt nepodařily, v této kapitole bych představil a porovnal několik nejmodernějších existujících řešení.

2.1.1 ABB WiMon Condition Monitoring System

ABB je švédsko-švýcarská firma, jeden z největších technologických konglomerátů na světě (114. místo v žebříčku Forbes), zabývající se robotizací a digitalizací průmyslu [1]. Produkty ABB jsou z dnešního pohledu na Internet věcí poměrně těžkopádné. ABB využívá pro komunikaci WirelessHART, technologii, která není dobře integrovatelná do moderních IoT systémů, a systém je navíc zcela uzavřený, vhodný hlavně jako rozšíření do již existující průmyslové diagnostické infrastruktury využívající systémy ABB. Navíc i přes dobré diagnostické možnosti v softwaru WiMon Data Manager a nastavitelná upozornění pro monitorované veličiny, postrádá monitorování větší možnosti konfigurace jako nastavení vzorkovací frekvence.

- Konektivita: WirelessHART, mesh topologie
- Konfigurovatelnost: pevné parametry monitorování, univerzální možnosti zpracování dat
- Software: zpracování dat je integrováno do uzavřeného ABB systému
- Přesnost: $\pm 25 g$, šířka pásma 1 kHz

- Napájení: bateriové zařízení s výdrží 3 roky
- Cena: neznámá, ale vysoká



Obrázek 2.1: Upevnění senzoru ABB WiMon k motoru. Převzato z [1].

■ 2.1.2 IFM VSExxx

IFM je německá firma se zaměřením na sensoriku v průmyslu. Přidaná hodnota produktů této společnosti tkví zejména v široké nabídce nabízených řešení. Koncový zákazník si může podle svých požadavků sestavit celý monitorovací systém. IFM nabízí různé kvalitní akcelerometry, vzorkovací obvody a monitorovací jednotky [12]. Na rozdíl od firmy ABB lze prostřednictvím dodaného softwaru VES004 konfigurovat parametry monitorování, a docílit tak různorodějších analýz. Systém nevyužívá brány, k jednotlivým jednotkám lze ale připojit více akcelerometrů. Zásadní odlišností od ostatních porovnávaných systémů je drátová komunikační infrastruktura, jejíž nasazení se příliš nehodí do již fungujících průmyslových prostředí (více v kapitole 3.1).

- Konektivita: Ethernet
- Konfigurovatelnost: nastavitelné jsou standardní parametry monitorování
- Software: desktopová aplikace bez propojení s cloudem
- Přesnost: rozdílná podle konkrétního řešení
- Napájení: síťové
- Cena: rozdílná podle konkrétního řešení



Obrázek 2.2: Jednotka VSE002 pro připojení 4 akcelerometrů. Převzato z [12].



Obrázek 2.3: Upevnění akcelerometru VSE002 k motoru. Převzato z [12].

■ 2.1.3 Fluke 3561 FC Vibration Sensors

Fluke je americká společnost zaměřující se na elektronické monitorovací a testovací systémy. Jejich produkty si na rozdíl od ABB a IFM zakládají na inovaci, a proto Fluke přináší z hlediska filosofie IIoT mnohem modernější monitorovací systém, kde vlastní diagnostika probíhá za pomoci webového klienta a mobilní aplikace. Za zmínku stojí také velmi elegantně vyřešený design, velikost a možnosti upevnění senzorů k motorům [8].

- Konektivita: Low power Bluetooth
- Konfigurovatelnost: pevná vzorkovací frekvence, odesílání informací do brány
- Software: zpracování dat prostřednictvím Fluke Connect App
- Přesnost: $\pm 32 g$, šířka pásma 1 kHz

2. Stávající řešení a přínos práce

- Napájení: bateriové zařízení s výdrží 5 let
- Cena: zhruba 100 000 Kč za 4 senzory, 1 bránu a software



Obrázek 2.4: Brána a monitorovací jednotky Fluke. Převzato z [8].



Obrázek 2.5: Upevnění Fluke senzoru k motoru. Převzato z [8].

■ 2.1.4 Flexs C2 Wireless Condition Analyzer

Společnost FlexSCADA je kanadská společnost zabývající se SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systémy, tedy sběrem dat a řízením. Produkty této společnosti jsou nejflexibilnějšími, které se mi podařilo nalézt. Umožňuje především široké možnosti konfigurace monitorování (nastavení vzorkovací frekvence, počet vzorků u FFT, interval odesílání dat...). Navíc přichází se zajímavým řešením, kdy po stisknutí tlačítka vytvoří zařízení hotspot, ke kterému se lze přihlásit a pozorovat současné trendy monitorování. Krom toho ale odesílá data i do cloudu ke specifitějším analýzám [7]. Problémem jsou pouze vysoké pořizovací náklady v případě nasazení systému do velkých továren. Ačkoliv cena jednoho monitorovacího zařízení je poměrně přívětivá a najednou lze díky čtyřem akcelerometrům připojit více motorů, s narůstajícím počtem monitorovaných zařízení cena rychle roste.

- Konektivita: WiFi, LTE
- Konfigurovatelnost: široká možnost konfigurace včetně parametrů monitorování
- Software: webový klient a aplikace + možnost odesílání dat a zpracování v cloudu
- Přesnost: nespecifikováno
- Napájení: sběr energie z elektromagnetického vyzařování, externí síťové napájení
- Cena: zhruba 25 000 Kč za jednotku pro maximálně čtyři motory.



Obrázek 2.6: FlexSCADA Condition Analyzer. Převzato z [7].

2.2 Cíl práce

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat komplexní systém pro monitorování stavu rotačních zařízení pomocí pokročilé analýzy vibrací a teploty. Snahou bylo odlišit se od existujících řešení, vyplnit mezeru na trhu a postavit systém na základech moderních konceptů IIoT.

Konfigurovatelnost

Sytém se bude odlišovat od existujících zařízení na trhu zejména svoji konfigurovatelností. Uživatel bude moci pohodlně ve webovém prostředí měnit parametry monitorovací jednotky, díky čemuž bude schopen přizpůsobit zpracování monitorovaných veličin, a dosáhnout tak různorodějších a pokročilejších analýz.

Kapitola 3

Využití LPWAN sítí v IIoT

Současným trendem v průmyslu je vysoký nárůst počtu připojených zařízení – v roce 2019 se očekává navýšení o 10 % [14]. S tímto faktorem je spojena především snaha o chytřejší monitorování výrobních procesů a sběr dat. Z analýzy firmy HMS Network lze proto jasně vidět, že dnešní tendencí v průmyslu je přechod na komunikační technologie umožňující snadné propojení průmyslových systémů s IIoT aplikacemi jako jsou EtherNet/IP a bezdrátové technologie jako WiFi, Bluetooth nebo LPWAN [14].

Připojení velkého množství senzorů do již existujících průmyslových hal představuje jeden z hlavních problémů, se kterým se musejí nové komunikační sítě vypořádat.

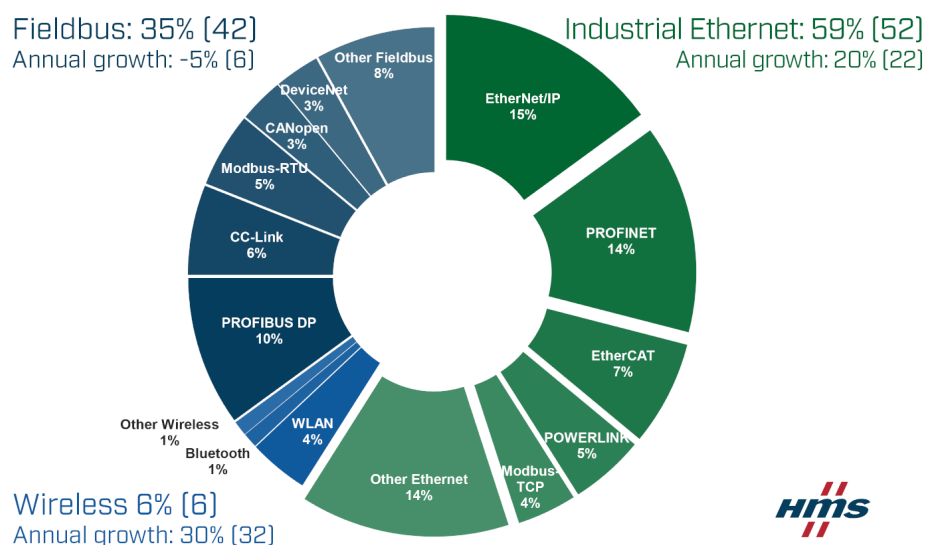
3.1 Drátové vs bezdrátové sítě v průmyslu

V posledním roce zaznamenaly bezdrátové sítě nejvyšší nárůst (o 30 %) ze všech průmyslových komunikačních technologií [14], avšak zastoupení drátových technologií jako je Industrial Ethernet (EtherNet/IP, Ethernet Powerlink, EtherCat, PROFINET) nebo Fieldbus stále představuje většinový podíl na trhu.

Nasazení bezdrátových technologií ovšem nemá za cíl zcela nahradit komunikaci drátovou. Pro průmyslovou automatizaci, řídicí aplikace a real-time procesy s vysokými nároky na spolehlivost jako je řízení výrobních linek, budou i nadále upřednostňovány spolehlivé a roky odzkoušené protokoly jako PROFINET či Profibus.

Pro monitorovací aplikace v rámci CBM, jež vyžadují připojení velkého množství senzorů, jsou ale tyto technologie příliš těžkopádné a drahé. Hlavní problém také představuje fakt, že v mnoha případech není možné zasahovat do již fungujících komunikačních infrastruktur, odstavovat výrobu, a proto převládá snaha novými senzory pouze doplnit stávající řešení [4].

Jsou to tedy především jednoduchost instalace, dosah a spotřeba, proč se



Obrázek 3.1: Rozdělení komunikačních technologií v průmyslu v roce 2019. Převzato z [14].

v posledních letech mohutně využívají ve výrobních prostředích bezdrátové sítě.

3.2 LPWAN mezi bezdrátovými IloT sítěmi

LPWAN (Low Power Wide Area Network) je rodina bezdrátových sítí určená pro vysoký dosah, nízký datový tok a nízkou energetickou spotřebu, a zejména tak vhodná pro bateriová zařízení. LPWAN technologie také využívají k připojení zařízení menší šířku frekvenčního pásma, než je obvyklé u běžně využívaných zařízení u mobilních sítí [4].

Hlavními a prvotními zástupci LPWAN sítí jsou LoRa a SigFox, které jsou provozovány v bezlicenčních ISM pásmech na kmitočtech 863-870 MHz v Evropě a 902-928 MHz v USA [30].

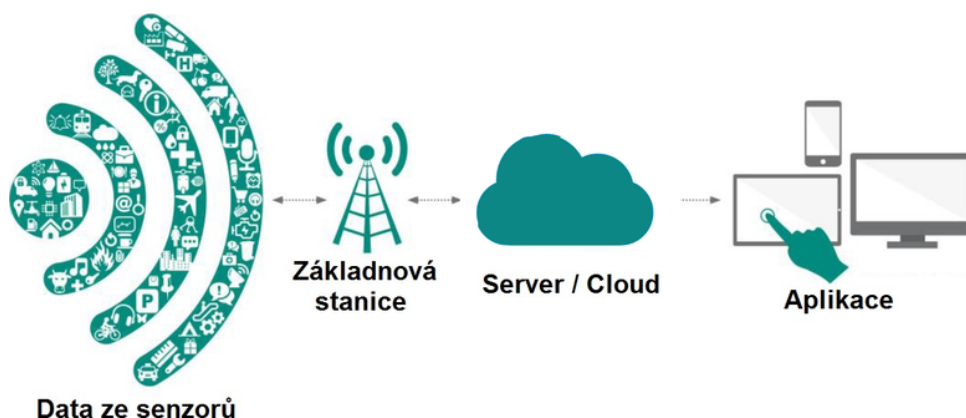
Dále síť NB-IoT fungující v licencovaných pásmech vlastněných mobilními operátory, kterou proto lze provozovat na již existující mobilní komunikační infrastruktuře pouhou softwarovou úpravou, kdy se vysílacím stanicím vyhradí speciální část pásma. Na rozdíl od sítí Sigfox a LoRa tedy není nutné instalovat žádné dodatečné vysílače [15].

LPWAN sítě řeší mnoho problémů, se kterými se potýkají sítě krátkého dosahu (WiFi, Bluetooth...) a celulární mobilní sítě (GSM, GPRS, LTE...). Umožňují bezdrátové připojení senzorů a monitorování i na rozlehlých plochách s velkými vzdálenostmi (stavební plochy, větrné elektrárny) nebo obtížně dostupných místech (malé vodní elektrárny [3], kryty, tunely), kde nasazení

monitorovacích systémů nebylo dříve možné nebo bylo velmi finančně nákladné.

Ve srovnání s WiFi a Bluetooth je jejich hlavní výhodou především zmíněný vyšší dosah, propustnost ve vnitřních prostorách (tzv. building penetration). U sítě LoRa pak také díky komunikaci v rozprostřeném spektru odolnost vůči úzkopásmovému elektromagnetickému rušení, které představuje problém nejen díky přeplnění WiFi kanálů, ale také kvůli průmyslovým strojům jako jsou vysokozdvizné vozíky, jež by často ani neprošly kontrolami EMC. Hlavním benefitem na rozdíl od mobilních sítí je zejména výdrž baterie. Často se také může stát, že rádiový signál je částečně odstíněn krytem výrobní haly, což lze u LPWAN sítí snadněji vyřešit nasazením brány do vnitřku budovy než u mobilních sítí.

3.3 Komunikační řetězec LPWAN sítě



Obrázek 3.2: Komunikační řetězec LPWAN sítě. Převzato z [15].

LPWAN síť je tvořená z koncových uzlů využívajících určitý komunikační protokol a odesílajících data do základových stanic (bran), jež data dále přeposílají na vzdálený server, na který jsou napojené aplikace koncových zákazníků.

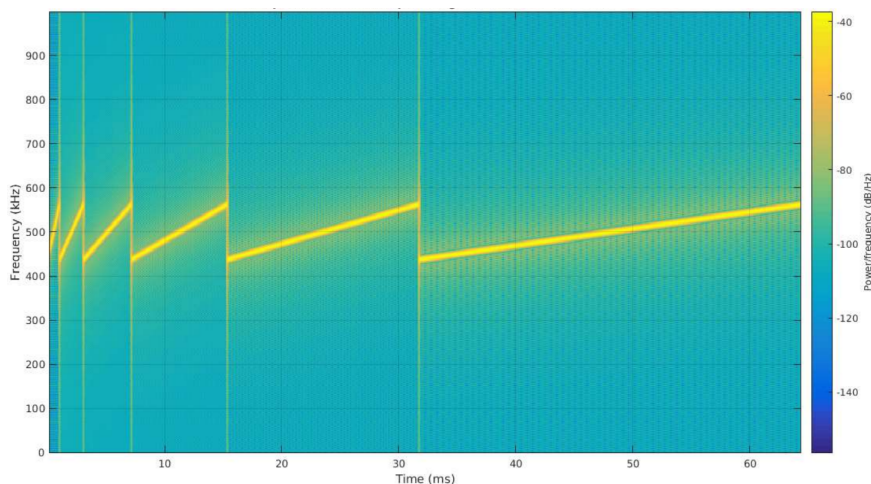
Uvedené příklady LPWAN sítí (LoRa, Sigfox, NB-IoT) využívají hvězdicovitou topologii [15], kde jednotlivé uzly komunikují vždy pouze s branami, což usnadňuje řízení chodu sítě (není třeba používat složité směrovací protokoly) a usnadňuje její rozšiřování. Středem sítě je poté řídicí server, který zajišťuje směrování paketů danému adresátovi.

3.4 LoRa™

LoRa, představující zkratku pro slova Long Range, je jeden z hlavních zástupců LPWAN sítí a současně označení pro fyzickou (PHY) vrstvu této

proprietární technologie vlastněné francouzskou firmou Semtech. Linková (MAC) vrstva poté nese označení LoRaWAN.

Fyzická vrstva sítě LoRa využívá modulaci s rozprostřeným spektrem, konkrétně variantu modulace CSS (Chirp Spread Spectrum), kdy je přenášená informace modulována na nosný signál, který je lineárně rozmítán od vrchní hranice pásma (bandwidth) po jeho spodní hranici. Strmost tohoto rozmítání určuje parametr označovaný jako Spreading Factor (česky činitel rozprostření, dále pouze jako SF), který tak ovlivňuje rychlost komunikace [24].



Obrázek 3.3: LoRa modulace – porovnání strmosti rozmítání SF 7-12. Převzato z [9].

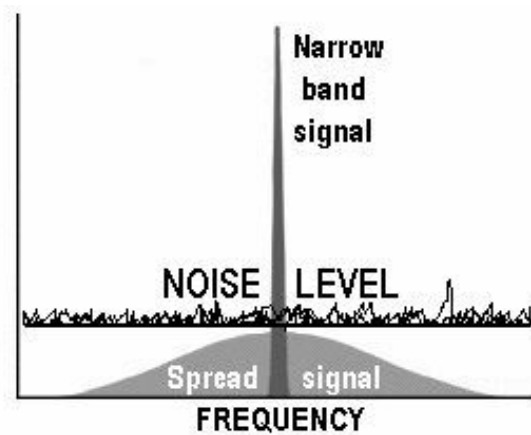
Komunikace v rozprostřeném spektru byla původně vytvořena kvůli vojenským účelům pro minimalizaci možnosti odposlechu, ale dnes se tato technika využívá zejména díky odolnosti vůči úzkopásmovému rušení. Další výhodou jsou samoopravné kódy FEC (Forward Error Correction), větší dosah (ve volném prostranství kolem 10 km) s možností přijímat vysílaný signál až 20 dB pod úroveň šumu, odolnost vůči Doplerovu jevu a potřeba menšího vysílacího výkonu redukcujícího spotřebu energie [24].

3.5 LoRa jako použitá LPWAN síť

I přes značné výhody NB-IoT v podobě přenosové rychlosti a pokrytí byla nakonec pro účely této práce jako komunikační médium zvolena síť LoRa a to především díky ceně rádiových čipů, které jsou kvůli využití bezlicenčních pásem řádově menší.

Mezi cíle práce patří také vytvořit soběstačný systém komunikující oběma směry, nezávislý na pokrytí oficiálních LoRa bran, a proto bylo nutné vytvořit i vlastní bránu.

Kvůli cenovým důvodům navržená brána využívá LoRa čip určený pro koncová



Obrázek 3.4: Komunikace pod úrovní hladiny šumu. Převzato z [16].

zařízení, jehož nevýhoda oproti čipům pro oficiální brány spočívá v možnosti komunikovat v danou chvíli pouze na jednom kanálu, a jedná se tak pouze o tzv. jednokanálovou bránu – anglicky Single channel gateway (více v kapitole 5.1.1). Využívaný komunikační kanál a spreading factor tedy musí být u uzlu a jednokanálové brány pro úspěšnou komunikaci předem určen, a nemá smysl proto implementovat LoRaWAN protokol.



Obrázek 3.5: Oficiální LoRa brána od firmy Multitech využívající čipy SX13xx. Převzato z [17].

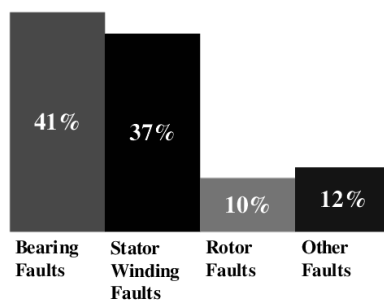
Kapitola 4

Vibrační signály a jejich digitální zpracování

Vibrační analýza je samotnou podstatou celé práce. Tato kapitola se snaží vysvětlit původ vibračního signálu a techniky jeho zpracování.

4.1 Poruchy indukčních motorů

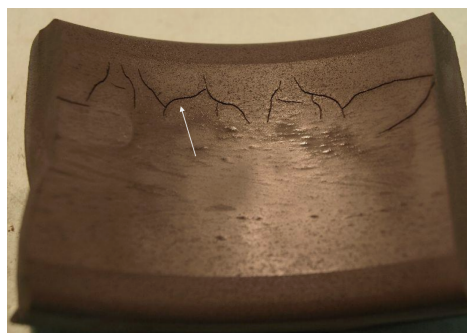
K selhání motorů může dojít mnoha způsoby. Může se jednat o poškození vinutí statoru, defekt rotoru, ale statistika ukazuje, že 40 až 90 % poruch je zapříčiněno defektem ložisek [21], jejichž původ může být různého druhu, jak ukazuje následující seznam [23].



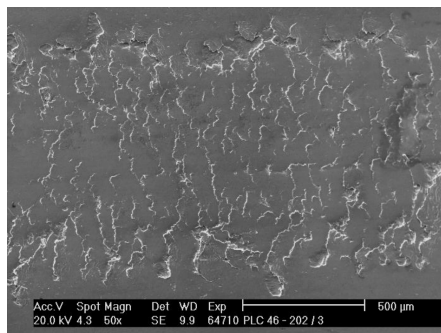
Obrázek 4.1: Příčiny poruch indukčních motorů. Převzato z [32].

- Vady před uvedením do provozu – rozměrové a tvarové nepřesnosti, brusné trhliny.
- Vady způsobené nesprávným upevněním k hřídeli – nesouosost, excentricita.
- Vady způsobené únavou materiálu ve valivém styku – povrchová styková únava.

- Vady způsobené vnějšími vlivy – mazání, znečištění, koroze.



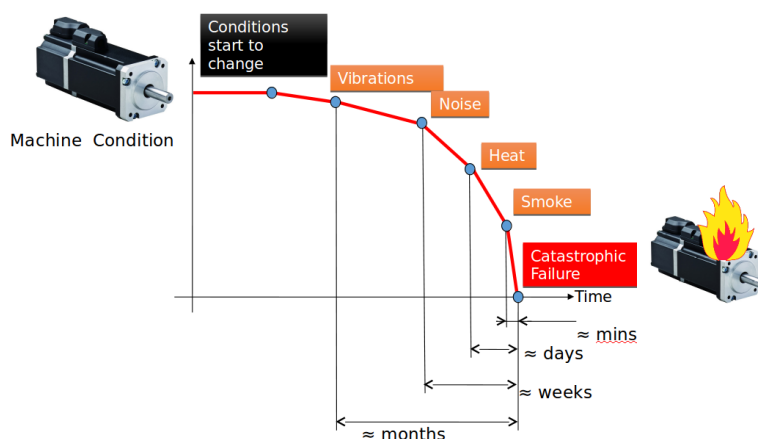
(a) : Brusné trhliny na vnitřním kroužku. Převzato z [23].



(b) : Povrchové únavové poškození, tzv. pitting. Převzato z [23].

Obrázek 4.2: Příklady poškození ložisek

Analýza vibrací je nejpoužívanější a nejpřínosnější metodou diagnostiky poruch rotačních zařízení [21]. Pomocí vibrací lze diagnostikovat poruchu už v jejím raném stádiu – až měsíce před tím, než dojde k úplnému selhání stroje, což je mnohem dříve než je tomu u ostatních veličin, které lze monitorovat, jako akustických emisí, tepla nebo proudového odběru (viz obrázek 4.4). Všechna rotační zařízení bez ohledu na dobu provozu a opotřebení vytvářejí vibrace. Vibrační signál motoru v sobě tedy nese velké množství informací, jejichž povaha se navíc po dobu provozu postupně mění. Vlastnosti tohoto signálu jsou determinovány jednotlivými částmi motoru (hřídel, převodovka, turbína, ložiska. . .) a také v sobě reflektují jeho vady a nedokonalosti. Správné porozumění a interpretace těchto vlastností spojená s vhodnými analýzami a technikami zpracování signálu je tedy klíčová pro určení vznikajících poruch při CBM.



Obrázek 4.4: Výhody analýzy vibrací. Převzato z [32].

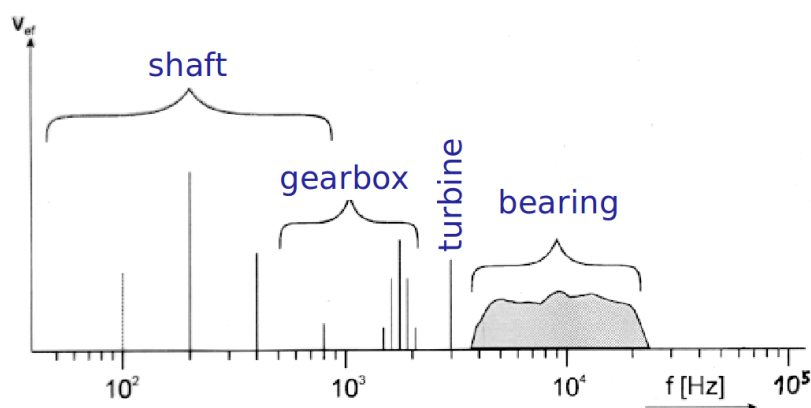
4.2 Snímání vibračního signálu

Vibrační signál se získává prostřednictvím měření akcelerace na určitém místě motoru. Kvalita naměřeného signálu silně závisí na umístění akcelerometru v rámci zařízení. Vibrace lze měřit ve směru osy motoru a ve dvou zbývajících osách kolmých na osu motoru, které bývají pro monitorování důležitější. Můžeme tedy použít jeden trojosý akcelerometr, nebo tři jednoosé. Frekvence signálu se obvykle pohybují od 10 Hz po 10 kHz, jak ukazuje obrázek 4.5, a jejich konkrétní hodnotu určuje část motoru, ve které vibrace vznikly.

Signál je z akcelerometru přiveden na vstup AD převodníku, jehož vzorkovací frekvence pro splnění Nyquistova teorému musí být alespoň dvakrát větší než maximální frekvence obsažená ve vibračním signálu.

$$f_s \gg 2 f_{max} \quad (4.1)$$

Navržený systém díky konfiguraci, jež lze za běhu aplikace nahrát do měřicí jednotky, umožňuje, aby si uživatel vzorkovací frekvenci sám definoval a upravoval podle konkrétních potřeb, o čemž pojednávají více kapitoly 6.1.3 a 6.2.2.



Obrázek 4.5: Typické zdroje vibrací – hřídel, převodovka, turbína a ložiska. Převzato z [32].

4.3 Techniky zpracování signálu

Mnohé příznaky defektu motoru mohou být určeny přímo v tzv. časové oblasti signálu získaného z akcelerometru. Samotnému zpracování ale obvykle předchází určité předzpracování jako odstranění střední hodnoty a filtrace. Mocnějším nástrojem jsou poté techniky pracující se signálem ve frekvenční oblasti, které jsou z diagnostického hlediska mnohem komplexnější a poskytují informace o celkovém chování motoru. Motor je ze své podstaty periodické zařízení. Příznaky defektů ložisek se také periodicky opakují, a lze je proto

detekovat ve spektru [18]. Použití frekvenčních metod je úzce spojeno s algoritmem FFT (Fast Fourier Transform) umožňujícím efektivní získání spektra signálu.

4.3.1 Techniky pracující se signálem v časové oblasti

RMS (Root Mean Square)

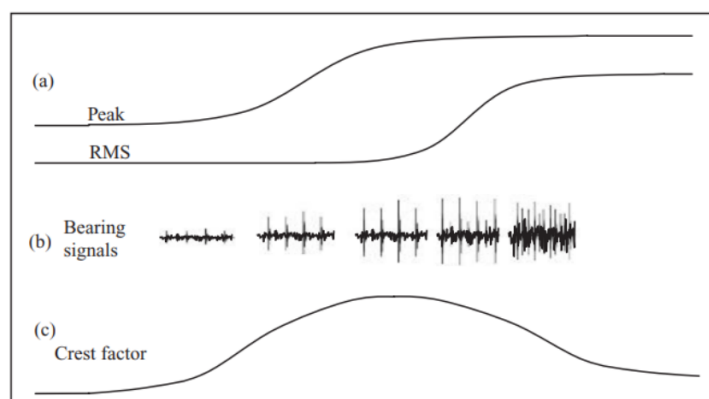
Jednou z nejjednodušších analýz je výpočet efektivní hodnoty, která představuje kvadratický průměr a dobře popisuje celkovou sílu vibrací. Obecně platí, že se její hodnota zvyšuje s otáčkami stroje a pomocí jejího časového trendu dokážeme dobře detekovat větší defekty a opotřebení ložiska.

$$u_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u[i]^2}, \quad (4.2)$$

kde N je počet vzorků a u_i je hodnota i -tého vzorku.

Krest faktor

Krest faktor je robustnější technika podávající informaci o impulsivnosti signálu. Obdélníkový nebo stejnosměrný signál má krest faktor roven jedné. Čím je tedy krest faktor vyšší, tím je signál impulsivnější. U běžných vibračních signálů motorů se krest faktor pohybuje mezi 2 a 6. Vyšší hodnoty obvykle indikují ostré nárazy uvnitř ložiska nebo motoru a obdobně jako u RMS má krest faktor největší přínos při sledování jeho časového trendu.



Obrázek 4.6: Časový průběh krest faktoru vzhledem ke změnám efektivní a maximální hodnoty napětí. Převzato z [21].

$$CREST = \frac{|u_m|}{u_{RMS}}, \quad (4.3)$$

kde u_m je maximální hodnota signálu a u_{RMS} je efektivní hodnota.

■ Statistické momenty a Kurtosis Ratio

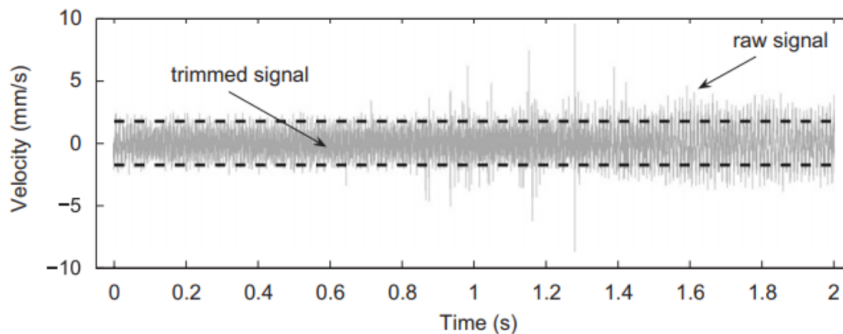
Statistický moment je jednou z charakteristik pravděpodobnostního rozdělení. První a druhý moment je označován jako střední hodnota a variace, čtvrtý jako kurtosis (česky koeficient špičatosti). Pro vibrační analýzu je nejvýznamnější právě čtvrtý moment. Obecně platí, že nepoškozené ložisko vykazuje hodnoty kurtosis kolem 3, což odpovídá normálnímu rozdělení. Vyšší hodnoty poté mohou indikovat vadu [18].

$$\mu = E[X] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x[i] \quad (4.4)$$

$$\text{VAR}[X] = \sigma^2 = E[(X - \mu)^2] \quad (4.5)$$

$$\text{KURT}[X] = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^4\right] \quad (4.6)$$

Kurtosis Ratio je poté technika vyjadřující množství odchylek v signálu v čase. Signál se nejprve ořízne, odstraní se z něj vychýlené hodnoty, tedy 5-10 % největších a nejmenších hodnot (tato hodnota je přesně určena konfiguračním parametrem `dsp_kurtosis_trimmed_samples`, více v kapitole 6.1.3) a spočítá se jeho kurtosis. Výsledkem je poté poměr kurtosis neoříznutého a oříznutého signálu. Pro signály, jež nevykazují vychýlené hodnoty (typicky obdélníkový signál), je kurtosis i po oříznutí stejná, a výsledek je tedy roven jedné [31].



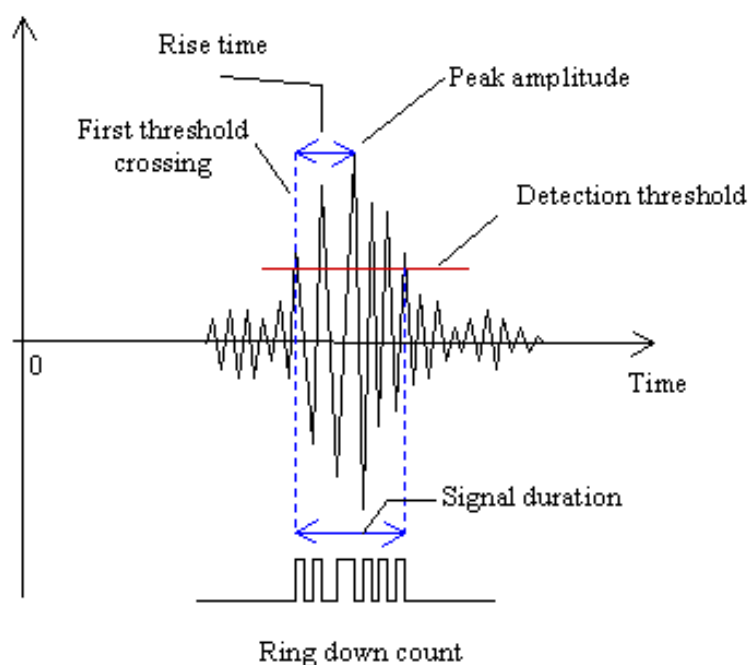
Obrázek 4.7: Oříznutí signálu pro výpočet kurtosis ratio. Převzato z [31].

■ Starší, výpočetně nenáročné techniky

Následující tři techniky pocházejí z dávné minulosti, kdy AD převodníky nedosahovaly takových vzorkovacích frekvencí jako dnes a k zpracování signálu byl použit komparátor a čítač. Dnes se ale stále používají zejména u analýz velmi rychlých signálů jako jsou akustické emise s kmitočty kolem 10-1000 kHz. Především díky jejich výpočetní nenáročnosti a stále zajímavému informačnímu charakteru, který je v navržené aplikaci umocněn konfigurovatelností jejich parametrů – napětové úrovně (konfigurační parametr `dsp_voltage_threshold`, více v kapitole 6.1.3), jsme se rozhodli, aby byly použity i v naší aplikaci pro analýzu vibrací.

Jedná se konkrétně o tyto techniky, jejichž význam lze dobře vidět na obrázku 4.8.

1. **Ringdown Counts** – počet průchodů signálu předem určenou komparační napětovou úrovní.
2. **Rise Time** – doba náběhu signálu od prvního průchodu napětovou úrovní po maximální hodnotu.
3. **Signal Duration** – doba od prvního průchodu napětovou úrovní po poslední průchod.



Obrázek 4.8: Grafické znázornění technik využívajících komparační napětovou úroveň. Převzato z [10].

4.3.2 Techniky pracující se signálem ve frekvenční oblasti

FFT – amplitudové spektrum

Diskrétní Fourierova transformace signálu transformuje konečnou posloupnost jeho časově ekvidistantních N vzorků do $N/2 + 1$ dlouhé posloupnosti s komplexními hodnotami odpovídajícími frekvenci [18].

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{\frac{2\pi j}{N} kn} \quad (4.7)$$

Výpočet DFT je algoritmicky náročný úkol – časová složitost $\mathcal{O}(n^2)$. Jeho realizaci na výpočetně slabších zařízeních umožňuje algoritmus FFT (Fast Fourier Transform), jehož časová složitost je $\mathcal{O}(n \log n)$. Implementace tohoto algoritmu byla převzata z DSP knihovny firmy ST Microelectronics [28].

```

bool looksForMax = true;
for (int i = 0; i < N/2; i++){
    //looks for max
    if (looksForMax){
        if (fftBuffer[i] > max)
            max = fftBuffer[i]; maxPos = i;
        else if (max - delta > fftBuffer[i]){
            --> Find minimum in saved peaks
            and replace it {}
            min = fftBuffer[i];
            looksForMax = false;
        }
    }
    //looks for min
    else{
        if (fftBuffer[i] < min)
            min = fftBuffer[i];

        else if (min + delta < fftBuffer[i]){
            max = fftBuffer[i];
            maxPos = i;
            looksForMax = true;
        }
    }
}

```

Obrázek 4.9: Algoritmus pro vyhledávání extrémů amplitudového spektra.

Díky použití sítě LoRa jako komunikačního média není možné odesílat celé amplitudové spektrum do centrální jednotky. Například pro 1024 vzorků by

celková velikost paketů bez nákladů na režii protokolu měla velikost 2 KiB, což by z hlediska časových a energetických nároků bylo nerealizovatelné. Do centrální jednotky je tedy posláno pouze k nejvýznamnějších extrémů, kde hodnota k je jedním z konfigurovatelných parametrů – `fft_peaks_num` (více v kapitole 6.1.3). Graf k nejvýznamnějších extrémů, který je vygenerován ve webovém rozhraní lze vidět na obrázku 6.11. Celé amplitudové spektrum je možné zaslat do centrální jednotky pouze v debugovacím módu. Výstupem je graf, jehož příklad lze vidět například na obrázku 7.4a získaném při experimentu.

Na výběr k nejvýznamnějších maxim ve spektru byl použit algoritmus pro hledání lokálních extrémů funkce 4.9. Míra selektivity extrémů ve spektru je ovlivněna parametrem delta, který je jedním z konfigurovatelných parametrů – `fft_peaks_delta` (více v kapitole 6.1.3).

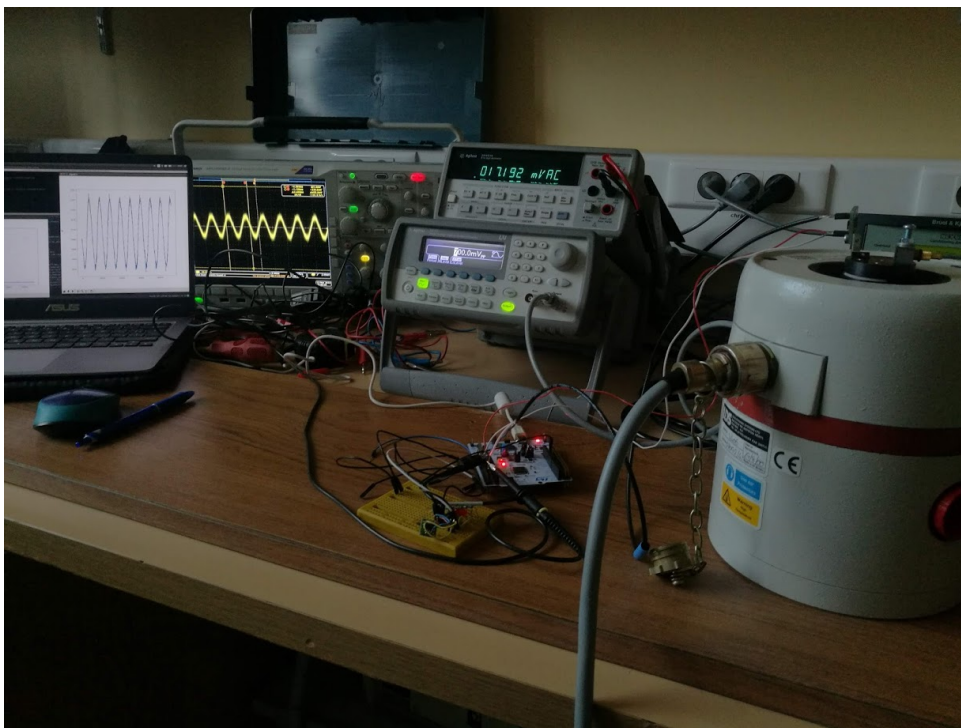
4.4 Určení převodní konstanty

Z akcelerometru a AD převodníku získáváme údaj odpovídající pouze napětí. Pro jeho převod do jednotek odpovídajících zrychlení – m s^{-2} nebo g je třeba nalézt převodní konstantu.

K tomuto úkolu byl využit referenční elektrodynamický budič vibrací (tzv. „shaker“) a přístrojový zesilovač NEXUS Conditioning amplifier s jednoosým přesným piezoelektrickým akcelerometrem s rozsahem 5000 g [5]. Při použití obou akcelerometrů pro buzení motoru 400 Hz byla odečtena naměřená hodnota akcelerace na přípravku NEXUS a podle změřené efektivní hodnoty na použitém akcelerometru ADXL1002 vypočtena převodní konstanta.



Obrázek 4.10: Přípravek NEXUS. Převzato z [5].



Obrázek 4.11: Výpočet převodní konstanty v laboratoři.

Kapitola 5

HW Design

Tato kapitola popisuje výběr použitého hardwaru a návrh měřicí a centrální jednotky.

5.1 Měřicí jednotka (LoRa Node)

5.1.1 Výběr komponent

Mikrokontrolér (MCU)

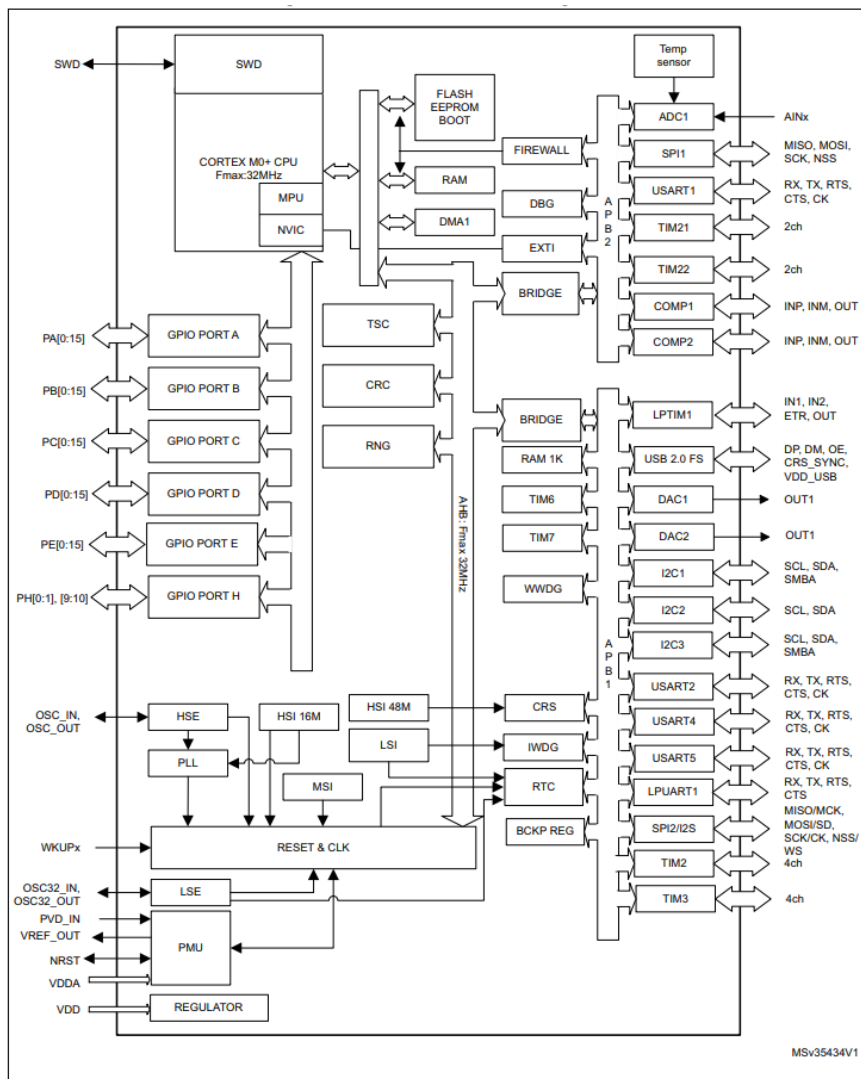
Výběr výpočetní jednotky byl ovlivněn zejména dvěma požadavky – dostatečným výpočetním výkonem, který je třeba pro zpracování signálu z akcelerometru a výpočet vibračních analýz, a nízkou spotřebou. Tyto požadavky jdou ovšem zcela proti sobě, a nakonec byly tak jako kompromis použity procesory z „low power“ série mikrokontrolérů od firmy STM – STM32L0xx.

V první prototypu jednotky byl tento procesor použit ve verzi L073 s 64 piny – STM32L073RZ na vývojové desce Nucleo. Během dalšího vývoje byla zvolena verze L072 s 32 piny – STM32L072KZ, zejména díky nadbytečnému počtu pinů u L073RZ. Z hlediska vnitřní architektury, výkonnosti a samotného programování jsou ale čipy téměř totožné.

Specifikace MCU STM32L072KZ: [27]

- 32bitové RISC jádro ARM Cortex M0+
- 192 kB flash paměti, 20 kB RAM paměti
- HSI RC oscilátor 16 MHz, 32 kHz RTC oscilátor
- 12-bit ADC 1.14 Msps, 16 kanálů

- 4x USART, 1xLPUSART, 6x SPI, 3x I²C
- 7 kanálů DMA kontroléru podporujících ADC, SPI, I²C, USART, DAC...
- proudový odběr ve STDBY módu 0.29 μA



Obrázek 5.1: Blokový diagram MCU STM32L072xx. Převezato z [27].

LoRa modul

Všechny čipy podporující modulaci sítě LoRa jsou vyvíjeny firmou Semtech, nesou označení SX a dělí se na dvě řady.

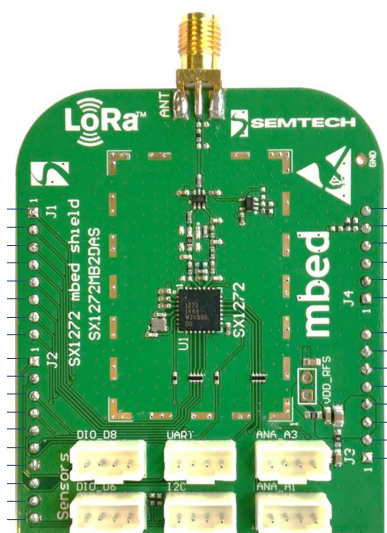
První řada s čipy SX126x, SX127x, které se liší podle výkonnosti, nese označení *LoRa Transceivers* a je určená pro koncové uzly. Tyto čipy neumožňují multikanálový příjem paketů a jsou omezeny na využití jednoho SF v danou chvíli. Naproti tomu druhá řada s čipy SX125x, SX13xx s označením

LoRa Gateways je mnohem výkonnější a umožňuje automatickou detekci SF přijatého signálu [30].

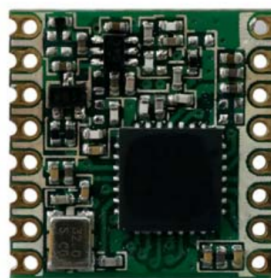
Na trhu se nachází nepřehledné množství LoRa modulů, které se liší použitým LoRa čipem, tedy hlavně výstupním výkonem, podporou různých vlastností LoRa modulace a dále komunikačním rozhraním a cenou.

Pro první prototyp měřicí jednotky byl nakonec použit LoRa modul přímo od firmy STM – **I-NUCLEO-SX1272D** s čipem SX1272, který byl součástí vývojářského kitu a který lze zapojit přímo do Nuclea [26].

V druhé verzi byl využit velmi rozšířený modul **RFM95W** s čipem SX1276, který se těší velké oblíbenosti především díky své nízké ceně. Problém nastal pouze u vysílacího výkonu, kdy modul RFM na rozdíl od referenční verze SX1276 neumožňuje použít RFO pin pro vysílání. Pro zesílení vysílaného paketu byl tak nakonec využit pin BOOST, který má ale výrazně vyšší spotřebu (více v 5.1).



(a) : LoRa modul I-NUCLEO-SX1272D. Převzato z [26].



(b) : LoRa modul RFM95W. Převzato z [11].

Specifikace LoRa modulu **RFM95W**: [11]

- link budget až 161 dB (rozdíl vysílacího výkonu a citlivosti přijímače)
- programovatelný bitrate až 300 kbps
- vysílací výkon až +20 dBm (pro PA_BOOST)
- citlivost až -148 dBm
- až 256bitové pakety
- proudový odběr v tabulce 5.1

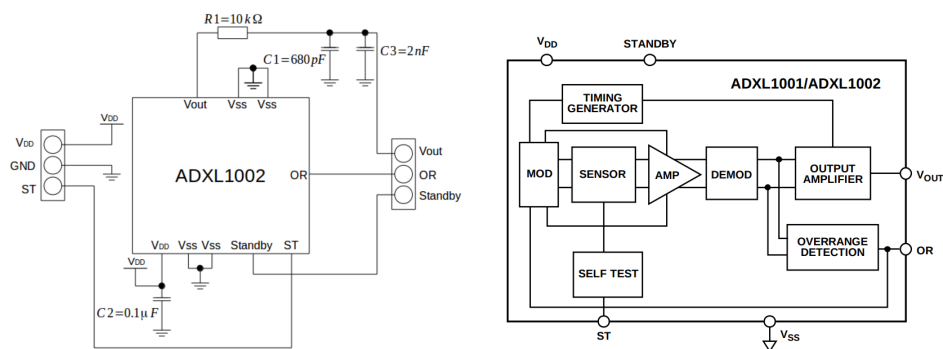
Režim čipu	Proudový odběr
SLEEP mód	0.2 μ A
STDBY mód (RC oscilátor)	1.5 μ A
RX mód (LNA boost ON)	11.5 mA
RX mód (LNA boost OFF)	10.8 mA
TX mód (PA_BOOST 20 dbm)	120 mA
TX mód (PA_BOOST 17 dbm)	87 mA
TX mód (PA_RFO 13 dbm)	29 mA
TX mód (PA_RFO 7 dbm)	20 mA

Tabulka 5.1: Proudový odběr pro jednotlivé režimy čipu a vybrané vysílací výkony.

■ Senzor vibrací

Výběr akcelerometru byl ovlivněný vhodností pro detekci vibračních signálů a nízkou spotřebou. Pro měření vibrací a to pouze v jedné ose kolmé na osu motoru (více o měření vibračního signálu v kapitole 4.2) postačoval jednosý akcelerometr s šířkou pásma kolem deseti kilohertz, čemuž vyhovoval **ADXL1002** od firmy Analog Devices.

Akcelerometr byl navíc dodán na vývojářské destičce **EVAL-ADXL1002Z**, která je poměrně tlustá, odolná i vůči silným vibracím, dobře upevnitelná k samotnému motoru a je na ní umístěn také RC filtr, který tlumí vyšší harmonické frekvence vznikající při modulaci signálu v senzoru a který zamezuje aliasingu. Analogový výstup akcelerometru je poté veden koaxiálním kabelem, jehož stínění potlačuje vliv vnějších rušivých polí na přenášený užitečný signál, a je následně zpracováván AD převodníkem na mikrokontroléru.



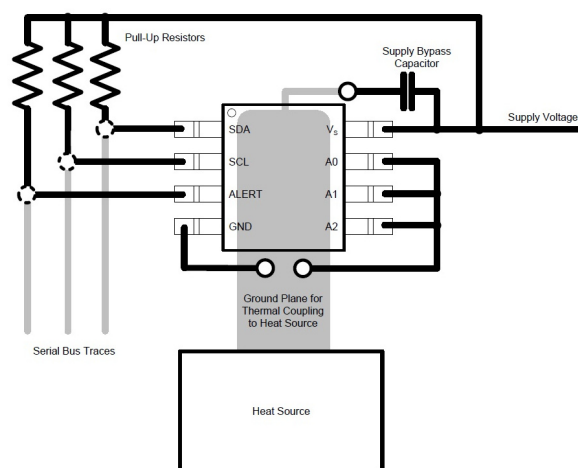
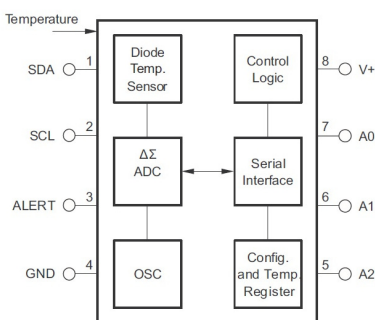
(a) : Schéma vývojové desky EVAL-ADXL1002Z. Převzato z [2].

(b) : Zjednodušený blokový diagram. Převzato z [2].

Obrázek 5.3: Akcelerometr ADXL1002.

Specifikace akcelerometru ADXL1002: [2]

- jednoosý akcelerometr typu MEMS (mikroelektromechanický)
- šířka pásma 11 kHz
- měřicí rozsah $\pm 50 g$
- citlivost 40 mVg^{-1} , při nulovém g je na výstupu polovina napájecího napětí
- spektrální výkonová hustota šumu $25 \mu\text{g}(\sqrt{\text{Hz}})^{-1}$
- analogový výstup
- proudový odběr v měřícím módu 1 mA
- proudový odběr v STDBY módu $225 \mu\text{A}$

**(a)** : Schéma připojení TMP75. Převzato z [29].**(b)** : Zjednodušený blokový diagram TMP75. Převzato z [29].**Obrázek 5.4:** Teplotní senzor TMP75.

■ Teplotní senzor

Pro monitorování teploty bylo vybráno digitální teplotní čidlo **TMP75** od firmy Texas Instruments, které pro měření využívá 12bitový převodník. Jedná se o poměrně rozšířený senzor komunikující po I²C sběrnici, který je díky své malé spotřebě vhodný zejména do zařízení, která jsou poháněna baterií.

Specifikace teplotního čidla TMP75: [29]

- typ čidla výrobce neuvádí, zřejmě se jedná o měření teploty na PN přechodu tranzistoru
- přesnost $\pm 1^\circ\text{C}$
- programovatelné rozlišení 9-12 bitů
- rozsah -40°C - 125°C
- proudový odběr $50\ \mu\text{A}$

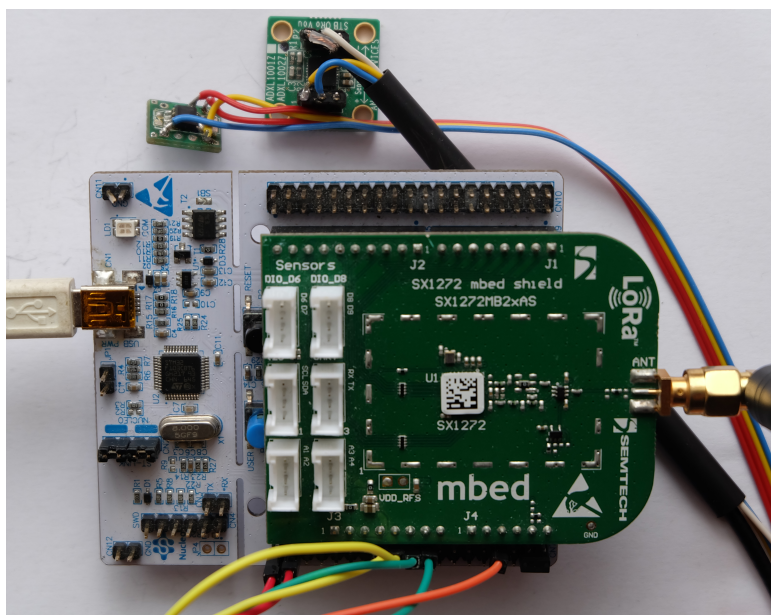
■ 5.1.2 Celkový design

■ První prototyp

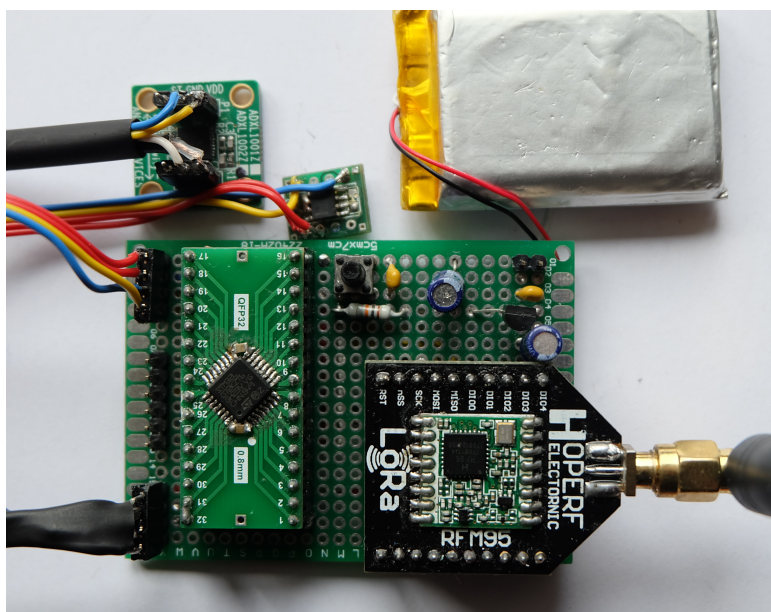
První verze měřicí jednotky byla vytvořena pomocí vývojářského kitu Nucleo s procesorem STM32L073RZ a LoRa modulem s čipem SX1272. Teplotní čidlo a akcelerometr byly do Nuclea připojeny pomocí 125 centimetrů dlouhých drátů, dostatečně dlouhých nato, aby se daly připevnit přímo na motor. Výstup akcelerometru byl veden koaxiálním kabelem. V obou dvou verzích byla využita stejná anténa na 868 MHz se SMA konektorem, která byla dodána ve vývojářském kitu. První verzi měřicí jednotky lze vidět na obrázku 5.5.

■ 5.1.3 Druhá verze

Druhá verze měřicí jednotky byla vytvořena bez Nuclea zapájením čipu STM3272KZ na adaptor, stejně jako LoRa modulu RFM95W. Adaptory byly společně se stabilizačním obvodem, restartovacím tlačítkem, blokovacími kondenzátory a konektory pro připojení senzorů a programátoru připájeny k univerzální pájecí destičce, jak lze vidět na obrázku 5.6. Li-Pol baterie použitá k napájení zařízení měla kapacitu 1900 mAh a výstupní napětí 3.7 V. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku A.1.



Obrázek 5.5: První verze měřicí jednotky.



Obrázek 5.6: Druhá verze měřicí jednotky.

5.2 Řídicí jednotka (LoRa Gateway)

5.2.1 Výběr komponent

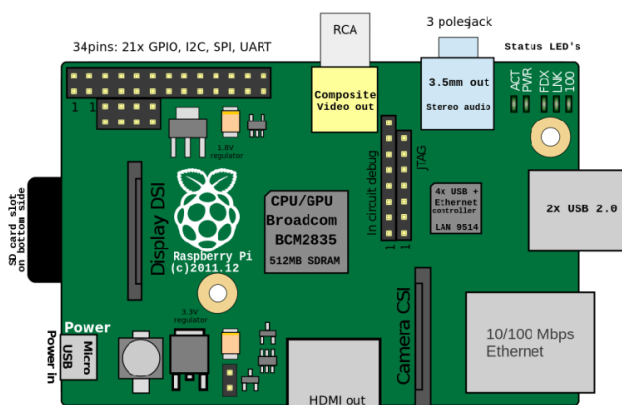
Mikrokontrolér (MCU)

Vlastní LoRa brána může být postavena spíše minimalisticky za použití určitého mikrokontroléru, tedy se slabým výkonem, ale nízkou cenou a spotřebou – například jako další STM32 jednotka s Ethernet nebo WiFi modulem nebo pomocí oblíbeného vývojářského čipu ESP8266/ESP32. Opačným přístupem by bylo postavení brány s výpočetně silnějším počítačem a operačním systémem, tedy s velkým výkonem, ale vyšší cenou a spotřebou.

Pro realizaci brány bylo ale nakonec použité **Raspberry Pi** verze 3 model B. Motivací výběru Raspberry, po zvážení kritérií popsanych výše, byl zejména dostatečný výpočetní výkon, vývojářská podpora a výhody operačního systému. Spotřeba brány není tak důležité kritérium jako u koncových zařízení, protože brána může mít stálý síťový zdroj napájení.

Specifikace Raspberry Pi 3 model B: [22]

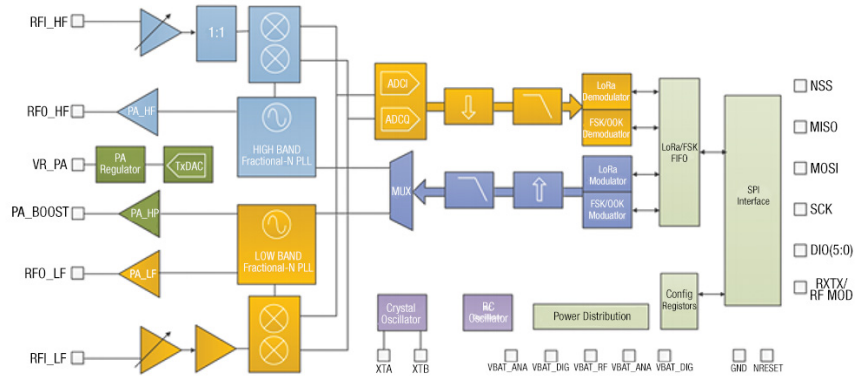
- 64 bitový čtyřjádrový procesor Broadcom BCM2835 1.2 GHz, 1 GB RAM
- 40 externích GPIO pinů
- BCM43438 WLAN a Bluetooth
- 4 USB porty, HDMI, 3.5 mm jack
- microSD port



Obrázek 5.7: Vybavení Raspberry Pi 3 model B. Převzato z [22].

LoRa modul

Z důvodů popsaných v kapitole 3.5 byla brána navržena jako jednocanálová. Pro komunikaci tedy nebyly použity čipy ze série SX125x či SX13xx a v obou verzích byl využit stejný čip jako u měřicí jednotky – SX1272 v první verzi a RFM95W ve druhé verzi.



Obrázek 5.8: Zjednodušený blokový diagram RFM95W.

Displej

K Raspberry Pi byl připojen 7palcový dotykový displej s rozlišením 800 x 480. Skrz GPIO port bylo připojeno napájení 5 V a páskovým kabelem DSI port.

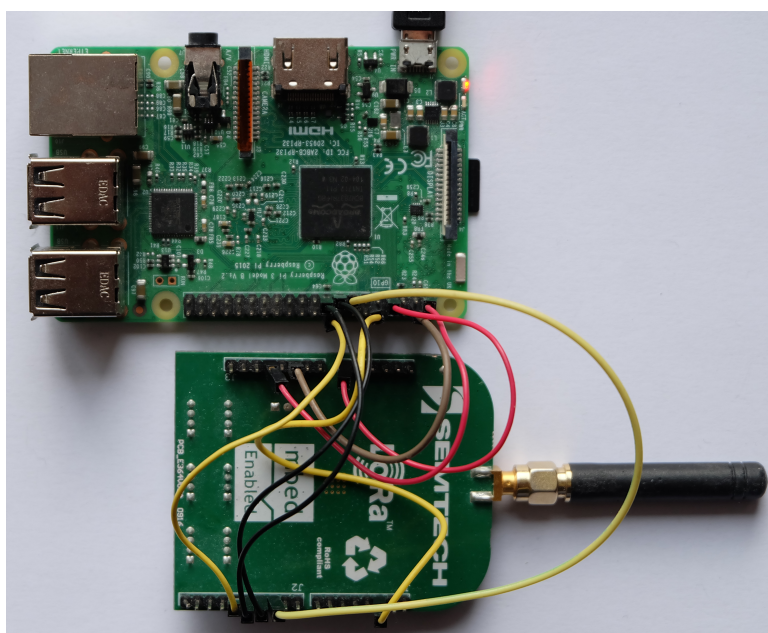


Obrázek 5.9: Centrální jednotka s připojeným dotykovým displejem.

Na displeji je po spuštění Raspberry automaticky zobrazeno uživatelské rozhraní popsané v kapitole 6.4.5 s časovými průběhy monitorovaných veličin. Motivací pro připojení displeje byl hlavně fakt, že v průmyslovém prostředí se může často hodit vidět průběhy analyzovaných veličin „naživo“ a rychle bez nutnosti připojovat se přes webovou stránku.

■ První prototyp

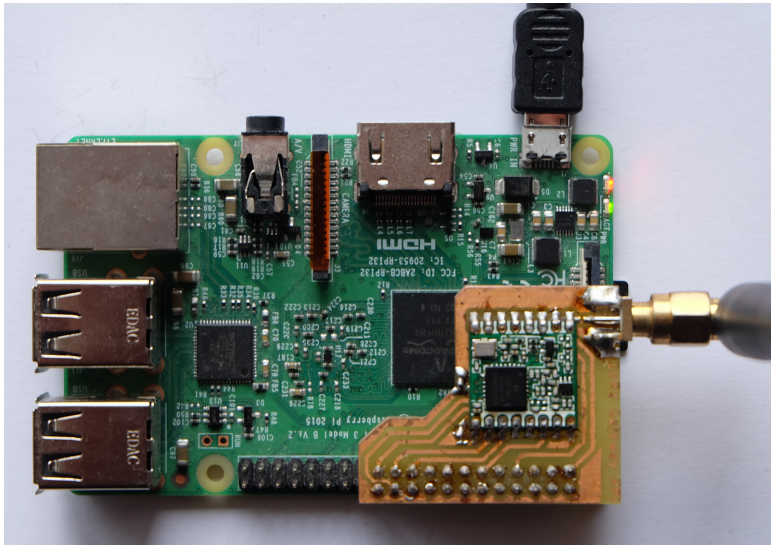
První verze brány byla vytvořena pouze s LoRa modulem určeným původně pro Nucleo I-NUCLEO-SX1272D, který musel být s GPIO piny Raspberry propojen jednotlivými drátky.



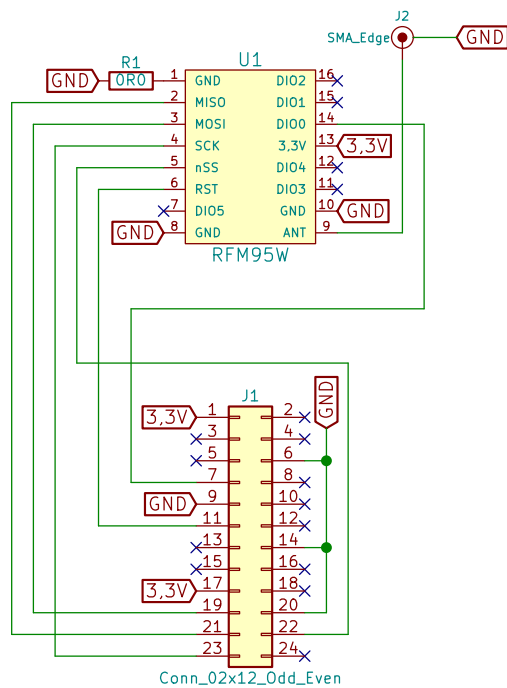
Obrázek 5.10: První verze centrální jednotky.

■ Druhá verze

Ve výsledné verzi byl použitý RFM95W LoRa modul. Pro jeho snadné připojení přímo do headru Raspberry byl vypůjčen návrh PCB, jehož autorem je student Ondřej Fídra [6]. Výslednou verzi lze vidět na obrázku 3.5, schéma zapojení RFM95W do Raspberry na obrázku 5.12.



Obrázek 5.11: Druhá verze centrální jednotky.



Obrázek 5.12: Schéma zapojení RFM95W do Raspberry Pi.

Kapitola 6

Softwarová implementace

Tato kapitola popisuje použité softwarové nástroje, chování celého systému a jednotlivých částí komunikačního řetězce.

6.1 Architektura a chování celého systému

6.1.1 Komunikační řetězec

V rámci správného fungování je důležité, aby spolu spolehlivě komunikovaly všechny tři části systému – měřicí jednotka (LoRa Node), centrální jednotka (LoRa Gateway) a aplikační server. Pro rádiovou komunikaci mezi měřicí jednotkou a bránou byl vytvořen binární komunikační protokol popsáný v kapitole 6.1.2. Pro komunikaci brány a aplikačního serveru přes UDP socket byl vytvořen jednodušší komunikační textový protokol využívající formát JSON.

Celkové chování systému nejlépe popisuje obrázek 6.1, seznam všech rádiových paketů použitých v aplikaci diagram A.4.

Zahájení komunikace – Join proces

Měřicí jednotka po stisknutí tlačítka reset začíná vysílat rádiový paket `Join Request`, čímž žádá nejbližší bránu o autorizaci. Jeho nejdůležitější informací je unikátní čtyřbajtový identifikátor uzlu – *Unique Id* (na ST procesorech jako UUID uložený na specifické adrese), který má principiálně podobný účel jako MAC adresa, a časová známka RTC hodin. Jakmile do vypršení timeoutu neobdrží odpověď, opakuje jeho vysílání, dokud nepřijme rádiový paket `Join Reply`.

Centrální jednotka po přijetí paketu vysílá do aplikačního serveru přes UDP socket požadavek `NodeInfo Request`. Pokud je dané zařízení registrované

v databázi, dostává jako odpověď informace o měřicí jednotce, ve které se nachází uživatelem definovaná jednobajtová adresa jednotky – *Session Id*, jež má podobný účel jako IP adresa a je využívána po celý zbytek komunikace jako identifikátor jednotky. Dále se v odpovědi nachází komunikační port a jméno jednotky, a přihlášení je tak úspěšné.

■ Získání konfigurace – Configuration proces

Po přijetí paketu `Join Reply` odesílá měřicí jednotka rádiový paket `Config Request`. Pokud po nejvýše třech neúspěšných odesláních nedostane odpověď, přechází opět do počátečního stavu po resetu.

Centrální jednotka po přijetí paketu vysílá do aplikačního serveru přes UDP protokol požadavek `ConfigInfo Request`, na nějž dostává ze serveru odpověď v podobě konfigurace, kterou si uživatel vytvořil ve webovém rozhraní serveru a která byla uložena pro danou jednotku do databáze. Tato konfigurace je přeposlána do měřicí jednotky jako paket `Config Reply`. Měřicí jednotka po jeho úspěšném přijetí ukládá konfiguraci do paměti a nastavuje podle ní příslušné periferie (rádiový modul, AD převodník, parametry FFT...) (více v kapitole 6.2.2).

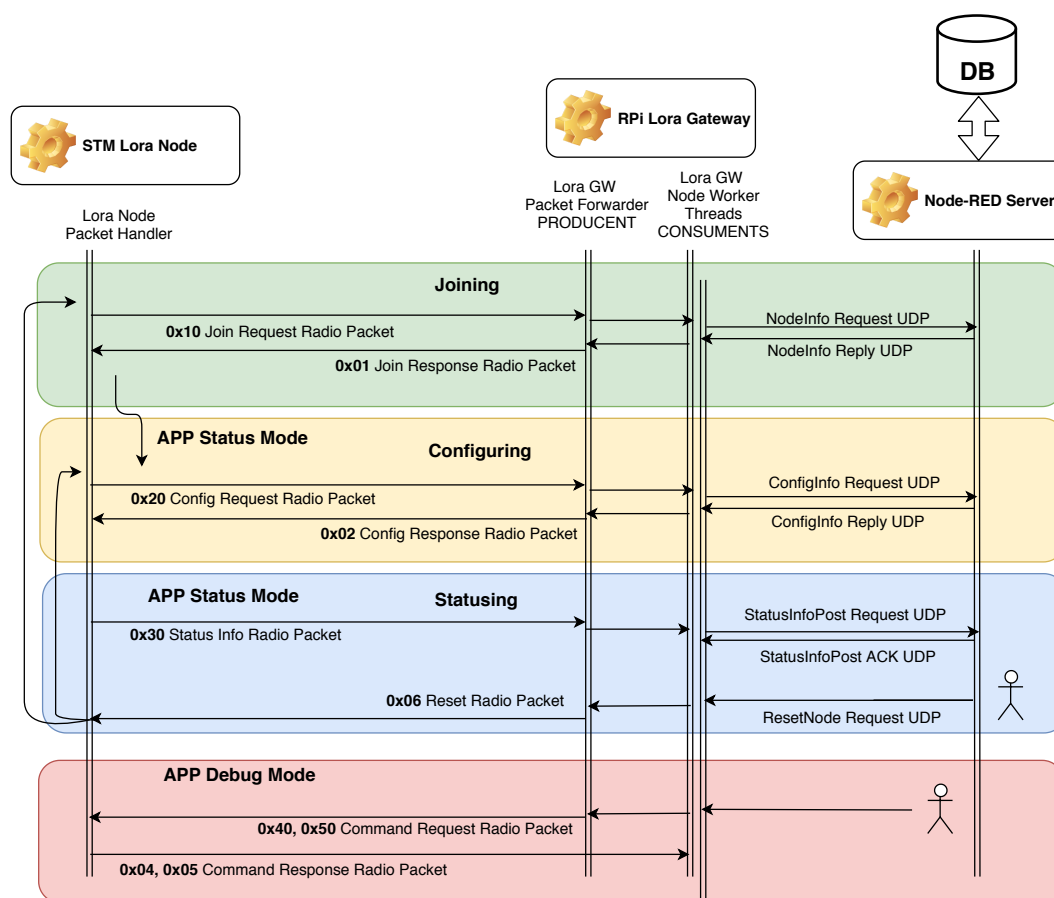
■ Výsledky měření – Status proces

Jedním z nejdůležitějších parametrů konfigurace je údaj *Statusinfo Interval*, jehož hodnota určuje, po jak dlouhém časovém intervalu vystoupí jednotka z režimu spánku a odešle rádiový paket `Statusinfo` s naměřenými hodnotami baterie, teploty a s výsledky provedených analýz vibračního signálu z akcelerometru (popsáno v kapitole 4.3). Po přijetí paketu centrální jednotkou je jeho obsah upraven (převedení hodnot, doplnění o dodatečné informace) a data jsou přeposlána do aplikačního serveru, který je uloží do databáze.

■ Restart

Koncový uživatel má možnost interaktivně měnit konfiguraci měřicí jednotky v uživatelském rozhraní nebo danou jednotku restartovat. Konfigurace, kterou může uživatel nastavit, lze vidět v tabulce 6.1.

Po stisknutí tlačítka ve webovém rozhraní je z aplikačního serveru do centrální jednotky odeslán přes UDP protokol požadavek na restart, který je po přijetí následujícího `Statusinfo` paketu přeposlán jako rádiový paket `Restart` do příslušné měřicí jednotky. Interval, po který měřicí jednotka naslouchá po odeslání `Statusinfo` paketu, je dán konfiguračním parametrem *Statusinfo Listen Interval*. Podle jednobajtového těla paketu se poté rozhoduje, zda se vrátí do stavu, kdy žádá o konfiguraci, nebo přechází do stavu po stisknutí reset tlačítka (viz diagram 6.1).



Obrázek 6.1: Vizualizace chování celého systému. Hexadecimální čísla označují parametr *CMD*.

6.1.2 Rádiový komunikační protokol

Pro účely komunikace mezi měřicí jednotkou a bránou byl navržen komunikační protokol, který slouží k rozlišení funkcionality jednotlivých paketů, přehlednou práci s přijatými nebo odesílanými daty a také pro jednoduché budoucí rozšíření celého systému o další pakety a další funkcionalitu.

Při návrhu protokolu byl kladen důraz zejména na minimální možnou velikost paketů. Každý odeslaný bajt stojí měřicí jednotku energii z baterie. Vysílání je energeticky nejnáročnější úkon, který jednotka provádí (jednotlivé spotřeby v kapitole 5.1), a proto byly například hodnoty RMS nebo teploty odesílány jako dvoubajtový integer namísto čtyřbajtového float, adresa měřicí jednotky je jednobajtová nebo hodnoty SF, šířky pásma a Coding Rate jsou odesílány jako jednobajtové údaje namísto konkrétních hodnot (jedná se v podstatě o výčtové typy). Tyto hodnoty jsou upravovány do příslušné podoby až v centrální jednotce.

Každý radiopakety má pevně danou dvoubajtovou hlavičku, jež obsahuje parametr *CMD* determinující význam pakety, a parametr *sessionId* specifiku-

jící, komu je paket určen. Ve zbytku zprávy se nacházejí vlastní data paketu, jejichž velikost a obsah se liší podle konkrétního typu paketu, což je podrobně znázorněno na obrázku A.4.

Komunikační protokol je implementovaný na straně brány v souboru `radio_packet.py` a na straně uzlu `radio_protocol.h`.

6.1.3 Konfigurace

Konfigurace měřicí jednotky může být uživatelem změněna ve webovém rozhraní (obrázek 6.10), jinak jsou vždy použité výchozí parametry. Výsledná konfigurace se poté nahrává do měřicí jednotky prostřednictvím rádiového paketu `Config Reply`. Seznam nejdůležitějších nastavitelných parametrů odpovídající záznamům v databázi lze vidět v následující tabulce.

Díky navrženému datovému modelu (popsáno v 6.4.4) lze každé jednotce přiřadit jinou konfiguraci a také vymýšlet nová nastavení, a tím rozšiřovat celý systém.

Code	Data Type	Default Value
<code>adc_samplings</code>	text	160CYCLES5
<code>adc_divider</code>	text	ASYNC_DIV4
<code>fft_samples_num</code>	text	N_1024
<code>fft_peaks_num</code>	int	5
<code>fft_peaks_delta</code>	int	3
<code>lora_codingrate</code>	text	CR4_5
<code>lora_spreadingfactor</code>	text	SF12
<code>lora_bandwidth</code>	text	BW7_8
<code>statusinfo_interval</code>	int	60
<code>statusinfo_listen_interval</code>	int	5
<code>dsp_threshold_voltage</code>	float	2.0
<code>dsp_rms_averaging_num</code>	int	1
<code>dsp_kurtosis_trimmed_samples</code>	int	10

Tabulka 6.1: Nejvýznamnější konfigurovatelná nastavení.

6.2 Měřicí jednotka (LoRa Node)

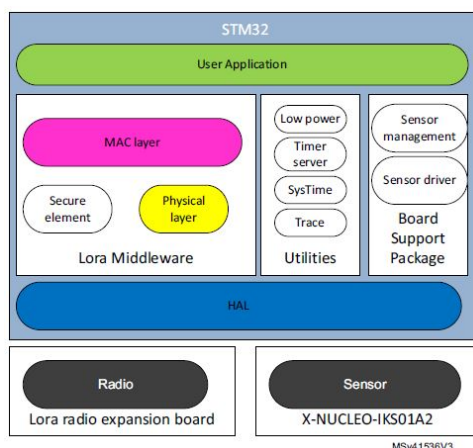
6.2.1 Použité softwarové nástroje

Software měřicí jednotky byl vytvořen v programovacím jazyce C za použití vývojového prostředí Atollic TrueSTUDIO.

Projekt byl založený na balíku dodaném firmou ST pro vývoj aplikací využívající síť LoRa – I-CUBE-LRWAN Expansion Package [26].

Z tohoto balíku byly využity zejména knihovny pro obsluhu RF LoRa čipů

SX1272/SX1276, inicializace některých periférií a dodatečné nástroje jako třeba logování na konzoli. Implementace linkové (MAC) vrstvy LoRaWAN protokolu využita nebyla z důvodů popsaných v kapitole 3.5. Pro rychlý výpočet RMS a FFT byla použita knihovna DSP obsahující také softwarovou emulaci operací s desetinnou čárkou [28].



Obrázek 6.2: Hierarchie SW nástrojů dodaných firmou ST. Převzato z [26].

6.2.2 Nastavení periférií a vzorkování

Po restartování systému jsou nastavené nejdůležitější periferie. Systémové hodiny monitorovací jednotky běží za pomoci PLL na dvojnásobné hodnotě frekvence HSI oscilátoru – 32 MHz, RTC hodiny na 32 kHz. Pro komunikaci s rádiovým modulem je nastavena SPI sběrnice s rychlostí 10 MHz, pro teplotní senzor I²C sběrnice s rychlostí 400 kHz, pro komunikaci s PC UART s rychlostí 115200 Bd/s, 8 datovými bity, 1 stop bitem a bez paritního bitu. Hodiny AD převodníku jsou odvozeny od HSI (v první verzi u Nuclea od HSE) oscilátoru a běží na 16 MHz.

Parametr	Základní nastavení
Spreading Factor	12
Bandwidth	125 kHz
Coding Rate	4/5
Frekvenční kanál	868.5 MHz
Vysílací výkon	5 dBm (PA_BOOST)
LNA	0 dBm (maximum gain)
Explicit header	OFF
Low Data Rate Optimize	ON
FHSS	OFF

Tabulka 6.2: Základní TxRx nastavení LoRa modulu.

Následně dochází ke konfiguraci LoRa modulu, kdy je pro každou měřicí jednotku nejprve použito základní nastavení (popsáno v tabulce 6.2).

Vysílací výkon byl snížen na 5 dBm kvůli šetření baterie, pro kilometrové vzdálenosti by musel být zvýšen (spotřeba popsána v kapitole 5.1). LNA (Low Noise Amplifier) byl nastaven na maximální zesílení, čímž bylo docíleno maximální citlivosti. SF byl použit vyšší – 12, což umožňuje vyšší selektivitu za cenu menší přenosové rychlosti.

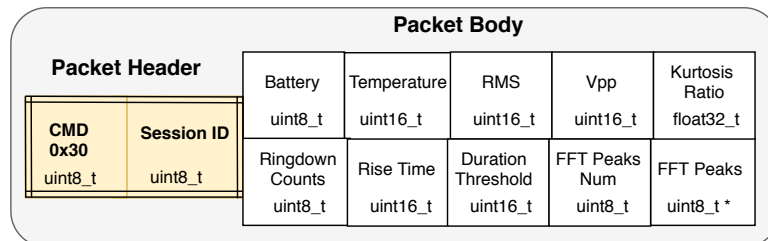
K dalšímu nastavení periférií dochází po přijetí rádiového paketu `Config Reply`. Konfigurace je nejprve uložena a dále je podle ní znovu nastaven LoRa modul a AD převodník.

Pro přenos dat z akcelerometru slouží AD převodník zabudovaný přímo na čipu procesoru. Pro snadné řízení vzorkování byl využit DMA přenos, jenž přenáší navzorkovaná data z AD převodníku rovnou do paměti bez účasti procesoru. Výhoda DMA přenosu spočívá především v jeho rychlosti a přesném vzorkování.

Vzorkovací frekvence AD převodníku je determinována konfigurací, konkrétně parametry `adc_clock_divider` a `adc_sampling_time` podle rovnice 6.1. Při jejím nastavování je třeba brát ohled na dodržení vzorkovacího teorému (popsáno v kapitole 4.2).

$$f_s = \frac{f_{HSI}}{\text{clock_divider}} \frac{1}{(\text{sampling_time} + 12.5)} \quad (6.1)$$

6.2.3 Měření a odeslání rádiového paketu `Statusinfo`



Obrázek 6.3: Struktura rádiového paketu `Status Info`.

Po přijetí konfigurace je měřicí jednotka uspána a probuzena interruptem z RTC hodin. Doba, po kterou se nachází jednotka v režimu spánku je určena konfigurovatelným parametrem `statusinfo_interval`. Nejprve dochází k navzorkování dat z akcelerometru, vyčtení dat z teplotního čidla, dále je naměřen stav baterie a následně dochází k preprocessingu signálu a vypočtení signálových analýz uvedených v kapitole 4.3. Data jsou poté odeslána jako rádiový paket `Statusinfo`, který, i přes snahu omezit jeho velikost, je nejdelším paketem ze všech rádiových paketů (viz A.4). Formát

této zprávy lze vidět na obrázku 6.3 a jeho velikost je při základním nastavení 5 odesílaných maxim v amplitudovém spektru 49 bajtů.

6.3 Řídicí jednotka (LoRa Gateway)

6.3.1 Použité softwarové nástroje

Na Raspberry Pi byl v první řadě nainstalován operační systém Raspbian ve verzi bez grafického uživatelského rozhraní, který je založený na linuxovém Debianu a optimalizovaný pro Raspberry Pi. Pro samotný software centrální jednotky byl využit skriptovací programovací jazyk Python. Ten díky široké škále knihoven, které lze do projektu snadno importovat, usnadňuje vývojáři práci.

Pro obsluhu GPIO pinů a periférií Raspberry jako SPI a UART byla využita knihovna *wiringpi*. UDP komunikaci s Node-RED serverem zabezpečovala knihovna *socket* a možnou HTTP komunikaci s RESTovým serverem knihovna *requests*.

6.3.2 Struktura aplikace – vícevláknový přístup

Z hlediska logické struktury byla aplikace rozdělena na hlavní vlákno a objekt reprezentující připojené měřicí jednotky tvořený 3 vlákny.

Úkolem hlavního vlákna je neustálá a nepřerušovaná obsluha LoRa modulu – přijímání a odesílání paketů. Tato obsluha musí probíhat neustále a nesmí být závislá na jiných okolnostech zdržujících její průběh, jako je komunikace s Node-RED serverem či zpracovávání přijatých informací. Modul je nastaven v režimu kontinuálního příjmu, ze kterého může vystoupit pouze pokud je do odesílací fronty umístěn paket k odeslání.

Objekt reprezentující měřicí jednotku je tvořen celkem třemi vlákny a obsahuje TX frontu pro UDP pakety na server, RX frontu dohromady pro přijaté UDP pakety ze serveru a rádiové pakety z měřicích jednotek a odkaz na TX frontu pro odesílané rádiové pakety (pro všechny jednotky společně). V prvním vláknu *worker* probíhá stavový automat aplikace, zpracování přijatých naměřených dat, jejich úprava, formátování do JSONu a logování. Zpracovaná data jsou prostřednictvím druhého vlákna *sender* odesílána přes UDP soket do Node-RED serveru. Pro příjem dat z Node-RED serveru slouží třetí vlákno *receiver*.

Vícevláknový přístup byl v centrální jednotce navržen zejména kvůli požadavku na neblokující řešení událostí. Aplikace po přijetí rádiového paketu z měřicí jednotky, která na něj očekává odpověď, neblokuje komunikaci, dokud nejsou data přijata ze serveru, ale pokračuje v cyklu a zpracovávání dalších

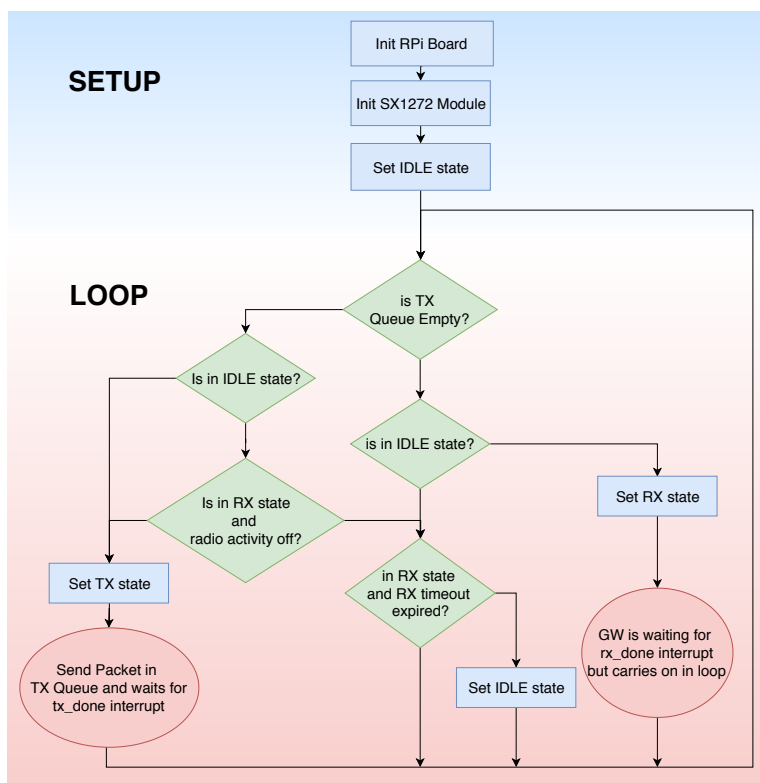
událostí. Příslušná odpověď na rádiovou zprávu ze serveru je nejprve přijata vláknem *receiver* a následně umístěna do RX fronty, kterou kontroluje vlákno *worker* a na kterou reaguje odesláním požadované rádiové odpovědi měřicí jednotce na základě přijatých informací ze serveru.

Vícevláknový přístup také umožňuje řešit asynchronní události ze serveru, které přichází z webového rozhraní například při požadavcích na změnu konfigurace nebo restartování měřicích jednotek.

6.3.3 Řízení přístupu k rádiovému rozhraní

Jelikož centrální jednotka umožňuje komunikovat s více měřicími jednotkami, je třeba brát ohled na přístup k rádiovému rozhraní.

V danou chvíli se totiž může stát, že jedna jednotka bude chtít odesílat informace o měření a druhá bude z brány přijímat konfiguraci.



Obrázek 6.4: Hlavní smyčka obsluhující LoRa modul.

Zprávy ze všech komunikujících měřicích jednotek jsou přijaty v hlavním vlákně brány a to s nimi nakládá podle modelu producent-konzument. Přijatý paket tedy rozešle všem objektům reprezentujícím měřicí jednotky (umístí jej do RX front) a ty jej zpracují, pokud je pro ně paket určený (odpovídá parametr *sessionId*).

Zprávy, které potřebuje brána odeslat daným měřicím jednotkám, jsou nejprve

vytvořeny v příslušném vláknu a přes společnou odesílací frontu jsou sdíleny s hlavním vláknem.

Pro bránu je prioritní downlink – odesílání zpráv z brány. V hlavním cyklu se vždy kontroluje podmínka, zda je odesílací fronta prázdná. Pokud je prázdná, přechází brána do RX (přijímacího) módu, ve kterém setrvává až do vypršení timeoutu. Jakmile se tak stane a v odesílací frontě se objeví paket, je okamžitě odeslán a pokračuje se v cyklu (viz 6.4).

6.4 Aplikační IoT server a databáze

Aplikační server a databáze jsou logicky odděleny od centrální jednotky na Raspberry a mohou být umístěny kdekoliv na internetu, což umožňuje větší modularitu celého systému. Ve vytvořené demo aplikaci byly ale všechny části umístěny na Raspberry. Data s naměřenými hodnotami jsou po odeslání z centrální jednotky přes UDP soket umístěna do databáze. K vizualizaci slouží jednoduché uživatelské rozhraní, které data získává opětovnými SQL dotazy na databázi.

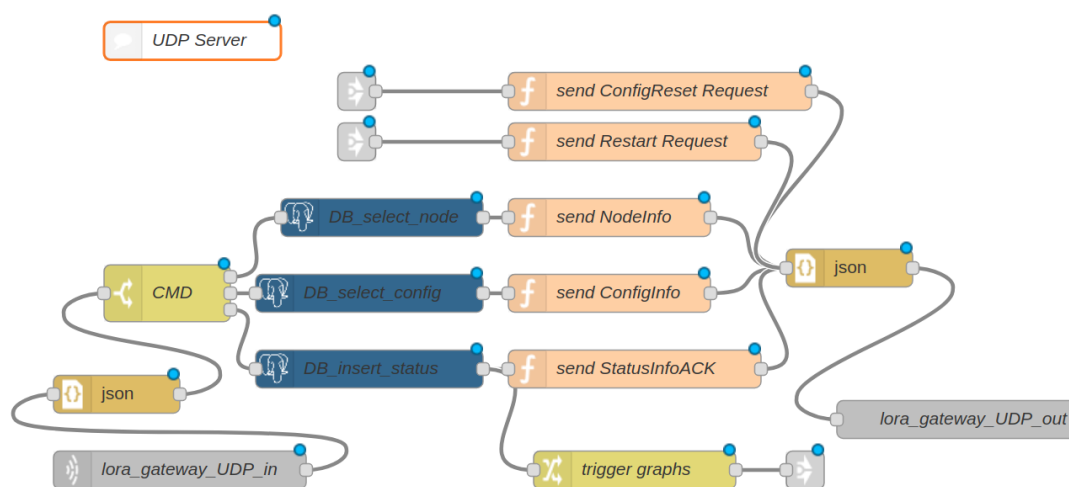
6.4.1 Použité softwarové nástroje

Aplikační server byl vytvořen na platformě Node-RED [19]. Tento nástroj, vyvíjený společností IBM, je postavený na javascriptovém serveru Node.js a uživateli umožňuje pohodlně propojovat hardwarová zařízení, APIs (aplikační rozhraní) a online služby za pomoci flowchartového programování a to vše ve webovém rozhraní. Uživatelské rozhraní bylo v Node-RED vytvořeno za pomoci doplňku *node-red-dashboard* a komunikace s databází pomocí *node-red-postgres*. Funkce pro obsluhu grafů, příjem a úpravu dat a ostatní logika serveru byla napsána v programovacím jazyce JavaScript.

Pro ukládání dat byla využita opensourcová databáze PostgreSQL [20]. Jedná se o relační databázi, kde jednotlivé klíče (unikátní identifikátory typu UUID) udávají vztahy mezi tabulkami a záznamy v databázi, což lze dobře vidět na datovém modelu aplikace na obrázku 6.9.

6.4.2 Komunikace s řídicí jednotkou

Centrální jednotka komunikuje z příslušných vláken reprezentujících měřicí jednotky se serverem prostřednictvím UDP soketu a textového protokolu ve formátu JSON. Veškeré dotazy na server jsou směřovány na port 8888 a jsou zpracovávány podle parametru *CMD* definujícího typ požadavku a parametru *idLoraNode* určujícího konkrétní jednotku. Odpověď je odesílaná na stejný port, ze kterého dotaz přišel. Jediný případ, kdy samotný server



Obrázek 6.5: Program pro obsluhu UDP socketu serveru.

zasílá požadavek centrální jednotce, nastává při změně konfigurace jednotky nebo při jejím restartování a je směřován na port, který je pro příslušnou jednotku uložen v databázi.

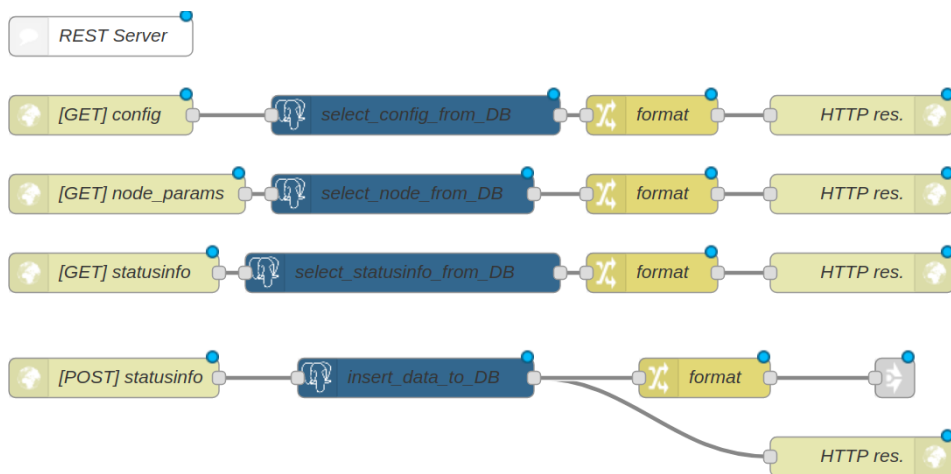
6.4.3 Komunikace s aplikacemi třetích stran – REST API

Krom řídicí jednotky je server připraven poskytovat data i aplikacím třetích stran, k čemuž slouží rozhraní vybudované na základě REST-JSON. S tímto rozhraním pak může komunikovat jakákoli další klientská aplikace, tedy například webový interface, který data získává pomocí javascriptu, nebo další připojený systém, což umožňuje koncovému uživateli velikou flexibilitu a rozšiřuje možnosti využití systému.

Data z databáze lze získat přes HTTP GET dotaz na url reprezentující jednotlivé tabulky v databázi (vypsané níže – 6.6), kde se v hlavičce dotazu specifikuje identifikační číslo – *idLoraNode* daného uzlu. IP adresa serveru se liší podle toho, kde je server umístěn, port je standardní – 1880. Jako odpověď přichází záznamy z databáze ve formátu JSON. Pro přesnější výsledky je v rozhraní systému umožněno SQL-like dotazování použitím základních SQL struktur (parametry WHERE, ORDERBY, LIMIT... v těle GET dotazu). Data lze přes RESTové rozhraní do databáze také uměle přidávat přes POST dotaz na stejné url adresy jako v případě čtení dat.

```
http://<Node-RED ip>:1880/lora_nodered/config
http://<Node-RED ip>:1880/lora_nodered/nodeinfo
http://<Node-RED ip>:1880/lora_nodered/statusinfo
```

Obrázek 6.6: Seznam URL adres namapované na údaje v databázi.



Obrázek 6.7: Program pro obsluhu RESTového serveru.

6.4.4 Datový model

Pro účely aplikace byl vytvořen datový model, postavený na principech relačních databází, který je znázorněn na obrázku 6.9. Databáze je tvořena celkem čtyřmi tabulkami, z nichž nejvýznamnější je *StatusInfo*, ve které jsou uložena data z měření, a *LoRaNode* s údaji o měřicích jednotkách. Tabulky *Configuration* a *ConfigurationValue* slouží pro vytvoření konfigurovatelných parametrů a jejich konkrétní hodnoty pro dané měřicí jednotky.

```

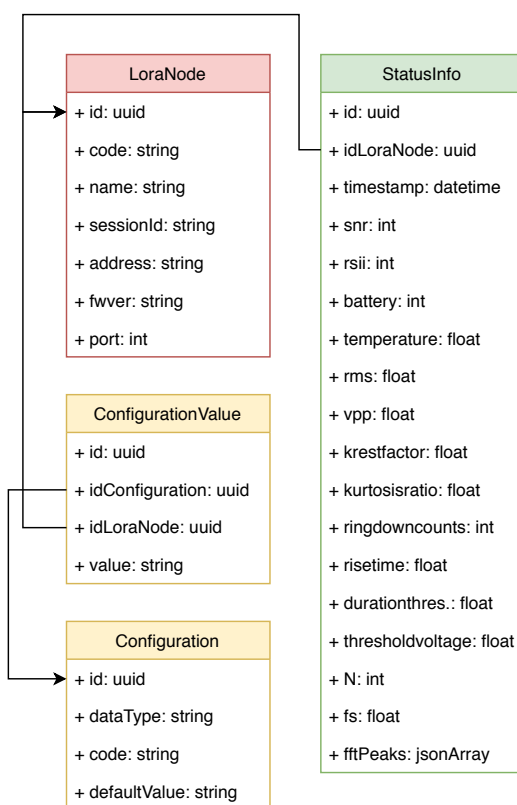
SELECT "datatype", value, code
FROM app_configuration_value a
JOIN app_configuration b
ON a.idsetting = b.idsetting
WHERE idobjectrelated = '{{msg.payload}}';

```

Obrázek 6.8: Ukázka SQL query pro výběr konfigurace příslušné jednotky z databáze.

6.4.5 Uživatelské rozhraní

V rámci serveru bylo vytvořeno také jednoduché uživatelské rozhraní. Po vybrání konkrétní jednotky ze seznamu, lze v druhém a třetím panelu (obrázky 7.7 a 6.11) na příslušných grafech pozorovat časové změny monitorovaných veličin – teploty, RMS, stavu baterie, krest faktoru, nejvýznamnějších maxim v amplitudovém frekvenčním spektru. . . V prvním panelu se nachází dodatečné informace o RSSI, SNR a časové známce posledního přijatého paketu a formulář, v němž lze změnit konfiguraci jednotky, která se poté uloží po stisknutí tlačítka Load Config do databáze a pokud je jednotka připojena,

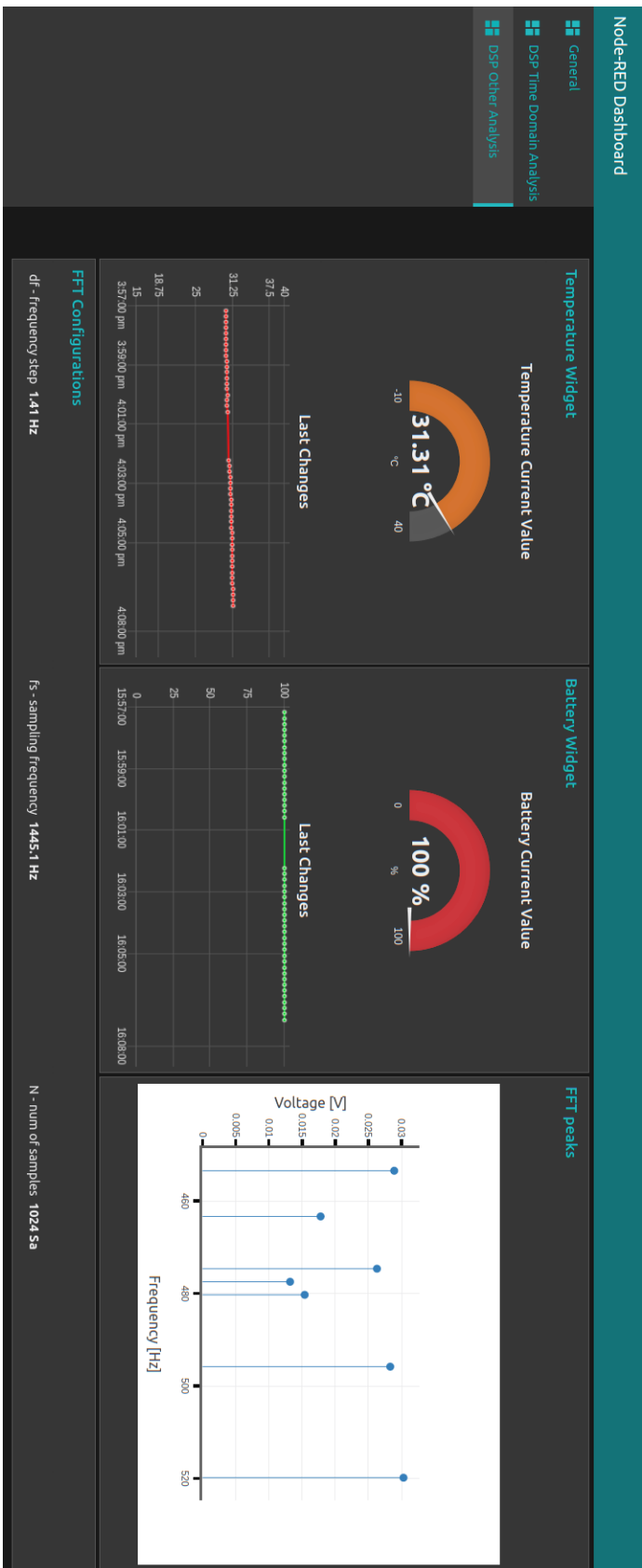


Obrázek 6.9: UML diagram datového modelu aplikace.

dojde k jejímu resetování (viz. kapitola 6.1.1). Pro vrácení jednotky do původního stavu slouží tlačítko Restart (viz obrázek 6.10).



Obrázek 6.10: První panel uživatelského rozhraní pro nahrání konfigurace.



Obrázek 6.11: Druhý panel uživatelského rozhraní.

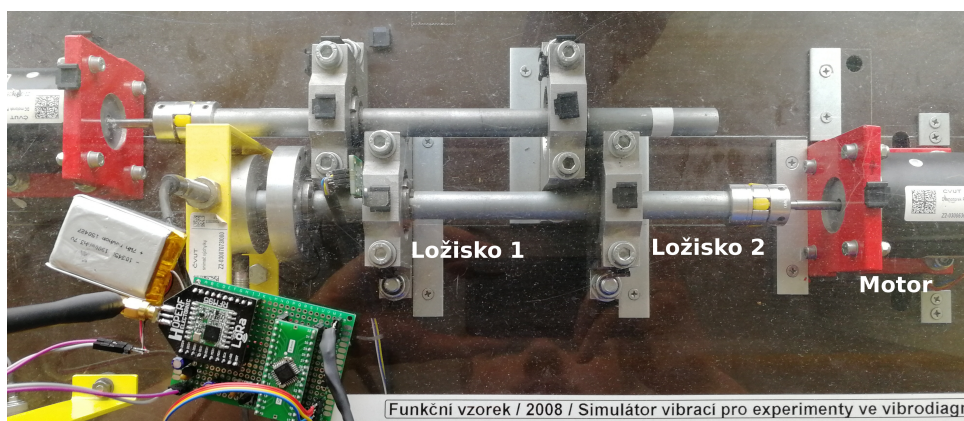
Kapitola 7

Testování systému

V rámci práce byly také provedeny dva experimenty na simulátoru vibrací (obrázek 7.1), jež slouží pro účely předmětu Diagnostika a testování.

První rotační soustava, na které byly experimenty prováděny, je tvořena stejnosměrným motorem, ložiskem bez poruchy (ložisko 2), hřídelí a poškozeným ložiskem s trhlinou na vnějším kroužku (ložisko 1). Druhá soustava s oběma ložiskami bez poruchy bohužel nebyla funkční, a nemohla tak posloužit jako reference stavu bez poškození, a proto jsme nedokázali určit, jak moc jsou vibrace způsobené trhlinou z prvního ložiska přenášeny přes hřídel na druhé ložisko.

Akcelerometr byl v obou případech připevněn na ložisko tak, aby měřil vibrace v ose kolmé k ose motoru.



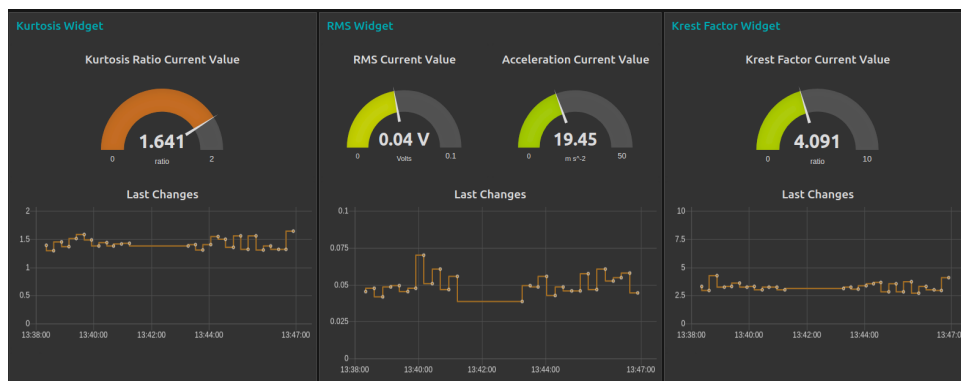
Obrázek 7.1: Rotační zařízení včetně navržené měřicí jednotky.

7.1 První experiment – nevyváženost osy

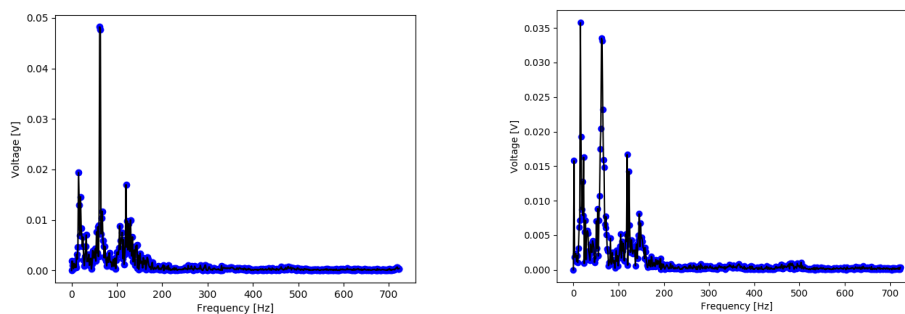
V prvním experimentu jsme se snažili pomocí analyzovaných příznaků detekovat nevyváženost osy, kdy byl vsazen do válcového tělesa upevněného

k hřídeli nevyvážek (šroub), a způsobil tak její drobné vychylování. Motor byl roztočen na 3000 otáček za minutu, vzorkovací frekvence AD převodníku byla nastavena na 1.5 kHz, FFT se vypočítávalo z 1024 vzorků, data byla odesílána do centrální jednotky v desetisekundových intervalech.

Nejdříve bylo druhé ložisko monitorováno bez šroubu. Následně byl systém pozastaven (lze vidět na grafech v obrázku 7.2), do kola byl vsazen šroub a v monitorování se pokračovalo. Na závěr bylo pro případ se šroubem i bez něj v debugovacím módu aplikace odesláno celé amplitudové spektrum.



Obrázek 7.2: První experiment – časový průběh RMS, krest faktoru a kurtosis ratio.



(a) : Amplitudové spektrum před vsazením šroubu.

(b) : Amplitudové spektrum po vsazení šroubu.

Obrázek 7.3: První experiment – amplitudová spektra.

7.1.1 Výsledky

Z hlediska příznaků pracujících s vibračním signálem v časové oblasti experiment ukázal, že pro přítomnost šroubu, a tím vzniklou nevyváženost osy, nejsou monitorované veličiny, krest faktor a kurtosis ratio příliš směrodatné. Hodnoty krest faktoru a kurtosis ratio spíše poskytuje informace o poruchách, které způsobují občasně impulsy s nadměrnou amplitudou (kapitoly 4.3.1 a 4.3.1).

V amplitudovém spektru vibrací před vložením šroubu (obrázek 7.4a) byl nejvýznamnější pík na 53 Hz, který zhruba odpovídal otáčkám motoru 3000 RPM, a 110 Hz odpovídající první harmonické frekvenci. Třetí nejvýraznější pík se nacházel na frekvenci 16 Hz a jeho původ se nepodařilo objasnit. Mohl souviset s přítomností trhliny na poškozeném ložisku nebo s vlastními rezonancemi soustavy. Vsazení šroubu se na amplitudovém spektru jasně projevilo, přibylo mnoho nových extrémů, které byly dokonce výraznější než původních 53 Hz (obrázek 7.4b).

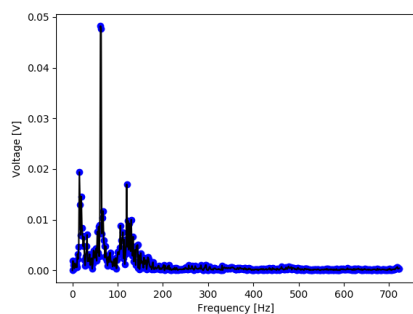
Frekvenční spektrum tak opravdu podává mnohem komplexnější informace nežli časové průběhy, což potvrdilo závěry v kapitole 4.3.

7.2 Druhý experiment – přítomnost trhliny ve vnějším kroužku ložiska

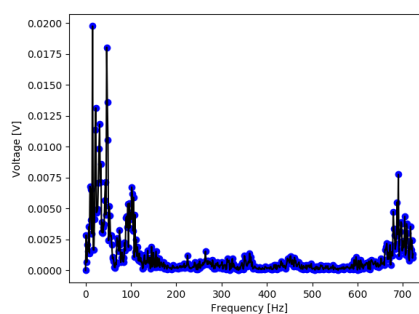
V druhém experimentu jsme se snažili pomocí analyzovaných příznaků detekovat přítomnost trhliny na prvním ložisku. Trhlina způsobuje výskyt drobných impulsů v signálu, které by měly ovlivňovat hodnoty průběhů krest faktoru a kurtosis ratio.

Parametry motoru a měřicí jednotky byly nastaveny stejně jako v prvním experimentu.

Nejdříve bylo monitorováno první ložisko s trhlinou, poté byl systém pozastaven a akcelerometr umístěn na druhé ložisko a v monitorování se pokračovalo. Na závěr bylo opět v obou dvou případech odesláno celé amplitudové spektrum.



(a) : Amplitudové spektrum nepoškozeného ložiska.

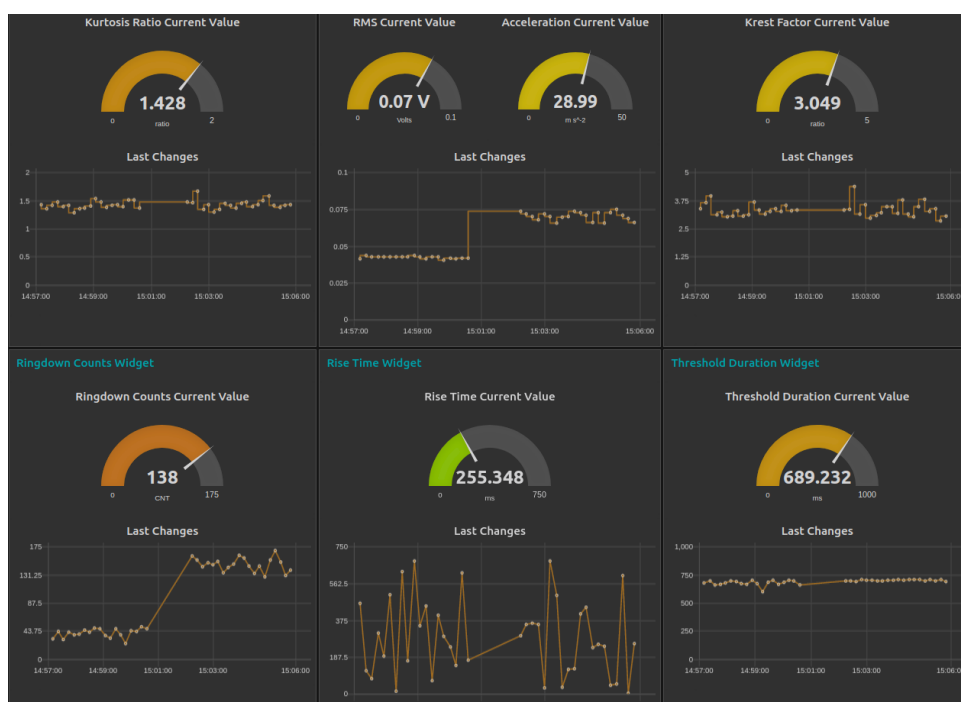


(b) : Amplitudové spektrum ložiska s trhlinou.

Obrázek 7.5: Druhý experiment – amplitudová spektra.

7.2.1 Výsledky

Nakonec i v druhém experimentu se hodnoty kurtosis ratio a krest faktoru po přesunu akcelerometru na druhé ložisko nezměnily, i když přítomnost trhliny



Obrázek 7.7: Druhý experiment – časové průběhy.

by pomocí nich měla být detekovatelná. Po diskusi s vedoucím práce jsme došli k závěru, že pro větší vypovídající hodnotu těchto příznaků, bychom potřebovali druhé referenční zařízení zcela bez poruchy. Dále by bylo třeba navrhnout pásmovou propust, která by vyfiltrovala signál od frekvence motoru a jejích vyšších harmonických složek, které výrazně převládají ve výpočtu, a nedovolují tak menším změnám, aby se projevíly. Návrh digitálních filtrů byl ovšem nad zbylé časové možnosti.

Změny se vyskytly v hodnotách RMS a ringdown counts, které se po přesunu akcelerometru na druhé ložisko zvýšily, což mělo ovšem zřejmě důvod ve větší blízkosti k motoru, a tudíž větší amplitudě vibrací, a nikoliv v přítomnosti trhliny.

Amplitudové spektrum přineslo podobné výsledky jako v prvním experimentu, a i zde se tedy ukázalo jako lepší ukazatel.

Kapitola 8

Závěr

Tato práce popisuje vývoj komplexního systému pro monitorování stavu rotačních průmyslových zařízení pomocí analýzy vibrací a teploty. Pro sběr dat z akcelerometru a teplotního čidla, jejich předzpracování a výpočtu signálových analýz byla navržena měřicí jednotka postavená na mikrokontroléru STM32L072 a komunikující s centrální jednotkou přes LoRa síť prostřednictvím modulu RFM95W. Mezi nejdůležitější signálové vlastnosti, které jednotka vypočítává, patří hlavně RMS, krest faktor, kurtosis ratio a spektrální amplitudová maxima. Tato data slouží k odhadu možné poruchy stroje, jak bylo ověřeno během experimentu na reálném motoru. Měřicí jednotky jsou uspořádány ve hvězdicovité topologii, přihlašují se, žádají o zaslání konfigurace a odesílají naměřená a vypočtená data centrální jednotce.

Ve středu systému stojí centrální jednotka (LoRa brána), prostředník mezi měřicími jednotkami a aplikačním serverem, jež řídí rádiovou komunikaci a je postavena na mikropočítači Raspberry Pi využívající stejný LoRa modul jako měřicí jednotky. Díky tomuto modulu je brána sice mnohem levnější, ale pouze jednokanálová, dovolující komunikaci v jednu chvíli pouze s jednou jednotkou. Proto byl brán zvláštní ohled na efektivitu a rychlost rádiové komunikace.

Aplikační server využívá platformy Node-RED a databázi PostgreSQL a je od centrální jednotky zcela logicky oddělen (v rámci vytvořené demo aplikace ale také běží na Raspberry Pi). Centrální jednotka odesílá naměřená data do aplikačního serveru přes UDP soket a server je ukládá do databáze. Přes webové rozhraní poté může uživatel analyzovat data prostřednictvím mnoha grafů a zároveň pomocí něj konfigurovat jednotlivé měřicí jednotky.

Během celé práce byl kladen důraz především na tuto konfigurovatelnost. Uživatel si může vytvořit pro každou jednotku vlastní konfiguraci, která je poté centrální jednotkou nahrána do příslušného zařízení. Pozornost byla také věnována dodržení moderních konceptů IIoT a cloud computingu, a proto jsou naměřená data a konfigurační údaje uložena v databázi a přístupná aplikacím třetích stran přes RESTový server k dalším analýzám.

Na závěr byl celý systém otestován na reálném simulátoru vibrací, při kterém bylo rotační zařízení vždy monitorováno nejdříve bez poruchy a poté s určitou poruchou. Následně byly monitorované veličiny porovnány a byl zhodnocen jejich přínos a vypovídající hodnota.

8.1 Budoucí práce

Zkouška funkcionality celého systému na reálném motoru, která byla bohužel provedena až v posledních týdnech, pomohla podhalit náročnost a komplexnost celé vibrační diagnostiky jako takové. Aplikované analýzy signálu se mohou rychle stát bezcennými, pokud nejsou použity pro správné frekvenční rozsahy, a jejich vypovídající hodnota je tedy maximálně závislá na pre-processingu původního signálu (odstranění střední hodnoty a základní filtrace nestačí). Kdybychom tedy chtěli naplno využít potenciál například krestfaktorů a kurtosis ratio, bylo by nutné před jejich použitím využít pásmové propusti a signál vyfiltrovat pro požadované frekvence. Pro detailnější a univerzálnější diagnostiku by také bylo vhodné použít dalších složitějších signálových analýz jako například kurtogramu, jež byly ale pro implementaci na STM32L0 příliš výpočetně náročné, nebo využít zcela odlišného senzoru a analýz jako HFRT (High Frequency Resonance Technique). V dalších verzích by se tedy také mohl objevit výpočetně mocnější mikrokontrolér z nových řad STM.

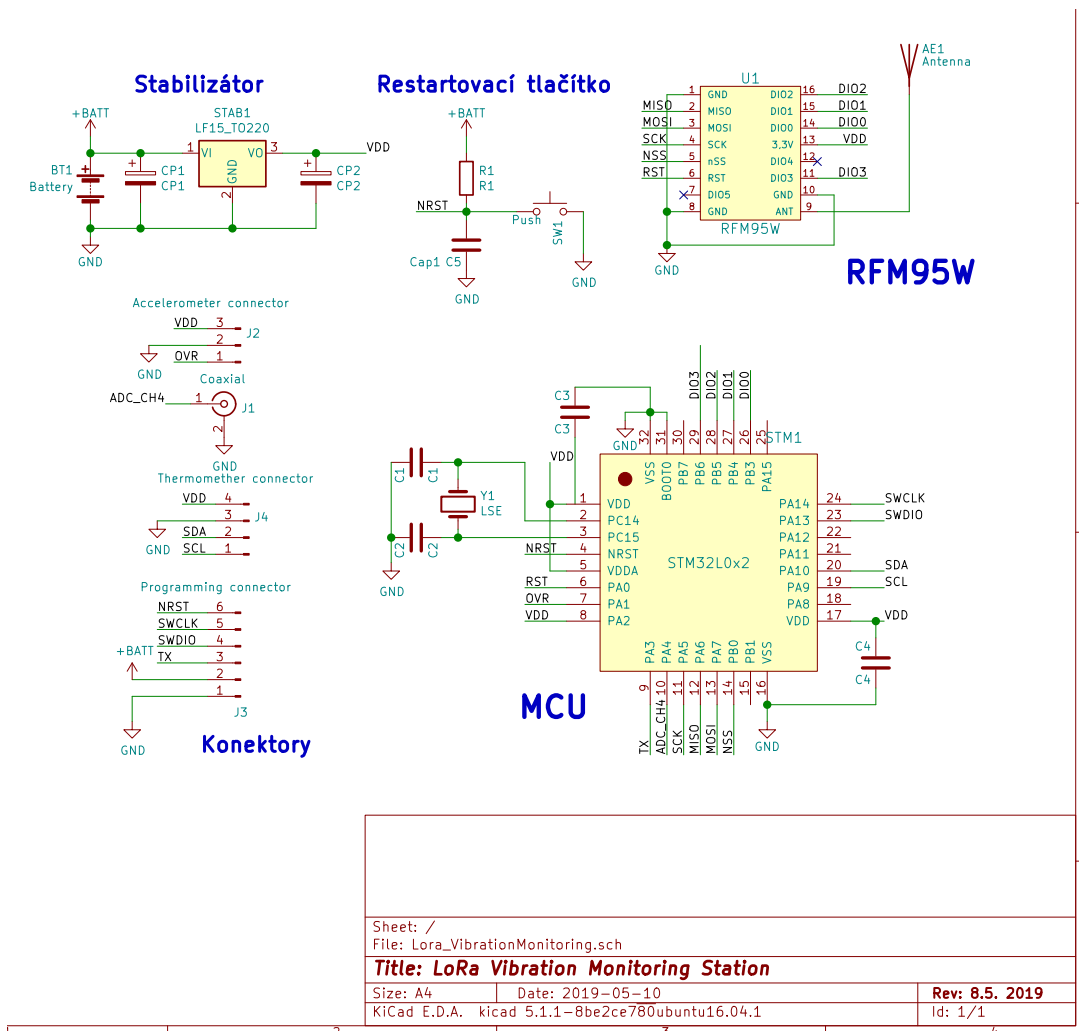
Co se komunikačního řetězce týče, tak pro nasazení systému i s větším počtem monitorovacích jednotek by bylo vhodné postavit bránu na dražších LoRa čípech určených přímo pro multikanálové brány, čímž by se docílilo rychlejší a spolehlivější komunikace. LoRa jako bezdrátová technologie se poměrně ověřila, ale na druhou stranu by bylo třeba provést testy dosahu, propustnosti v průmyslovém prostředí a také testy výdrže baterie. Během práce byla komunikace testována pouze v „kancelářském“ prostředí do vzdáleností desítek metrů.

Teplotní čidlo TMP75 není příliš vhodné do průmyslového prostředí a mělo by se nahradit vhodnějším senzorem.

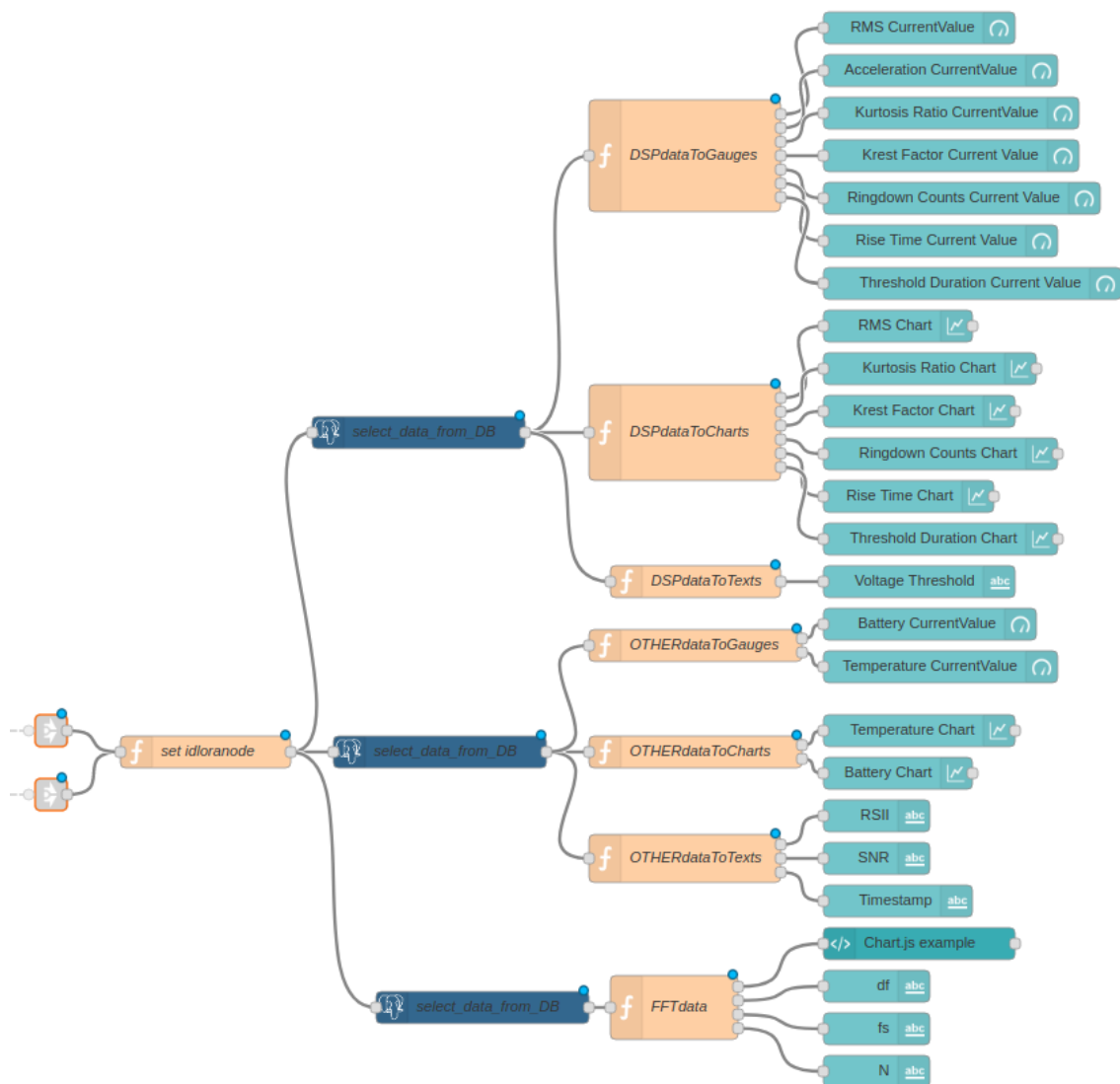
Z hlediska softwaru se Node-RED ukázal jako dobrý nástroj pro jednodušší aplikace. Jakmile se ale jeho kód postupně rozrůstal, bylo patrné, že pro komplexnější aplikace je flowchartové programování značně limitující a nepřehledné, a dále by proto bylo výhodnější využít jeden z moderních webových serverů jako Django nebo Node.js.

Příloha A

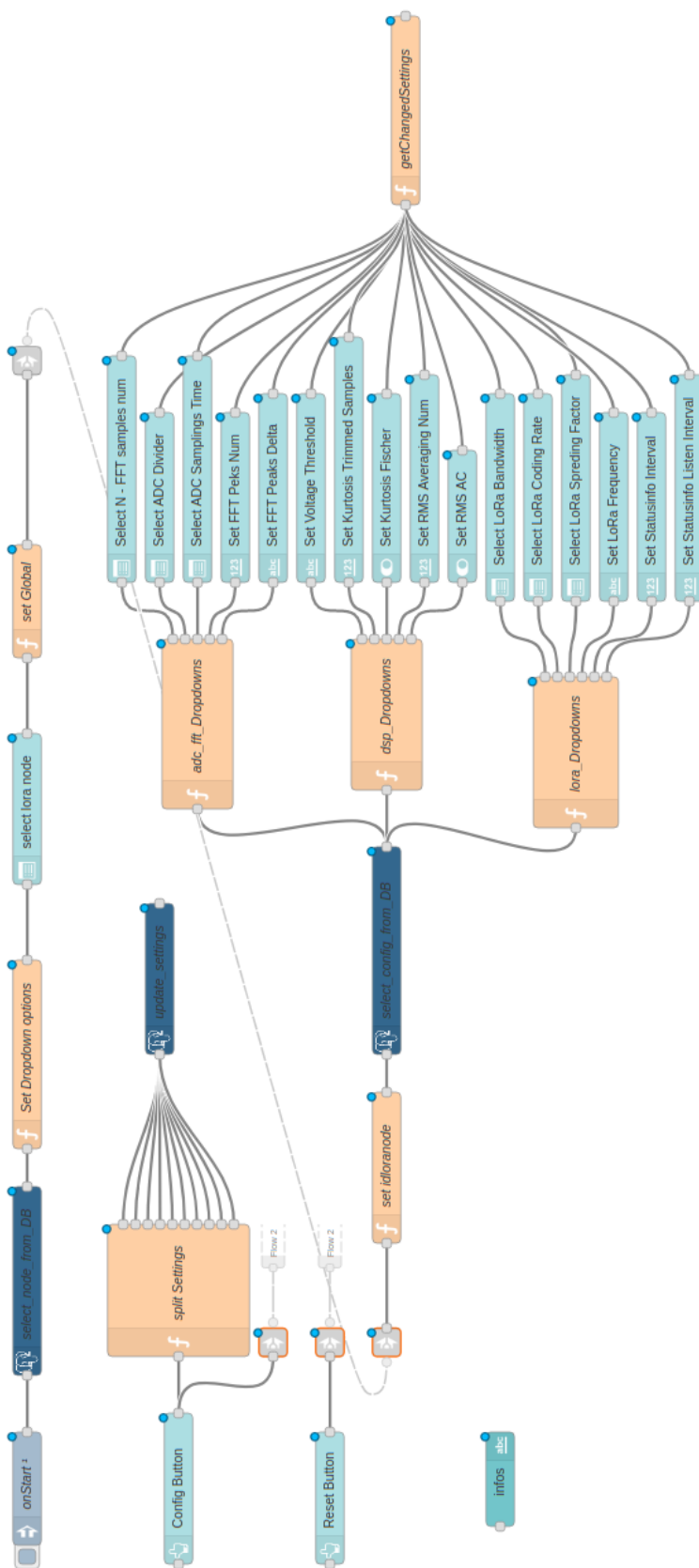
Přiložené obrázky, schémata, grafy



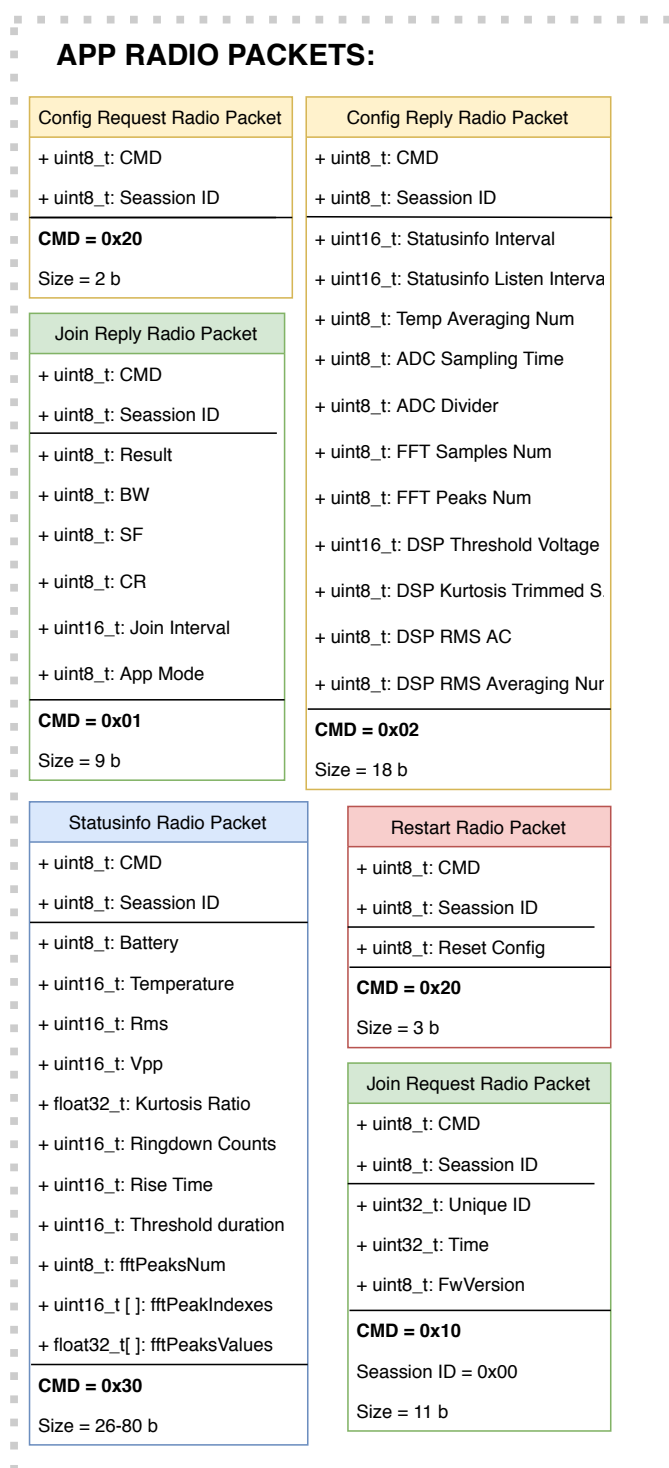
Obrázek A.1: Schéma zapojení monitorovací jednotky.



Obrázek A.2: Node-RED flowchartový program pro obsluhu grafů.



Obrázek A.3: Node-RED flowchartový program pro obsluhu konfigurace.



Obrázek A.4: Přehled rádiových paketů použitých v aplikaci.

Příloha B

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
API	Application Programming Interface
CBM	Condition Based Maintenance
CSS	Chirp Spread Spectrum (modulation)
DMA	Direct Memory Access
DSI	Display Serial Interface
EMC	Electromagnetic Compatibility
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology (protocol)
FEC	Forward error correction (codes)
FFT	Fast Fourier Transform (algorithm)
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPIO	General Purpose Input Output
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HART	Highway Addressable Remote Transducer (protocol)
HSE	High Speed External (oscillator)
HSI	High Speed Internal (oscillator)
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
I ² C	Inter-Integrated Circuit
JSON	JavaScript Object Notation
LNA	Low Noise Amplifier
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
MCU	Microcontroller
NB-IoT	Narrow Band-Internet of Things

Zkratka	Význam
PA	Power Amplifier
PLL	Phase-Locked Loop
PROFINET	Process Field Network
RAM	Random Access Memory
REST	REpresentational State Transfer
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RMS	Root Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTC	Real Time Clock
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SF	Spreading Factor
SMA	SubMiniature version A (connector)
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SQL	Structured Query Language
TBM	Time Based Maintenance
UDP	User Datagram Protocol
UUID	Universally Unique Identifier
USART	Universal Synchr./Asynchr. Receiver Transmitter

Příloha C

Literatura

- [1] ABB, *Abb condition monitoring products*. <https://new.abb.com/power-generation/instrumentation/condition-monitoring>. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [2] ANALOG DEVICES, *Datasheet Low Noise, High Frequency MEMS Accelerometers ADXL1001/1002*. [Online; Dostupné 22-5-2019 z <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL1001-1002.pdf>].
- [3] F. BAUDART, *Vibration monitoring for water equipment*. <https://www.watertechonline.com/vibration-monitoring-industrial-water-equipment/>, Říjen 2018. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [4] A. BEHR, *Lpwan as the new sensor communication infrastructure for iiot*. <https://www.automation.com/automation-news/article/lpwan-as-the-new-sensor-communication-infrastructure-for-iiot>, Srpen 2018. [Online; Dostupné 14-5-2019].
- [5] BRÜEL & KJAER SOUND VIBRATION MEASUREMENT, *Product data The NEXUS Range of Conditioning Amplifiers Types 2690, 2691, 2692 and 2693*. [Online; Dostupné 15-5-2019 z <https://www.bksv.com/media/doc/bp1702.pdf>].
- [6] O. FIDRA, *LoRaWAN BASED MONITORING SYSTEM*, bakalářská práce, České Vysoké učení technické, Zikova 1903/4 Praha, 2018.
- [7] FLEXSCADA, *Flexscada vibration monitoring products*. <https://flexscada.com/vibration-monitoring>. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [8] FLUKE, *Fluke vibration monitoring products*. <https://www.fluke.com/en-us/products/condition-monitoring/vibration>. [Online; Dostupné 15-5-2019].

- [9] A. GRILO, *Educational material: Lorawan: An introduction*. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335603030/LoRaWAN%20Introduction.pdf>, 2018. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [10] C. GROSSE, *Characteristics of burst signal*. <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=483>, Červenec 2002. [Online; Dostupné 10-5-2019].
- [11] HOPERF ELECTRONIC, *Datasheet RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module*. [Online; Dostupné 22-5-2019 z https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf].
- [12] IFM, *Ifm systems for vibration monitoring and diagnostics*. https://www.ifm.com/gb/en/category/070/070_010. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [13] M. KRUPA, *Prediktivní údržba a metody technické prognostiky*. <https://www.bozpinfo.cz/josra/prediktivni-udrzba-metody-technicke-prognostiky>, Leden 2012. [Online; Dostupné 22-5-2019].
- [14] L. LANGNAU, *Industrial ethernet takes the lead over fieldbuses, says study*. <https://www.designworldonline.com/industrial-ethernet-takes-the-lead-over-fieldbuses-says-study/>, Květen 2019. [Online; Dostupné 17-5-2019].
- [15] M. LOM, *Sítě pro internet věcí v České republice*. <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [16] MANUKA, *Introducing lora*. <https://www.instructables.com/id/Introducing-LoRa-/>, 2006. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [17] MULTITECH, *Cellular connectivity for distribution automation*. <https://www.multitech.com/>. [Online; Dostupné 22-5-2019].
- [18] J. NEUŽIL, *DISTRIBUTED SIGNAL PROCESSING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR DIAGNOSTICS*, dizertační práce, České Vysoké učení technické, Žitná 1903/4 Praha, 2016.
- [19] NODE-RED, *Flow-based programming for the internet of things*. <https://nodered.org/>. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [20] POSTGRESQL, *Postgresql: The world's most advanced open source relational database*. <https://www.postgresql.org/>. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [21] R. B. RANDALL, *Vibration-based Condition Monitoring*, John Wiley & Sons, 2011.

- [22] RASPBERRYPI.ORG, *Raspberry Pi hardware*. [Online; Dostupné 17-5-2019 z <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md>].
- [23] O. SDRUŽENÍ ČESKÝCH ZKUŠEBEN A LABORATOŘÍ, *Poruchy ložísek*. <https://www.sczl.cz/download/download/2011-boretice/13-zkl-kotlan-vady-lozisek.pdf>, 2011. [Online; Dostupné 15-5-2019].
- [24] SEMTECH, *LoRa Modulation Basics*. [Online; Dostupné 17-5-2019 z <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>].
- [25] E. SISINNI, *Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions*, IEEE Std. 1516-2000, (2018).
- [26] ST MICROELECTRONICS, *I-CUBE-LRWAN*. [Online; Dostupné 18-5-2019 z <https://www.st.com/en/embedded-software/i-cube-lrwan.html>].
- [27] ST MICROELECTRONICS, *Datasheet STM32L072x8, STM32L072xB, STM32L072xZ*. [Online; Dostupné 15-5-2019 z <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l072kz.pdf>].
- [28] ST MICROELECTRONICS,, *X-CUBE-DSPDEMO*. [Online; Dostupné 18-5-2019 z <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-dspdemo.html>].
- [29] TEXAS INSTRUMENTS, *Datasheet TMPx75 Temperature Sensor With I2C and SMBus Interface in Industry Standard LM75 Form Factor and Pinout*. [Online; Dostupné 22-5-2019 z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp175.pdf>].
- [30] THETHINGSNETWORK, *Official website about open lorawan network*. <https://www.thethingsnetwork.org/>. [Online; Dostupné 12-5-2019].
- [31] J. VAAS, R. ŠMÍD, AND R. B. RANDALL, *Avoidance of speckle noise in laser vibrometry by the use of kurtosis ratio: Application to mechanical fault diagnostics*, *Systems and Signal Processing*, 22, p. 647–671 (2007).
- [32] R. ŠMÍD, *B3m38di, oficiální stránky předmětu diagnostika a testování*. <https://moodle.fel.cvut.cz/courses/B3M38DIT>, 2019. [Online; Dostupné 23-5-2019].



Příloha D

CD