



Diplomová práce

Bezdrátový přenos diagnostických dat pro účely prediktivní údržby

Studijní program:

N0714A270010 Mechatronika

Autor práce:

Bc. Marek Hejduk

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Bezdrátový přenos diagnostických dat pro účely prediktivní údržby

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Marek Hejduk
<i>Osobní číslo:</i>	M21000174
<i>Studijní program:</i>	N0714A270010 Mechatronika
<i>Zadávací katedra:</i>	Ústav mechatroniky a technické informatiky
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se problematikou vibrodiagnostiky, najděte vhodné senzory a metody zpracování dat pro účely prediktivní údržby vybraných průmyslových strojů.
2. Najděte a porovnejte různé technologie pro bezdrátový přenos dat, používané v průmyslovém prostředí. Vyberte z těchto technologií dvě nejvhodnější pro účely přenosu dat z vibrodiagnostiky a otestujte jejich vlastnosti a limity pomocí zvolené IoT platformy. Realizujte pro každou z vybraných komunikačních technologií minimálně tři testovací koncové uzly.
3. Na základě předcházejících testů zvolte vhodnou cílovou IoT platformu a technologii pro přenos dat. Navrhněte, realizujte a otestujte vlastní diagnostický modul, včetně vývoje firmware s software pro sběr a vizualizaci dat.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 až 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2057-6.
- [2] LOM, Michal a Ondřej PŘIBYL. Sítě pro internet věcí v České republice [online]. Praha: TZB-info, 2017 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://elektro.tzbinfo.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internetveci-v-ceske-republice>.
- [3] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. Praha: Český telekomunikační úřad, 2021. Č. VO-R/10/07.2021-8. Dostupné také z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf>.
- [4] LoRaWAN, Sigfox nebo NB-IoT? Srovnání 3 významných typů IoT sítí [online]. České Radiokomunikace, 2020 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti>.

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2024

L.S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Bezdrátový přenos diagnostických dat pro účely prediktivní údržby

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje návrhu vibrodiagnostického bezdrátového modulu. Ten je určen pro účely preventivní údržby výrobních strojů v průmyslovém prostředí. První část se věnuje vibrodiagnostice, příčině vzniku vibrací, jejich měření a vyhodnocování. Ve druhé části jsou popsány nejčastější bezdrátové technologie, včetně jejich použití, vlastností, výhod, nevýhod a omezení. Třetí část se zabývá samotným návrhem modulu. Nejprve byly vybrány dvě vhodné ze zmíněných bezdrátových technologií a pro každou z nich byla realizována měřicí síť. V závěru práce jsou obě řešení porovnány a byla vybrána jedna varianta pro fyzickou realizaci modulu.

Klíčová slova: Vibrodiagnostika, bezdrátová komunikace, mesh, IQRF, Wi-Fi

Wireless transmission of diagnostic data for predictive maintenance purposes

Abstract

The diploma thesis is devoted to the design of a vibrodiagnostic wireless module. It is intended for preventive maintenance of production machines in an industrial environment. The first part is devoted to vibrodiagnostics, the cause of vibrations, their measurement and evaluation. The second part describes the most common wireless technologies, including their use, features, advantages, disadvantages and limitations. The third part deals with the actual design of the module. Initially, two suitable wireless technologies were selected from the mentioned ones, and a measurement network was implemented for each of them. At the end of the thesis, both solutions are compared and one option was chosen for the physical implementation of the module.

Keywords: Vibrodiagnostics, wireless communication, mesh, IQRF, Wi-Fi

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Martincovi za jeho ochotný přístup a odborné rady, PhD. Petru Kulhavému, Střední Průmyslové Škole Jičín za poskytnutí možnosti používání místního vybavení a Vladimíru Šulcovi ze společnosti Microrisc za poskytnutí IQRF Transcieverů.

Obsah

Úvod	14
1 Vibrodiagnostika	15
1.1 Vibrace	15
1.2 Zdroje vibrací	16
1.3 Měření vibrací	22
1.4 Zpracování signálů	29
2 Technologie pro bezdrátový přenos dat	31
2.1 Topologie sítí	31
2.2 Bezdrátová komunikace	34
2.3 ISM pásma	34
2.4 Technologie Wi-Fi	36
2.5 Bluetooth	37
2.6 Síť GSM	37
2.7 Technologie LoRa	39
2.8 Technologie IQRF	40
2.9 Porovnání bezdrátových technologií	42
3 Hardwarové prvky modulu	44
3.1 Výběr řídicí platformy	44
3.2 Výběr bezdrátové technologie	47
3.3 Výběr akcelerometru	48
3.4 Napájení	50
3.5 Vypínač a LED dioda	50
3.6 Konektor IQRF	51
4 Vývoj software	52
4.1 WI-FI mesh varianta	52
4.2 IQMESH varianta	58
5 Porovnání obou řešení	71
5.1 Rychlost přenosu	71
5.2 Dosah	71
5.3 Spotřeba elektrické energie	73
6 Návrh desky plošných spojů	74
6.1 Kryt modulu	75
7 Závěr	77

Použitá literatura	78
Přílohy	83

Seznam obrázků

1.1	Vývoj poruchy v čase[1]	15
1.2	Parametry signálu[1]	16
1.3	Paralelní nesouosost [5]	17
1.4	Úhlová nesouosost [5]	17
1.5	Paralelně-úhlová nesouosost [5]	18
1.6	Statická nevyváženost [1]	18
1.7	Momentová nevyváženost [1]	19
1.8	Dynamická nevyváženost [1]	19
1.9	Vliv nesouososti a nevyváženosti na frekvenční spektrum [4]	20
1.10	Projevy volnosti mechanických částí [8]	20
1.11	Pohybové veličiny [12]	22
1.12	Optimální rozsahy frekvencí pro výběr měřené veličiny [12]	23
1.13	Směry vibrací [14]	24
1.14	závislost odezvy piezoelektrického akcelerometru na frekvenci [17]	25
1.15	Provedení piezoelektrických akcelerometrů [15]	26
1.16	Princip kapacitního akcelerometru [18]	26
1.17	Princip piezorezistivního akcelerometru [19]	27
1.18	Uchytení snímačů[13]	28
2.1	Topologie Point To Point [21]	31
2.2	Kruhová topologie [21]	32
2.3	Sběrníková topologie [21]	32
2.4	Topologie Hvězda [21]	33
2.5	Stromová topologie [21]	33
2.6	Topologie Mesh síť [21]	34
2.7	Rádiové spektrum [23]	34
2.8	Wi-Fi pásma [27]	36
2.9	Architektura GSM Sítě [32]	38
2.10	Topologie LoRa [36]	40
2.11	IQMESH [38]	40
2.12	IQRF Transceiver TR-76G [40]	41
2.13	IQRF Programmer CK-USB-04A [41]	42
3.1	Vývojová deska ESP32 [42]	45
3.2	Akcelerometr GY-521 [49]	49
3.3	Akcelerometr ADXL335 [50]	49
3.4	SIM konektor pro IQRF Transceivery [51]	51
3.5	Orientace Transceiveru [52]	51
4.1	Struktura měřicí sítě využívající Wi-Fi mesh	52

4.2	Výstupní text na COM portu	52
4.3	Struktura smyčky programu	53
4.4	Výstup z akcelerometru	55
4.5	Frekvenční charakteristika horní propusti prvního řádu [53]	55
4.6	Signály z akcelerometru po odstranění DC složky	56
4.7	Grafické zobrazení	58
4.8	Výstupní soubory	58
4.9	Struktura xlsx souboru	58
4.10	Struktura měřicí sítě využívající IQMESH	59
4.11	Vizualizace sítě v IQRF IDE	60
4.12	Pluginy a konfigurace v IQRF IDE	60
4.13	Princip komunikace s využitím módu CDC UART [55]	61
4.14	Znázornění zvoleného způsobu vyčítání dat	63
4.15	DPA Test v prostředí IQRF IDE	64
4.16	DPA příkaz - otevření sériového portu	64
4.17	DPA Write request	65
4.18	DPA Write response	65
4.19	Rámec HDLC	65
4.20	Výpočet HDLC	65
4.21	Struktura měřicí smyčky	66
4.22	Struktura komunikační smyčky	66
4.23	Výpis z terminálu	67
4.24	Výstup po inicializaci modulů	67
4.25	Nová žádost o data	68
4.26	Výstup v konzoli při přepisu hodnoty 7E	69
4.27	Výpis přijatých hodnot do konzole	69
4.28	Grafický výstup přijatých hodnot	69
5.1	Rozmístění modulů v dílně při testování	72
5.2	ESP32-S a TR-72D, vybavené konektory U.FL	73
6.1	Schéma zapojení	74
6.2	Návrh desky plošných spojů	75
6.3	Spodní část krytu	75
6.4	Vrchní část krytu	76
6.5	Krytý modul na stroji	76

Seznam tabulek

2.1	Vývoj verzí Wi-Fi [28]	37
2.2	Porovnání bezdrátových technologií	42
3.1	Parametry mikrokontroleru ESP32	45
3.2	Porovnání řídicích platforem	47
3.3	Výhody a nevýhody navržených řešení	47
3.4	Parametry akcelerometru ADXL335	50
4.1	Nastavení citlivosti akcelerometru MPU6050 [48]	54
4.2	Komunikační rychlosti	64

Seznam znaků a symbolů

c	kapacita
ε_0	permitivita vakua
ε_r	relativní permitivita materiálu
S	plocha(obsah)
d	vzdálenost

Seznam zkratek

ADC	Analog-digital converter
AP	Access Point
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CPU	Central Processor Unit
DC	Direct current
DFT	Discrete Fourier transform
DPA	Direct Peripheral Access
FFT	Fast Fourier transform
FT	Fourier transform
GPIO	General-purpose input/output
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
I2C	Inter-Integrated Circuit
LoRa	Long Range
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
PCB	Printed circuit boards
SF	Spreading Factor
RPM	Revolutions per minute
SPI	Serial Peripheral Interface
TR	Transciever
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
WAN	Wide Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity

Úvod

V oblasti údržby strojů v průmyslu představuje integrace bezdrátové komunikační technologie do vibrodiagnostiky významný skok vpřed. Umožňuje přenos vibrodiagnostických dat v reálném čase ze snímačů přímo připojených ke strojnímu zařízení do vzdálených monitorovacích stanic, čímž eliminuje potřebu složitého a omezujícího zapojení. To nejen zjednodušuje proces instalace, ale také zvyšuje dosah diagnostických operací a řeší situace, kde je vedení tradiční kabeláže nepraktické či dokonce nebezpečné. V neposlední řadě pak také šetří náklady. Bezdrátové technologie jsou v této době již velmi cenově dostupné a čím dál více vytlačují fyzická spojení. A to nejen v oblastech průmyslových, ale i u domácích zařízeních. S technologiemi jako Wi-Fi nebo Bluetooth se setkáme již téměř všude. Kromě zmíněných existují další takové technologie, které budou v práci popsány.

Stroje nejsou věčné, pohyblivé části se opotřebovávají a dříve nebo později může třeba jen jedna taková část způsobit selhání. Stejně jako rytmus srdce dokáže prozradit mnohé o zdravotním stavu člověka, tak i vibrodiagnostika dokáže podobným způsobem posoudit stav strojů. Stejně jako stálý, silný tlukot srdce naznačuje, že člověk je zdravý, tak očekávané konzistentní vibrace stroje naznačují, že funguje správně. Nepravidelnost srdečního rytmu by mohla signalizovat potenciální zdravotní problém, který vyžaduje další vyšetření. Změna nebo anomálie ve vibracích stroje vyžaduje vyšetření podobné. Pokud se však tyto varovné signály zanedbají, může dojít v budoucnu k selhání. V obou případech.

Cílem této práce je navržení modulu, který bude zpracovávat vibrace ze strojů a bezdrátově je odesílat centrálnímu prvku připojenému k počítači či na cloud. Tato práce zohledňuje množství přenášených dat, rychlost přenosu, potřebný dosah a odolnost proti rušení jinými technologiemi pracujícími v podobném pásmu. Na základě těchto kritérií byla zvolena vhodná technologie pro realizaci přenosu. Naměřená data mohou být pro přenos velmi rozsáhlá, proto je vhodné jejich předzpracování a přenos optimalizovat. Data není obecně potřeba vysílat příliš často. Děje jako opotřebení ložisek jsou pomalé, tudíž se projevují postupně a stroj může navzdory tomu ještě po nějakou dobu pracovat.

Teoretická část se věnuje tématům vibrodiagnostiky a bezdrátových komunikací. Praktická část obsahuje návrh a naprogramování samotného měřicího modulu. Součástí této práce je rovněž ověření funkčnosti navrženého modulu a provedení zkušebních měření pro ověření spolehlivosti přenosu dat.

Výsledek práce může vést k prodloužení životnosti zařízení, zlepšení bezpečnosti, snížení prostojů a značné úspoře nákladů vyplývajících z odvrácení katastrofických poruch a optimalizace plánů údržby. Díky opotřebovaným částem může klesat i účinnost strojů. Bezdrátová vibrodiagnostika pak zajistí to, že stroje nebudou pouze funkční, ale budou pracovat s maximální možnou efektivitou.

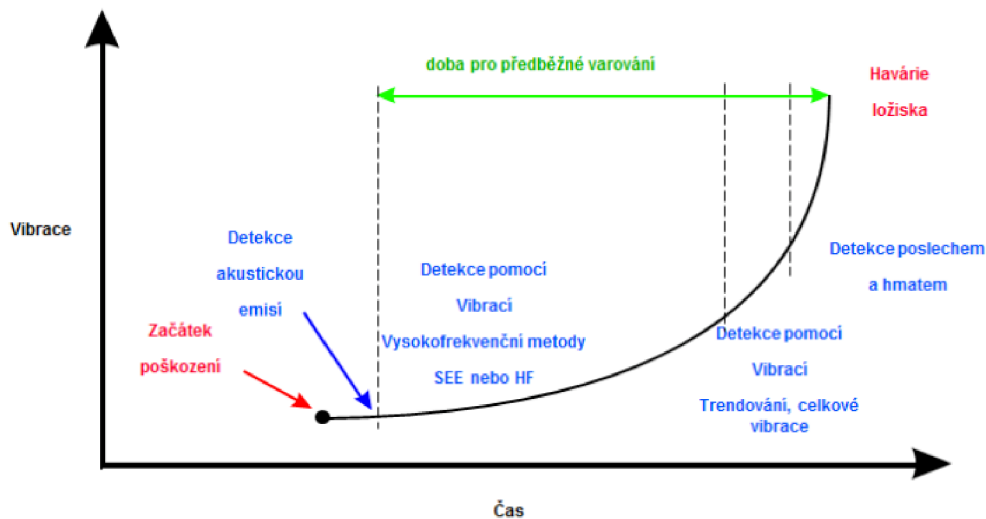
1 Vibrodiagnostika

Nejprve je třeba se seznámit s vibrodiagnostikou, jejím smyslem a metodami vyhodnocování.

Vibrodiagnostika je odvětví inženýrství, které zahrnuje sledování vibračních charakteristik strojů a konstrukcí. Je založena na principu, že každá mechanická součást nebo systém vykazuje jedinečný vzor vibrací. Analýzou těchto vibrací mohou inženýři odhalit anomálie, které často indikují potenciální chyby nebo selhání.

Význam vibrodiagnostiky spočívá v jejích schopnostech prediktivní údržby. Detekcí změn ve vzorcích vibrací může vibrodiagnostika identifikovat mechanické problémy dříve, než povedou k selhání systému. To vede k prodloužení životnosti zařízení, snížení prostojů, zlepšení bezpečnosti a celkově k úspoře nákladů, ať už za vzniklé škody nebo prostoje. Prostřednictvím strategického využití vibrodiagnostiky tak mohou průmyslová odvětví zvýšit spolehlivost, udržovat efektivitu a optimalizovat své plány údržby, což vede k výraznému zlepšení hospodárnosti.

Na obrázku (1.1) lze vidět obecnou křivku vývoje poruchy v čase a možnosti její detekce.



Obrázek 1.1: Vývoj poruchy v čase[1]

1.1 Vibrace

Vibrace lze definovat jako mechanické oscilace nebo pohyby objektu kolem rovnovážné (klidové) polohy. Vibrace mohou být periodické, tedy pravidelně se opakující, nebo aperiodické, což znamená náhodné nebo nepravidelné. Tyto vibrace mohou být způsobeny buď vnějšími nebo vnitřními silami působící na objekt. [1]

Vibrace jsou charakterizovány několika klíčovými parametry:

- **Frekvence:** Počet oscilačních cyklů za sekundu, obvykle vyjádřený v hertzech (Hz).
- **Perioda:** Časový interval jednoho oscilačního cyklu. Jedná se o převrácenou hodnotu frekvence.

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

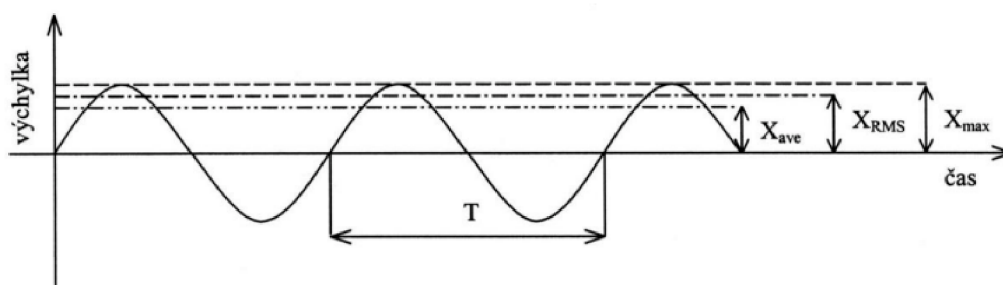
- **Fáze:** Posuv signálu v čase.
- **Maximální hodnota výchylky (Amplituda) :** Určuje maximální hodnotu výkyvu objektu od jeho rovnovážné polohy.
- **Efektivní hodnota výchylky:** Díky její hodnotě lze určit výkon kmitání

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T X^2 dt} \quad (1.2)$$

- **Střední hodnota výchylky:** Průměrná hodnota absolutní hodnoty amplitudy

$$X_{ave} = \frac{1}{T} \int_T |X| dt \quad (1.3)$$

Amplitudy vibrací je možné vyjádřit v násobcích gravitačního zrychlení (g) či v decibelech (dB). Je důležité si ale uvědomit, že kvůli rozdílným referenčním hodnotám pro zvuk a vibrace nelze hodnoty vyjádřené v dB pro tyto dvě veličiny přímo porovnávat.



Obrázek 1.2: Parametry signálu[1]

1.2 Zdroje vibrací

Nejčastějšími zdroji nevyžádaných vibrací jsou nevyváženost a nesouosost rotujících částí, poškození ložisek, vůle, opotřebení převodů, nedostatečné mazání, atd.. Rovněž pokud stroj obsahuje hydraulický či pneumatický systém, tak též nestálý tlak

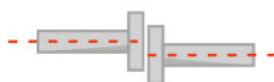
může způsobit vibrace. Pro pokročilou diagnostiku je třeba monitoring mnoha fyzikálních jevů. Kromě vibrací je třeba sledovat teploty, mechanické napětí, průtoky a tlaky médií.

1.2.1 Nesouosost

Při spojení dvou nebo více rotačních částí je důležité správné zarovnání, neboli souosost. Pokud nejsou osy obou částí totožné, může docházet k vibracím. Nesouosost ovlivňuje celý systém zejména tím, že jeho komponenty pracují pod vyšším zatížením, než pro které byly původně navrženy a tím mohou v budoucnu způsobit selhání. [2]

Paralelní nesouosost

Osy hřídelí jsou rovnoběžné, ale nejsou v jedné linii. To může nastat v obou osách jak v horizontální, tak ve vertikální. Paralelní nesouosost se projevuje výskytem radiálních vibrací na otáčkové frekvenci a jejich druhé a třetí harmonické. Druhá harmonická frekvence zde může být velmi často zastoupena více než základní otáčková frekvence. Fázový posuv mezi oběma konci hřídele je 180° . [3] [4]



Obrázek 1.3: Paralelní nesouosost [5]

Úhlová nesouosost

V tomto případě se hřídele setkávají v jednom bodě, ale nejsou paralelní. To může být jak na horizontální, tak na vertikální ose. Příznakem této nesouososti je výskyt axiálních vibrací na otáčkové frekvenci a jejich druhé a třetí harmonické. Fázový posuv mezi oběma konci hřídele je 180° . [3] [4]



Obrázek 1.4: Úhlová nesouosost [5]

Kombinovaná paralelně-úhlová nesouosost

Tato kombinace obou typů je nejčastějším typem nesouososti.



Obrázek 1.5: Paralelně-úhlová nesouosost [5]

Projevy nesouososti

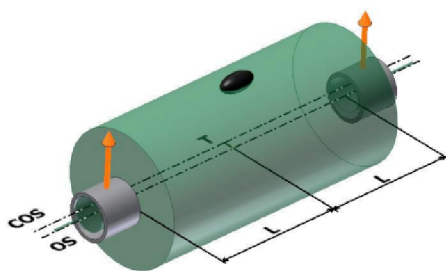
Chyby nesouososti se obvykle projevují jako druhá harmonická otáčkové frekvence systému. Pokud se tato složka objeví v měřeném spektru, vztah její velikosti k velikosti k základní frekvenci lze použít k určení nesouososti. Zvýšené nesouososti mohou vyvolat harmonické frekvence až do desetinásobku základní frekvence. Samozřejmě zde závisí na typu nesouososti a místě měření. Podle určitých vzorů frekvenčního spektra tak lze identifikovat a diagnostikovat potenciální problémy s nesouosostí. [3] [4]

1.2.2 Nevyváženost

Dalším velmi častým jevem je nevyváženost rotačních částí. Problémy nevyváženosti se dají řešit použitím vhodného umístění a hmotnosti závaží.

Statická nevyváženost

Statická nevyváženost se obvykle vyskytuje u rotujících částí, kde je průměr mnohem větší než jeho šířka. U tohoto jevu je centrální osa setrvačnosti (COS) posunuta vůči ose rotace (OR), ale obě osy zůstávají rovnoběžné. [1] Tato nevyváženost se projevuje vibracemi v radiálním směru při otáčkové frekvenci. Fázový rozdíl mezi horizontálním a vertikálním směrem ložiska přibližně 90° , s přípustnou odchylkou $\pm 30^\circ$. Mezi oběma stranami hřídele ve stejných radiálních směrech nejsou žádné významné fázové rozdíly. [6]



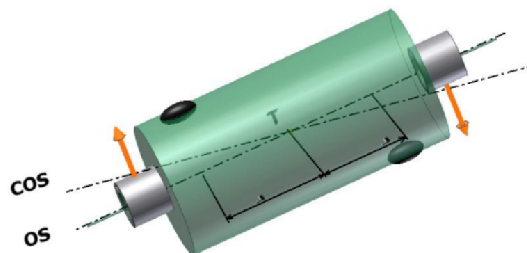
Obrázek 1.6: Statická nevyváženost [1]

Momentová nevyváženost

Momentová nevyváženost nastává, když osy rotace a centrální osa setrvačnosti rotoru nejsou rovnoběžné, ale protínají se v těžišti rotoru. Tento stav způsobuje, že rotor

vypadá v klidu vyvážený, ale při otáčení se projevuje momentovou nevyvážeností, kdy dvojice setrvačných sil způsobuje vibrace. [1]

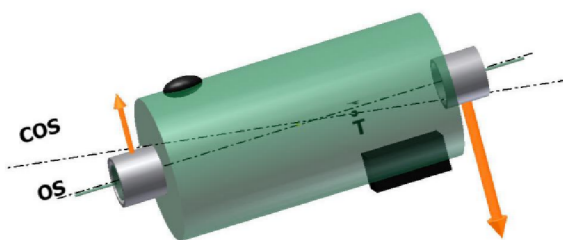
Stejně jako v případě statické nevyváženosti, jsou zde následkem radiální vibrace na otáčkové frekvenci. Fázový rozdíl mezi horizontálním a vertikálním směrem ložiska přibližně $90^\circ \pm 30^\circ$. V radiálním směru je mezi oběma stranami hřídele fázový posuv 180° . [6]



Obrázek 1.7: Momentová nevyváženost [1]

Dynamická nevyváženost

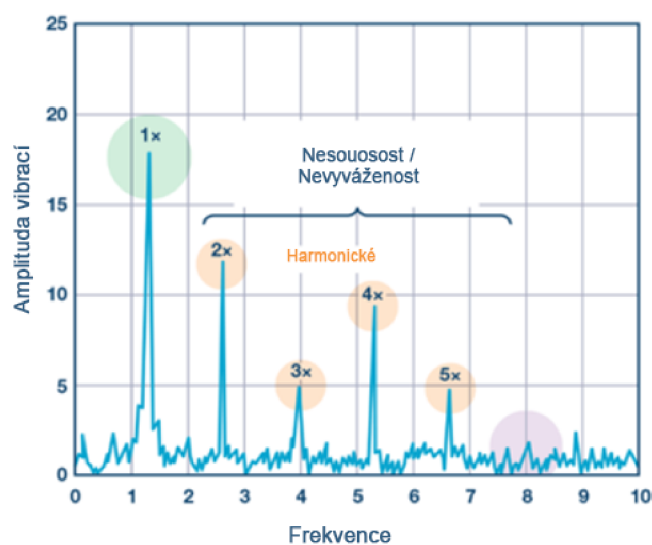
Dynamická nevyváženost je kombinací obou zmíněných typů. U dynamické nevyváženosti hlavní osa setrvačnosti neprotíná osu rotace přímo v těžišti rotoru, ale k protnutí dochází mimo těžiště. [1]



Obrázek 1.8: Dynamická nevyváženost [1]

1.2.3 Projevy nesouososti a nevyváženosti

Oba jevy ovlivňují spektrum vibrací velmi podobně a často je těžké určit, v jakém poměru jsou zastoupeny. Obecně většina literatury neuvádí přesné rozdíly ve vlivech těchto jevů na výsledné spektrum. Nicméně v obou případech jde obecně o výskyt vyšších harmonických základní otáčkové frekvence.

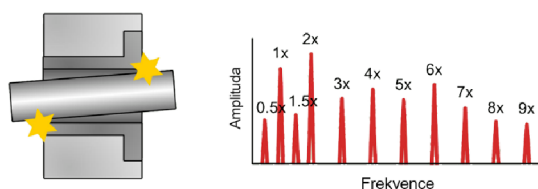


Obrázek 1.9: Vliv nesouososti a nevyváženosti na frekvenční spektrum [4]

Dle experimentálního měření ze zdroje [7] bylo zjištěno, že v případě nevyváženosti hřídele se nejvyšší vibrace (RMS hodnota) projevují v horizontálním radiálním směru. Rovněž mezi měřeními v horizontálním a vertikálním radiálním směru nastává fázový posuv $90^\circ \pm 30^\circ$. Úhlová nesouosost přenášela nejvyšší vibrace v axiálním směru. Při paralelní nesouososti dominovala druhá harmonická. Rovněž frekvence vibrací stoupá s počtem nesouosých spojení. Např. nesouké spojení čtyř segmentů způsobuje vibrace o čtyřnásobku základní frekvence, tj. čtvrté harmonické.

1.2.4 Volnost mechanických částí

Mechanická volnost může být způsobena např. nedostatečným utahením mechanických prvků či zvětšování mezery mezi součástkami způsobené opotřebením. To může mít za následek výskyt nejen harmonických frekvencí vibrací (1x, 2x, 3x,...), ale i subharmonických (0.5x), či poloharmonických (1.5x, 2.5x, 3.5x,...). Obecně jsou tyto projevy lépe pozorovatelné v radiálních směrech než v axiálním. [8]



Obrázek 1.10: Projevy volnosti mechanických částí [8]

1.2.5 Průhyb hřídele

Prohnutí hřídele může nastat v důsledku teplotního rozpínání nebo přetížení způsobeného radiálními či axiálními silami. Na rozdíl od nevyváženosti, kde převažují radiální vibrace, u ohnutého hřídele dojde k výrazným axiálním vibracím. Tyto vibrace jsou doprovázeny druhou harmonickou frekvencí. [9]

1.2.6 Poškození ložisek

Projevuje se výskytem vysokofrekvenčních vibrací, typicky v pásmu 500 Hz až 16 KHz. Frekvence vibrací závisí na typu defektu i na počtu či průměru valivých elementů (např. kuliček) v ložisku. Zjednodušeně pokud se na stěně ložiska nachází důlek nebo trhlina, vyvolá vibraci při kontaktu s každou kuličkou. Poté je přítomná frekvence vibrací rovna součinu frekvence otáčení kuliček a jejich počtu. [10]

1.2.7 Rezonance

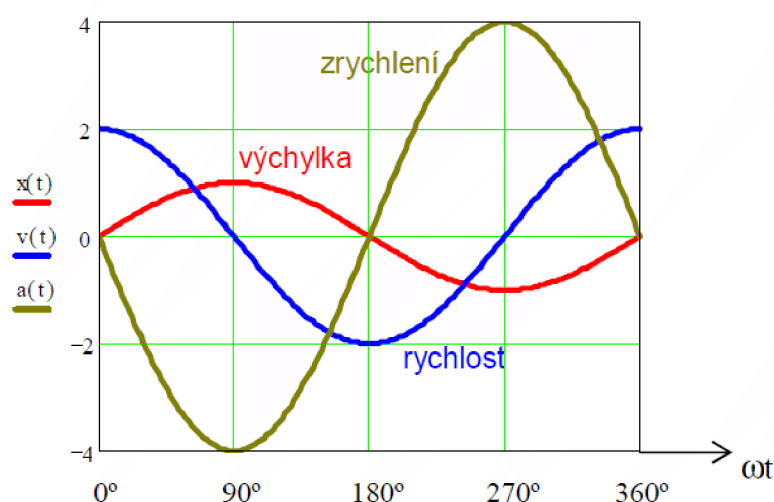
Kromě nucených frekvencí, které jsou závislé na otáčkách stroje, má každý systém také jednu nebo více rezonančních (vlastních) frekvencí. To jsou frekvence, na kterých má systém tendenci se rozvíjet. Když je těmito frekvencemi systém buzen, dochází k výraznému zvýšení intenzity vibrací. Při analýze vibrací je nutné umět tyto frekvence stanovit. Při návrhu systému je pak nutné zajistit, aby nucené frekvence při provozu nebyly v blízkosti rezonančních. Ačkoliv by stroj v běžném pracovním režimu měl pracovat mimo rezonanční frekvence, tak během zrychlování či zpomalování může těmito frekvencemi procházet a tím docházet k zvýšeným vibracím. Pro stanovení rezonančních frekvencí lze použít výpočty či různé měřicí metody. Mezi ně patří např. měření frekvenčního spektra při rozběhu a následná analýza. Dalším příkladem je metoda, kde se pomocí gumového nebo plastového kladiva udeří do konstrukce. Spektrální špičky pak ukazují možné rezonanční frekvence systému. [11]

Provozní frekvenci by se měli od těchto rezonančních lišit alespoň o $\pm 20\%$. Rezonanční frekvence nelze přímo eliminovat, pouze minimalizovat jejich následky (např. přidáním protivibračních podložek), či je změnou hmotnosti a tuhosti systému přesunout do jiné části spektra. [11]

1.3 Měření vibrací

Vibrace lze měřit pomocí 3 základních pohybových veličin: polohy, rychlosti a zrychlení. Tyto veličiny jsou samozřejmě navzájem matematicky svázány.

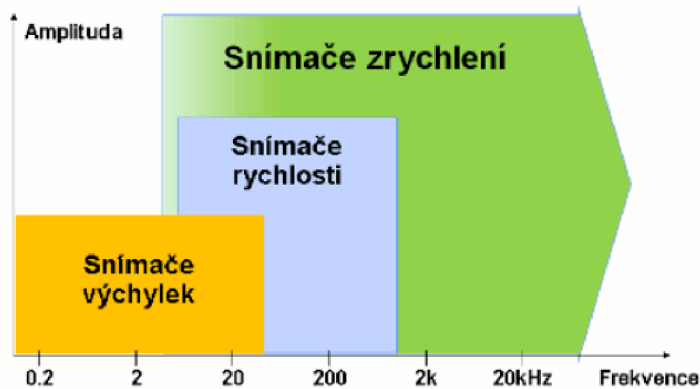
- **Poloha (výchylka)** - Obvykle se pohybuje v řádu mikrometrů [μm]
- **Rychlost** - Jedná se o první derivaci výchylky v čase. Udává se obvykle v milimetrech za sekundu [mm/s]
- **Zrychlení** - Druhá derivace výchylky v čase, udává se v m/s^2 nebo v násobcích gravitačního zrychlení g .



Obrázek 1.11: Pohybové veličiny [12]

Neexistuje jednoznačná odpověď na to, která z těchto veličin je pro měření vibrací nejlepší. To závisí na mnoha faktorech, včetně typu dostupných snímačů a konkrétní aplikaci. V současné době jsou však nejčastěji využívány akcelerometry, tedy snímače měřící zrychlení. To, že každá z těchto veličin má jiný rozsah frekvence, pro kterou je její měření vhodné, je zobrazeno na obrázku 1.12. Např. snímače rychlosti je vhodné použít pro měření vibrací v rozsahu 10-1000 Hz. Pokud mají vibrace frekvence nižší, je vhodné použít měření výchylky. Pokud větší, tak akcelerometry. [12]

Optimální rozsahy vibračních veličin



Obrázek 1.12: Optimální rozsahy frekvencí pro výběr měřené veličiny [12]

Při měření vibrací rozlišujeme dva typy měření: absolutní a relativní.

- **Absolutní vibrace** - Měří pohyb objektu (například části stroje) ve vztahu k pevnému bodu, typicky k Zemi. Jednoduše řečeno, měříme, jak se objekt pohybuje nezávisle na svém okolí.
- **Relativní vibrace** - Zde se měří pohyb objektu ve vztahu k jinému objektu, například k rámu stroje. To je užitečné, když chceme zjistit, jak se dvě části stroje pohybují vzhledem k sobě. [13]

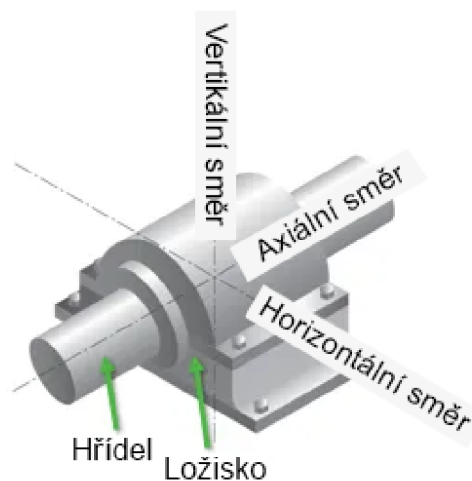
Při diagnostice systému je nutné zvážit několik klíčových specifikací:

- **Nízký šum a dostatečné rozlišení** jsou nezbytné pro detekci malých nevyvážeností a nesouosostí.
- **Šířka měřeného pásma** je důležitá pro zachycení dostatečného frekvenčního rozsahu a pro zlepšení přesnosti a spolehlivosti diagnostiky. To je zvláště důležité u strojů s vyššími otáčkami.
- **Vícesměrové informace** zlepšují přesnost diagnostiky a poskytují přehled o typu chyby a např. směru nesouososti.
- **Fáze systému** ve spojení s informacemi o směrových vibracích dále zlepšuje diagnostiku chyby. Měření vibrací v různých bodech na stroji a určení rozdílů ve fázových měřeních napříč systémem poskytuje náhled na to, zda je nesouosost úhlová, paralelní, nebo kombinace obou typů. [13]

1.3.1 Směry vibrací

Vibrace se systémem mohou šířit v různých směrech rozdílně. Na tom závisí i následné umístění snímačů. Axiální směr je rovnoběžný s osou otáčení. Radiální směry

jsou na tuto osu kolmé. První radiální směr je umístěn ve směru gravitační síly a označuje se vertikální, druhý je na oba zmíněné směry kolmé a nazývá se horizontální. Pro spolehlivou detekci a identifikaci závad je vhodné umístit snímače ve všech těchto třech směrech. V praxi se za účelem úspory lze setkat i s kompromisem, kdy je v úhlu 45° mezi radiálními osami umístěn pouze jeden snímač. [14]



Obrázek 1.13: Směry vibrací [14]

1.3.2 Snímače výchylky

Snímače pro měření kmitání tělesa mohou být založeny na různých principech, jako jsou indukční, indukčnostní, kapacitní, magnetické nebo optické metody. V oblasti vibrodiagnostiky se často používají indukčnostní snímače. Tyto snímače fungují na základě změn v indukčnosti cívky, které jsou způsobeny změnami vířivých proudů. Indukčnostní snímače mohou být citlivé na různé vnější rušení, jako je vnější elektromagnetická pole. Tato citlivost je rovněž závislá na délce kabelu. Aby se tyto problémy minimalizovaly, jsou tyto snímače často navrženy jako integrované jednotky, kde kovový stínící kryt obsahuje jak měřicí cívku, tak základní elektroniku. V poslední době se také stávají populárními bezdotykové optické snímače výchylky. Tyto snímače mají výhodu, že neinterferují s měřeným objektem, ale mohou přinášet jiné typy problémů, způsobené vnějšími světelnými podmínkami. [13]

1.3.3 Snímače rychlosti

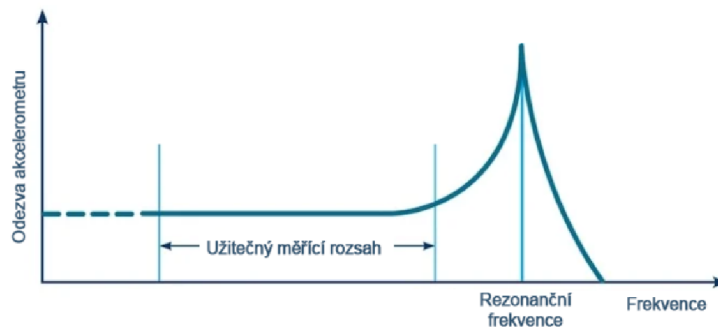
Snímače rychlosti jsou konstruovány na principu měření pohybu cívky umístěné v magnetickém poli permanentního magnetu. Když se cívka spolu s kmitajícím objektem pohybuje, v cívce se indukuje elektromotorická síla, která se projevuje změnou napětí, a to je měřeno. Toto indukované napětí je úměrné rychlosti kmitavého pohybu cívky, což znamená, že rychlejší pohyb cívky vyvolává větší elektromotorickou sílu a tedy i větší napětí. [13]

1.3.4 Snímače zrychlení

Míra zrychlení se často udává v jednotkách g , tudíž násobcích gravitačního zrychlení, které činí $9,81 \text{ m/s}^2$.

Piezelektrické akcelerometry

Piezelektrický akcelerometr funguje na principu deformace piezokrystalu. Ten při působení síly generuje elektrický signál. V případě piezelektrických akcelerometrů je na jedné straně krystalu připevněna seismická hmota, která při zrychlení díky své setrvačnosti působí silou na krystal. Generované napětí mezi vodiči na stranách krystalu je přímo úměrné této působící síle. [15] Měřicí rozsah tohoto typu je omezen shora, jelikož se piezoelement se seismickou hmotou chovají ve výsledku jako pružná hmota s vlastní rezonanční frekvencí. Ta je závislá na hmotnosti seismické hmoty. Při snížení hmotnosti seismické hmoty dochází k navýšení měřicího rozsahu, avšak ke snížení citlivosti. Proto je nutné najít kompromis mezi velikostí měřicího rozsahu a citlivostí. Resonanční frekvence akcelerometrů se, v závislosti na provedení, pohybují v řádech desítek až stovek KHz. Z toho je možné určit i měřicí rozsah. Ten bývá přibližně do jedné třetiny hodnoty rezonanční frekvence, kde je chyba maximálně 10%. Při měření v polovině rezonanční frekvence bývá chyba už kolem 30%. Křivka závislosti odezvy (citlivosti) piezelektrického akcelerometru na frekvenci je zobrazena na obrázku níže. [16] [17]



Obrázek 1.14: závislost odezvy piezelektrického akcelerometru na frekvenci [17]

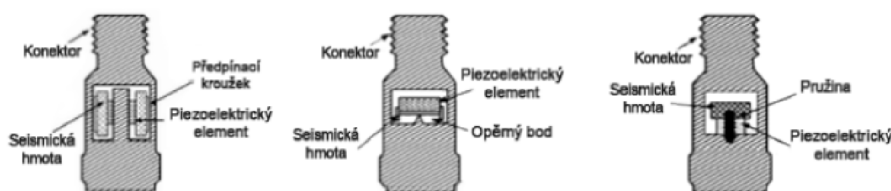
Spodní měřicí limit závisí na chování použitého zesilovače signálu, který je umístěn za snímačem, na parametrech akcelerometru a na parazitní kapacitě vodičů mezi snímačem a zmíněným zesilovačem. Pod tímto limitem odezva klesá k nule. Nulovou frekvenci neboli DC složku není schopen akcelerometr změřit. Pro představu je typicky měřicí rozsah piezelektrického akcelerometru od 1 Hz do 10 až 15 KHz. Piezelektrické akcelerometry se vyrábí ve třech provedeních, neboli módech. [15] [16] [17]

- Smykový mód
- Ohybový mód
- Kompresní mód

Akcelerometry ve smykovém módu nabízí vysokou odolnost vůči teplotním změnám a parazitním vibracím, což je dělá ideálními pro přesné měření v náročných podmínkách. Konstrukčně jsou provedeny tak, že seismická hmota působí smykové napětí na piezoelektrický krystal umístěný mezi sebou a centrálním nosníkem. [15]

S ohybovým módem dosahují akcelerometry velmi vysoké citlivosti pro nízkofrekvenční aplikace, jako je např. seismické měření. Využívají piezoelektrický krystal ve tvaru nosníku, který generuje napětí při ohybu způsobeném zrychlením. [15]

Akcelerometry pracující v kompresním módu jsou robustní a vhodné pro široké spektrum běžných průmyslových aplikací díky jejich jednoduché konstrukci a vysoké odolnosti. Jsou nejčastěji používaným typem. Jejich provedení je velmi jednoduché. Seismická hmota tlačí na piezoelektrický krystal mezi sebou a základnou. [15]



Obrázek 1.15: Provedení piezoelektrických akcelerometrů [15]

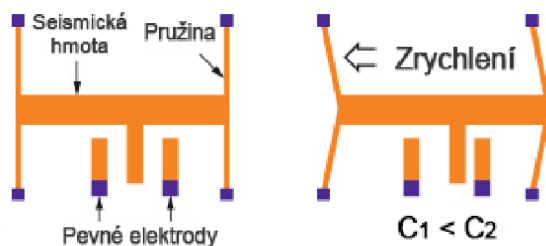
Kapacitní akcelerometry

Kapacitní akcelerometry se hojně používají v technologii MEMS (Micro-Electro-Mechanical System). Vyrábí se většinou v miniaturním tříosém diferenciálním provedení v hřebenových strukturách s více elektrodami. Princip funkce spočívá ve změně kapacity C vyvolanou pohybem elektrody. [13] [18]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (1.4)$$

C je kapacita (F), ε_0 je přesně definovaná permitivita vakua 8.854×10^{-12} F/m, ε_r je bezrozměrná relativní permitivita materiálu mezi deskami, S je plocha jedné z desek kondenzátoru (m^2) a D je vzdálenost mezi deskami kondenzátoru (m).

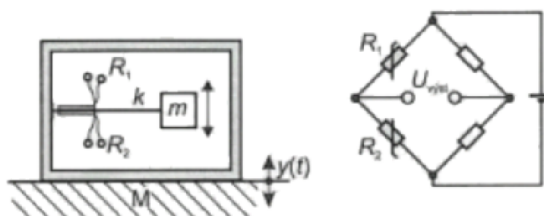
Princip funkce je zobrazen na obrázku 1.16. Při pohybu dojde ke změnám kapacity C_1 a C_2 . C_1 je mezi levou pohyblivou a střední pevnou elektrodou. C_2 mezi střední a pravou. Jedna kapacita se zmenšuje, druhá zvětšuje. Tyto akcelerometry mívají frekvenční rozsah maximálně do jednotek KHz.



Obrázek 1.16: Princip kapacitního akcelerometru [18]

Piezorezistivní akcelerometry

Princip piezorezistivních akcelerometrů spočívá v měření deformace piezorezistivních prvků. Ty podobně jako tenzometry mění svůj odpor. Seismická hmota ohýbá při zrychlení nosník s piezorezistivními elementy, uspořádanými do Wheatstoneova můstku. Vyrábí se většinou rovněž v MEMS provedení. Frekvenční rozsah bývá podobný jako u kapacitních, tj. maximálně jednotky KHz. [19]



Obrázek 1.17: Princip piezorezistivního akcelerometru [19]

1.3.5 Uchycení snímačů

Volba uchycení snímačů k sledovanému objektu je pro přesnost měření rovněž důležitým aspektem. Způsob, jakým je snímač připevněn, ovlivňuje zejména rozsah měřitelných frekvencí. Pro dosažení co nejmenšího zkreslení frekvenčních charakteristik a pro maximalizaci využitelného frekvenčního rozsahu je ideální upevnění snímačů pomocí závrtných šroubů, případně navíc s použitím tenké vrstvy silikonové vazelíny mezi dotykovými plochami.

Další efektivní metodou upevnění je použití speciálních lepidel nebo včelího vosku. Zde je důležité, aby lepidlo udrželo snímač pevně na místě, ale zároveň umožnilo jeho bezproblémové odstranění bez poškození. V tomto ohledu se často využívá zubní cement nebo kyanoakrylátová lepidla.

Méně přesné, ale stále užitečné, jsou snímače s ručním hrotem nebo magnetickou příchytkou.

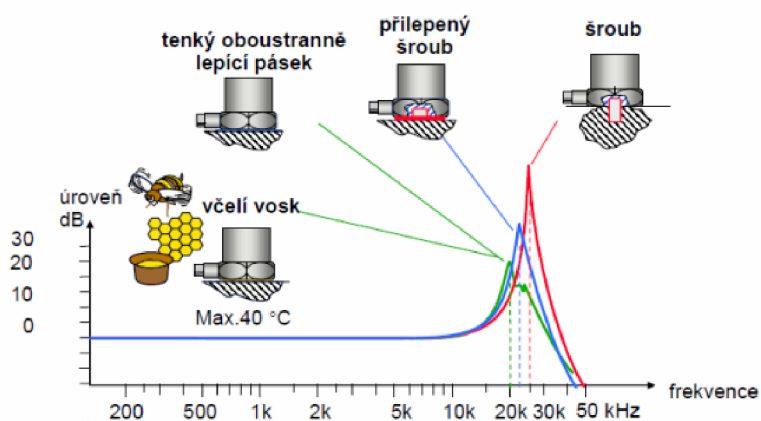
Stejně důležité jako způsob uchycení snímače je i správný výběr místa pro jeho instalaci. To platí obzvláště pro absolutní snímače. Tam je třeba vybírat místa, kde nedojde ke zkreslení měřených vibrací kvůli tuhosti a pružnosti konstrukce sledovaného stroje.

Při umísťování snímačů pro měření vibrací je obecně důležité dodržovat několik klíčových pravidel:

- **Čistý a neznečištěný povrch:** Snímač by neměl být umístěn na znečištěné nebo lakované povrchy, aby se zajistila správná funkce a přesnost měření.
- **Blízkost k zdroji vibrací:** Snímač by měl být umístěn co nejbližší k místu potenciálního vzniku vibrací pro co nejpřesnější měření.
- **Orientace měření:** Měření by se ideálně mělo provádět ve třech směrech: horizontálním, vertikálním a axiálním. Horizontální měření často ukazují nejvyšší vibrace kvůli konstrukční poddajnosti strojů, zatímco axiální měření obvykle

vykazují nižší vibrace, stále jsou však důležité pro detekci problémů jako je nesouosost nebo ohnutý hřídel.

- **Přímý kontakt s materiálem:** Měření by se mělo provádět přímo na materiálu, který je v kontaktu s ložiskem, nikoli na plechových krytech nebo přechodech.
- **Konzistence v měření:** Pro správné srovnání dat by měření mělo být prováděno pravidelně a vždy na stejných místech.
- **Podmínky provozu stroje:** Měření by se mělo provádět za normálních provozních podmínek stroje, například za ustálených provozních teplot a při jmenovitých hodnotách zatížení, napětí, otáček, tlaku atd.
- **Bezpečnost:** Při umísťování snímače je třeba dbát na bezpečnost, umísťovat ho dostatečně daleko od rotujících součástí a na vhodně člověku přístupných místech.[13]



Obrázek 1.18: Uchycení snímačů[13]

1.4 Zpracování signálů

Signál lze vyhodnocovat buď v časové nebo v frekvenční oblasti. Oba způsoby mají své využití, avšak častější je analýza frekvencí v signálu obsažených. Pro převod mezi těmito oblastmi slouží algoritmus zvaný Fourierova transformace.

1.4.1 Fourierova transformace

Nezákladnější metodou vibrodiagnostiky je vyhodnocování měřeného frekvenčního spektra signálu, tj. jakými frekvencemi, v jaké míře stroj vibruje. Nástrojem pro získání takového spektra může být např. Fourierova transformace. Ta převádí signál z časové oblasti do oblasti frekvenční, tj. zobrazuje zastoupení jednotlivých frekvencí v signálu.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.5)$$

Vstupem i výstupem FT jsou spojité funkce. Vstupem je naměřený průběh signálu v čase, výstupem je spojité spektrum signálu.

Při měření je analogový signál převeden do diskrétní formy, tzn. do formy vzorků. Pak je třeba zvolit Fourierovu transformaci diskrétní neboli DFT. Stejně jako vstupní funkce, je i výsledné spektrum v diskrétní podobě. [20]

$$x(n) = \sum_{k=0}^{K-1} x(k)e^{-ink2\pi/N} \quad (1.6)$$

$$0 \leq K \leq N - 1 \quad (1.7)$$

Další verzí Fourierovy transformace je FFT neboli Rychlá Fourierova transformace. FFT je v podstatě pouze efektivní metoda pro výpočet DFT. Pro její použití je třeba, aby počet vstupních vzorků odpovídal mocnině čísla dvě.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (1.8)$$

$$0 \leq k \leq N - 1 \quad (1.9)$$

Kromě vibrodiagnostiky je frekvenční analýza pomocí Fourierových transformací využívána také v akustice a audiotechnice, kde je možné sledovat frekvence různých nástrojů a ty pak libovolně potlačovat nebo zesilovat použitím filtrů jako je dolní, horní nebo pásmová propust. Tomuto procesu se říká ekvalizace. Dále se frekvenční analýza využívá k měření chování analogových elektrických obvodů, či třeba v astronomii, kde jsou zkoumány světelné signály z vesmíru.

Existuje mnoho různých diagnostických metod, každá má své výhody a nevýhody. Pro správné a spolehlivé určení závady a tím odstavení stroje je běžně za potřeby použít metod více. Rovněž se často diagnostika kombinuje s termodiagnostikou,

tribodiagnostikou či akustickou diagnostikou. Měřený signál se totiž může lišit v závislosti na otáčkách stroje, kroutícím momentu, jeho teplotě, zatížení atd. Např. při záběru materiálu při obrábění působí na vřeteno obráběcího stroje radiální či axiální síly, které průběhy vibrací také ovlivní. Výstup z měření stroje běžícího na prázdno a stroje odebírajícího materiál se pak bude lišit. Součástí diagnostiky není pouze detekce a lokalizace závady, ale i důvodu jejího vzniku, zejména pokud k ní dochází často. Může to být nevhodným zvolením ložiska, špatným uložením, špatným mazáním, či zmíněných nevyvážeností a nesouosostí rotačních částí.

Výběr diagnostické metody vždy záleží na konkrétním zařízení a jeho využití, ne všechny metody jsou totiž univerzální.

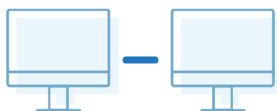
2 Technologie pro bezdrátový přenos dat

2.1 Topologie sítí

Prvním a velmi důležitým aspektem při charakterizaci přenosů dat je jejich topologie. Tyto zmíněné koncepty jsou pak aplikovány na drátové i bezdrátové sítě. Tento způsob, jakým jsou zařízení a spojení v síti uspořádány, má přímý vliv na její funkčnost. Správný výběr topologie může zlepšit výkon a efektivitu přenosu dat a snížit provozní náklady. Diagramy síťové topologie vytvořené pomocí softwaru jsou pak praktické pro diagnostikování problémů s konektivitou, zpomalení sítě a řešení jiných problémů.

2.1.1 Point To Point

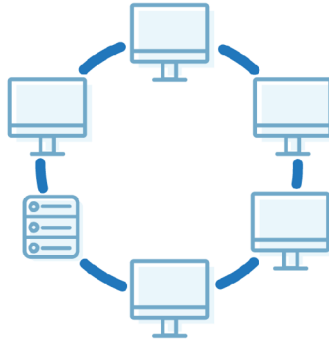
Nejjednodušší forma komunikace se nazývá Point to point, kde mezi sebou komunikují pouze 2 zařízení. Tuto formu využívá například průmyslová sběrnice RS232, též nazývána jako sériová linka.



Obrázek 2.1: Topologie Point To Point [21]

2.1.2 Kruh

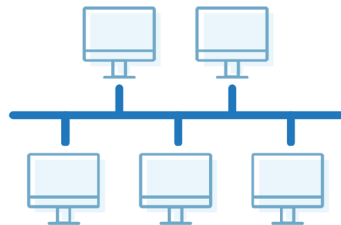
Zařízení jsou připojeny ke dvěma sousedním zařízením pomocí spojení Point To Point, vytvářející kruhovou síť. Data jsou předávána dokud nedosáhnou cílového zařízení. Je důležité rozlišovat mezi obecnou kruhovou topologií a Token Ringem, který je již konkrétní implementace kruhové topologie s určitým řízením přístupu k médiu.



Obrázek 2.2: Kruhová topologie [21]

2.1.3 Sběrnice

Dalším, v průmyslu velmi využívaným případem, je topologie sběrnice. Všechna zařízení jsou připojena k tzv. sběrnici, po které jsou přenášena všechna data mezi libovolnými dvěma účastníky. Účastníci(zařízení) si mohou být rovny (Peer To Peer) nebo je jedno nadřazené (Master/Slave). Sběrnice může být tvořena různým počtem vodičů, může obsahovat jiné napěťové úrovně a příslušný komunikační protokol podle standardu, který používá. Příkladem mohou být např. sběrnice ModBus, ProfiBus a CAN.



Obrázek 2.3: Sběrnice topologie [21]

2.1.4 Hvězda

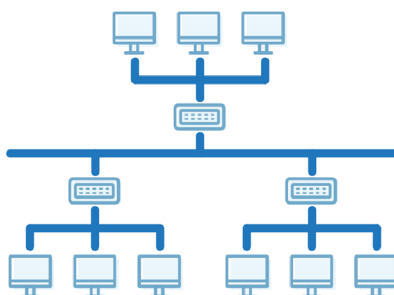
V hvězdicové topologii jsou všechna zařízení připojena k centrálnímu uzlu, tz. modemu. V bezdrátových sítích může být hvězdicová topologie implementována pomocí centrálního zařízení, jako je bezdrátový přístupový bod AP (Access Point). Všechny bezdrátové zařízení komunikují přímo s AP, což zjednodušuje správu a umožňuje snadné připojování nových zařízení. Výhody zahrnují jednoduchou instalaci a možnost snadného připojení nových zařízení. Nevýhodou je závislost na zmíněném centrálním uzlu. V případě výpadku je celá komunikační síť nefunkční. Tuto topologii využívají např. sítě Ethernet v domácnostech. [21]



Obrázek 2.4: Topologie Hvězda [21]

2.1.5 Strom

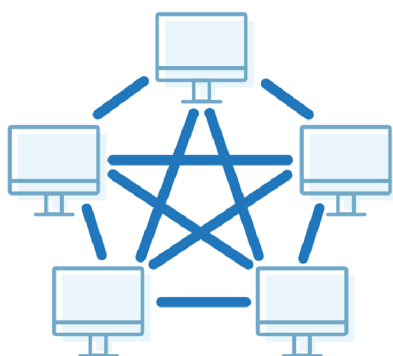
Stromová topologie je ve skutečnosti variantou hvězdicové topologie, ale s víceúrovňovým rozložením. V této topologii je více uzlů, které se větví. Vnitřní uzly jsou nadřazeny vnějším. Využívá ji např. opět Ethernet.



Obrázek 2.5: Stromová topologie [21]

2.1.6 Mesh

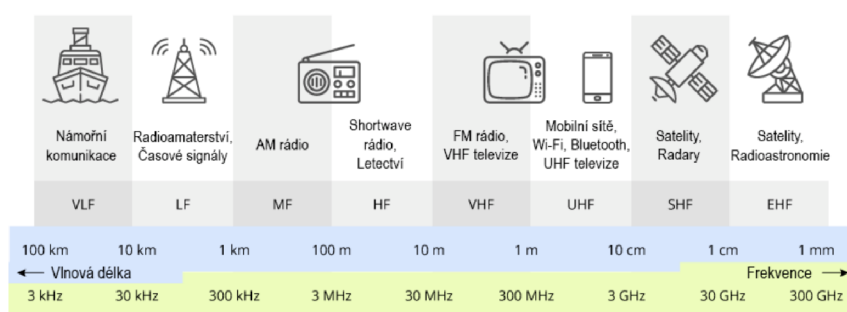
V mesh síti neexistuje přesně daná hierarchie, není zde žádné pravidlo o počtu spojení. Libovolné zařízení může komunikovat s různým počtem zařízení podle dosahu a potřeby. Počet spojení pak zvyšuje rychlost a spolehlivost přenosu. Hlavní předností mesh sítě je, že její fungování nezávisí na jediném uzlu, což umožňuje každému uzlu účastnit se na předávání informací. Mesh síť se obvykle také dynamicky samoorganizují a samokonfigurují, což snižuje nároky na instalaci. Uzly mesh sítí se nazývají anglicky "nody". Mesh síť se používají zejména v bezdrátových přenosech, např. Wi-Fi či později zmíněná IQMESH. [22]



Obrázek 2.6: Topologie Mesh sítě [21]

2.2 Bezdrátová komunikace

Většina bezdrátových komunikací pracuje v radiovém spektru. Toto spektrum se rozkládá od 3 kHz až do 3 000 GHz elektromagnetického spektra a dále se podle frekvence dělí do několika skupin, z nichž každá má specifické vlastnosti a využití. Tyto skupiny jsou označeny zkratkami podle relativní velikosti frekvencí. Například skupina VLF znamená "Very Low Frequencies" čili velmi malé frekvence a spadají pod ní frekvence 3 až 30 KHz. Rozložení skupin ve spektru je spolu s příklady využití zobrazeno na obrázku... Každá z těchto skupin má unikátní charakteristiky, jako je schopnost průniku materiálem, dosah a odrazivost od atmosférických vrstev, což ovlivňuje jejich specifické použití v různých oblastech. Platí obecné pravidlo, že čím vyšší je frekvenční pásmo, tím nižší je dosah bezdrátového přenosu. Čím delší vlna, tím pomaleji se šíří, ale lépe proniká pevnými objekty jako jsou zdi. [23]



Obrázek 2.7: Rádiové spektrum [23]

2.3 ISM pásma

ISM(Industrial, Scientific, Medical) pásma jsou mezinárodně stanovená bezlicenční pásma pro použití v průmyslu, vědě a zdravotnictví. (ISM = Industrial, Scientific, Medical) Původně byla tato pásma vyhrazena pro nekomunikační účely, jako

je ohřev v mikrovlnných troubách nebo pro různá vědecká a lékařská zařízení. Postupem času se ale stala oblíbeným výběrem pro různé bezdrátové technologie, jako jsou Wi-Fi, Bluetooth a další bezlicenční zařízení. Vznik ISM pásem sahá až do roku 1947, kdy byla mezinárodně ustanovena s vizí podpory průmyslových, vědeckých a lékařských inovací. Ovšem tehdy nikdo netušil, jak moc se tato pásma stanou klíčovými právě pro komunikaci. Dnes jsou tato pásma domovem pro řadu zařízení od mikrovlnných trub přes bezdrátové sítě až po moderní IoT (Internet věcí) aplikace. Zatímco regulace a pravidla se mohou lišit v závislosti na zemi, globální důraz na efektivní využívání spektra se snaží zajistit, že ISM pásma zůstanou klíčovým zdrojem pro inovace i do budoucna. Zařízení v ISM pásmu musí akceptovat veškeré rušení od ostatních ISM zařízení, což umožňuje jejich využití bez nutnosti licence. V USA a Evropě existují specifické regulace, které používání těchto pásem řídí a omezují. ISM pásma jsou rozprostřena v radiovém spektru od frekvence 13.553 MHz až po 246 GHz. [24] [25]

Český telekomunikační úřad stanoví podmínky a limity využívání těchto pásem. Uživatel je oprávněn používat zařízení pracující na specifikovaných sdílených radiových kmitočtech bez speciálního oprávnění. Tato zařízení však nesmí být vybavena zesilovači vysokofrekvenčních výkonů a nesmí překračovat stanovené limity vyzářeného výkonu. Uživatel rovněž nesmí dopustit, aby došlo k rušení telekomunikačních služeb. Zde jsou uvedeny limity pro technologie, které jsou následně v práci popsány.

- Pro IQRF a LoRa, které obě využívají kmitočtové pásmo 868 MHz (přesněji rozmezí 863-870 MHz):
Výkon do 25 mW e.r.p. pro různé podpásma a aplikace, s různými klíčovými poměry a podmínkami.
 - G5 (868.0-868.6 MHz): 25 mW e.r.p., klíkový poměr do 10 % nebo podle specifického odstavce.
 - G6 (868.7-869.2 MHz): 25 mW e.r.p., klíkový poměr do 1 % nebo podle specifického odstavce.
 - G7 (869.4-869.65 MHz): 500 mW e.r.p., šířka pásma 25 kHz, klíkový poměr do 10 % nebo podle specifického odstavce.
- Pro WiFi technologii, relevantní kmitočtová pásma jsou:
 - J (2400-2483.5 MHz): Výkon do 100 mW e.i.r.p. pro obecné využití WiFi v pásmu 2,4 GHz.
 - K (5725-5875 MHz): Výkon do 25 mW e.i.r.p. pro WiFi v pásmu 5 GHz.
- GSM (900/1800/1900 MHz) Jelikož GSM technologie spadá pod mobilní kmitočtová pásma, nejsou v dokumentaci stanoveny maximální výkony.

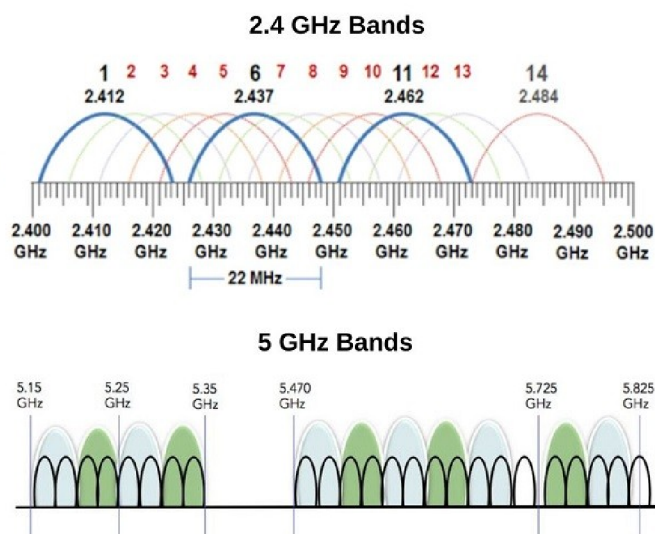
Klíkový poměr (duty cycle) je podíl času aktivního vysílání z jedné hodiny. Zkratka e.r.p značí efektivní vyzářený výkon (Effective Radiated Power). Udává, kolik energie by skutečně vyzařoval ideální dipólový zdroj, aby bylo dosaženo stejného výkonu signálu v určitém směru. Jedná se o standard, užitečný pro srovnání

různých vysílacích systémů bez ohledu na typ použité antény nebo specifika systému. [26]

2.4 Technologie Wi-Fi

Dnes pravděpodobně nejznámější technologií pro bezdrátový přenos je Wi-Fi. Je všude kolem nás a to z důvodu přístupu k síti Internet. Ve Wi-Fi sítích se používají dvě různá frekvenční pásma. Jedná se o pásma 2,4 GHz a 5 GHz. Pásmo 2,4 GHz leží reálně mezi 2,400 GHz a 2,4835 GHz. Pásmo 5 GHz leží mezi 5,150 GHz a 5,825 GHz, ale zkráceně se označuje 5 GHz. Navíc pásmo 5 GHz pak zahrnuje samostatná pásma: [27]

- 5,150 - 5,250 GHz
- 5,250 - 5,350 GHz
- 5,470 - 5,725 GHz
- 5,725 - 5,825 GHz



Obrázek 2.8: Wi-Fi pásma [27]

Pásmo 2,4 GHz má 14 kanálů, ale každý kanál překrývá frekvenční rozsah dalších čtyř kanálů. Použití pouze kanálů 1, 6 a 11 překryvání zamezí. Pásmo 5 GHz má pak 23 samostatných kanálů, které se nepřekrývají. Použití jakéhokoli kanálu s 5GHz tedy neovlivní ostatní přístupové body. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma pásmy je rychlost a dosah, jak tomu bylo vysvětleno dříve v textu. 5 GHz je tedy rychlejší než 2,4 GHz, má však kratší dosah. Pásmo 2,4 GHz je přeplněnější než 5 GHz. Stará bezdrátová zařízení totiž pracují většinou pouze na 2,4 GHz. Pokud je takových zařízení v okolí mnoho, je lepší použití 5 GHz pásma. [27]

Kompatibilitu mezi Wi-Fi zařízeními zajišťuje standard IEEE 802.11. První verze přišla na svět roku 1997 a používá pouze 2,4 GHz pásma. Postupně došlo k přidání pásma 5 GHz a navyšování rychlostí. Navíc od verze Wi-Fi 6E se začlo využívat i pásmo označované jako 6 GHz. To se reálně nachází na rozmezí 5.925 až 7.125 GHz s 56 kanály. Vývoj verzí je možné vidět v tabulce 2.1. [27] [28]

Verze	Wi-Fi 1	Wi-Fi 2	Wi-Fi 3	Wi-Fi 4	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6
Rok uvedení	1999	1999	2003	2009	2013	2021
F. Pásma	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4/5 GHz	5 GHz	2,4/5 GHz
Max. dosah	35 m	35 m	40 m	70/35 m	35 m	35 m
Bitrate	11 Mb/s	54 Mb/s	54 Mb/s	288/600 Mb/s	5 300 Mb/s	530 Mb/s

Tabulka 2.1: Vývoj verzí Wi-Fi [28]

2.5 Bluetooth

Další hojně používanou technologií je Bluetooth. První verze Bluetooth 1.0 vyšla v roce 1999. Účelem vytvoření technologie Bluetooth bylo umožnit bezdrátovou komunikaci mezi různými zařízeními a nahradit starší konektory, jako je sériový port RS-232 či jiné, které byly používány pro připojení periférií počítačů. Bluetooth 1.0a a jeho vylepšení 1.0b nabízely maximální rychlost přenosu dat kolem 732.2 kb/s a dosah připojení až 10 metrů. Verze 1.2 tuto rychlost zvýšila na 1 Mbps. Krom toho dokázala i rychleji vyhledávat a párovat zařízení. Během následujících let byl Bluetooth 1.2 integrován do zařízení jako jsou hands-free sluchátka, mobilní telefony a notebooky. I přes vylepšení, Bluetooth 1.2 stále neměl dostatečnou šířku pásma pro přenos kvalitního zvuku. Během let prošla technologie velkým vývojem a v zařízeních se vystřídala mnoha jejich verzí. Nejnovější komerčně používaná verze 5.3 z roku 2021 nabízí rychlost přenosu 2 Mbps a dosah až 240 m. Nevýhodou technologie Bluetooth je, že nabízí prozatím pouze komunikaci point-to-point, tj. mezi 2 zařízeními a neumožňuje budování sítě. To ji vylučuje jako kandidáta pro použití v této práci. [29]

2.6 Síť GSM

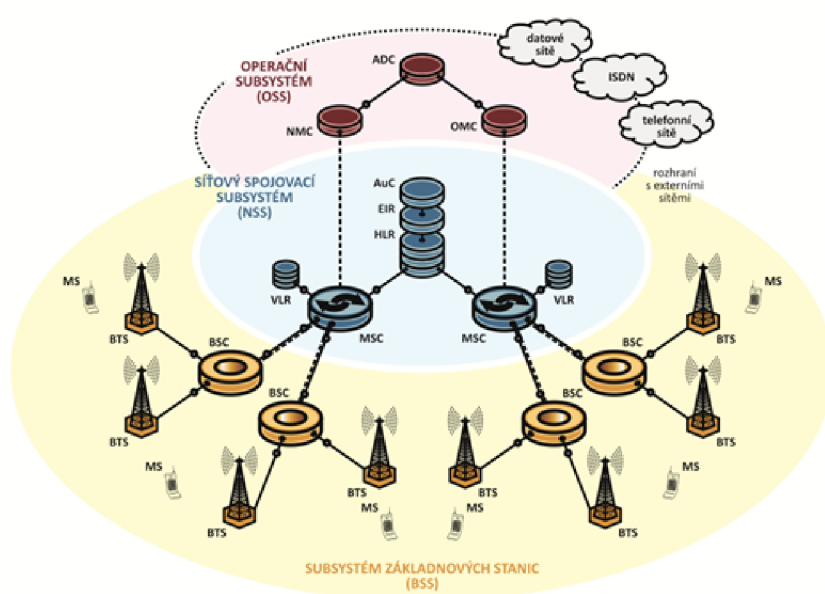
Zkratka GSM znamená „Global System for Mobile Communications“. Jedná se o celosvětově rozšířený standard pro telekomunikaci, který je možné znát i pod zkratkou 2G. Síť 2G byla spouštěna roku 1991. Předchozí bezdrátové sítě byly až zpětně nazvány 1G. Hlavní změnou byla digitalizace signálů. Signály v sítích 1G jsou analogové, signály v sítích 2G jsou již digitální. Oba systémy však používají digitální signalizaci mobilním rádiovým věží pro připojení ke zbytku systému mobilní sítě. Výhodami oproti 1G pak byla lepší přenosová rychlost, lepší kvalita zvuku, možnost posílání SMS zpráv a mezinárodního roamingu. Síti 2G byly přiděleny frekvenční pásma 900 a 1800 MHz. Ačkoliv byla 2G pro mobilní telefony postupně nahrazena

novějšími sítěmi 3G, 4G a 5G, tak je stále využívána v IoT, kde je dlouhá výdrž baterie důležitější než vysokorychlostní přenos dat. Předběžně by síť měla v České Republice fungovat do roku 2028. [30] [31]

GSM síť se skládá ze tří částí:

- Subsystem základnových stanic BSS (Base Station Subsystem)
- Síťový spojovací subsystem NSS (Network Switching Subsystem)
- Operační subsystem OSS (Operation Support Subsystem)

Subsystem základnových stanic BSS má za úkol přidělovat a uvolňovat kanály pro komunikaci s jednotlivými mobilními stanicemi MS. MS vždy zachytí signály z okolních základových stanic BS, ze kterých je vybrána ta nejvhodnější pro navázané spojení. Síťový spojovací subsystem NSS je telefonní ústředna s tzv. identifikační databází, obsahující registry uchovávající informace u účastníků a stanicích. Operační subsystem OSS se stará o provoz subsystemů BSS a NSS, řeší administrativní úlohy (např. zprávu účastnických poplatků, vyúčtování, apod.), zajišťující celkové řízení toku informací v síti, řešící úlohy údržby a zajištění provozu sítě. [30] [31] [32]



Obrázek 2.9: Architektura GSM Sítě [32]

Při využití technologie GSM v této práci by bylo nejlepším řešením ukládat data na cloud. K samotnému přenosu by bylo možné využít např. modul Sim800c. Z hlediska rychlosti a objemu dat by využití GSM v úloze vibrodiagnostiky bylo v pořádku. Výhodou by byl velmi vysoký dosah, podmíněný pokrytím signálu. Nevýhodou by mohla být cena modulů, SIM karet, případně hostingu cloudu.

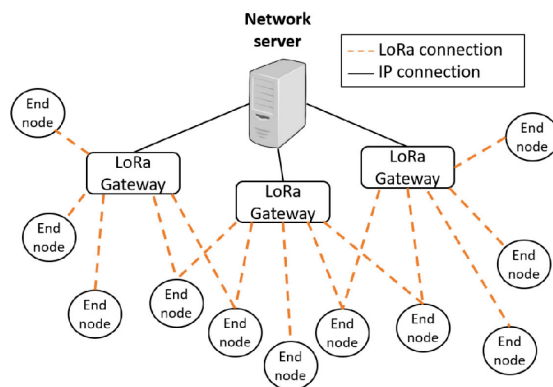
2.7 Technologie LoRa

LoRa je velmi hojně používanou bezdrátovou technologií, zejména v IoT. Tato technologie byla patentovaná v roce 2014 společností Semtech, pracující v sub-GHz ISM pásmu. Zkratka LoRa vychází z anglického Long Range, což znamená dlouhá vzdálenost. Ta může v perfektních podmínkách dosahovat víc než 10 kilometrů. [33]

LoRa definuje fyzickou vrstvu přenosu, tj. zajišťuje komunikaci, zatímco LoRaWAN je oficiální standard, definující architekturu sítě a její komunikační protokol. Společně pak LoRa a LoRaWan vytváří sítě v IoT, díky duplexní komunikaci, nízké spotřebě a zabezpečení.

LoRa technologie je navržena pro komunikaci na dlouhé vzdálenosti, typicky schopná přenášet signál v otevřeném prostoru i přes několik kilometrů. Je ideální pro aplikace rozprostřené po velkých plochách, jako je např. chytré zemědělství či průmyslový internet věcí (IoT). LoRa je navržena s ohledem na nízkou spotřebu energie, což umožňuje dlouhou životnost baterie u zařízení. Tato technologie je vhodná pro aplikace, které dávají přednost dlouhodobé komunikaci, dlouhé výdrži baterie a nízkým datovým rychlostem. Běžné příklady použití zahrnují sledování zemědělských aplikací, monitorování životního prostředí a sledování majetku. Nízká spotřeba je však docílena na úkor nízkým přenosovým rychlostem. Ty se pohybují v rozmezí od několika stovek bitů za sekundu (bps) do několika kilobitů za sekundu (kbps). Rychlost přenosu není možné určit obecně, jelikož ji ovlivňují frekvenční pásmo ve kterém vysílá a parametry Spreading Factor(SF) a Coding Rate(CR). Spreading Factor určuje, jak moc jsou data "rozprostřena" v čase při vysílání. Vyšší SF umožňuje signálům dosáhnout větší vzdálenosti, ale zpomaluje rychlost přenosu. SF lze nastavit mezi hodnotami 7 a 12. Coding Rate vyjadřuje poměr mezi daty a informacemi přidanými pro opravu chyb. Vyšší coding rate znamená více informací pro opravu chyb, což zvyšuje spolehlivost přenosu za cenu snížení efektivní rychlosti dat. K výpočtu výsledné rychlosti přenosu lze použít různé online kalkulátory. V závislosti na zmíněných SF a CR parametrech se pohybuje v rozmezí 11 bps až 22 Kbps. Dosah je kromě těchto dvou parametrů závislý na vysílacím výkonu. Typicky se pohybuje v jednotkách až desítkách km. Rekordní přenos byl naměřen roku 2023 mezi Lisabonem a Kanárskými ostrovy, na vzdálenost 1336 km. [34] [35]

Architektura sítě LoRa využívá topologii hvězda. Centrálními prvky jsou tzv. brány (gateways). Ty slouží jako prostředník mezi koncovými zařízeními a serverem. Server je pak centrálním prvkem bran, proto se dá topologie LoRa sítě označit jako hvězda-hvězd. [36] [37]



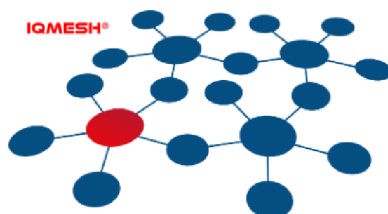
Obrázek 2.10: Topologie LoRa [36]

2.8 Technologie IQRF

IQRF je bezdrátová technologie využívající topologii Mesh sítě. Pracuje v sub-GHz ISM rádiových pásmech, v Evropě konkrétně v pásmu 868 MHz. Za vývojem stojí Jičínská společnost Miscrorics, která své výrobky distribuuje do oblastí automatizace budov, chytrého veřejného osvětlení, parkování a mnoha dalších odvětví. Jedná se o zdarma open-source platformu a při jejich vývoji je kladen důraz na nízkou spotřebu, aby moduly na bateriích vydržely i v řádu let. Dosah komunikace jejich modulů je udáván v budovách na desítky metrů, mimo budovy v otevřeném prostředí pak stovky metrů. [38] [39]

2.8.1 Princip a parametry IQRF

IQRF síť využívá vlastní protokol zvaný IQMESH. Pyšní se velkou propustností a robustností sítě, která je schopna pojmout až 240 zařízení. Maximální čas routování v rámci celé sítě je 100 ms. Přenášený paket má velikost 64 Bajtů, z něhož lze využít až 55 Bajtů pro uživatelská data. Vysílací výkon je nastavitelný v TR konfiguraci jednotlivých transceiverů. Při maximální hodnotě 10mW je maximální dosah až ve stovkách metrů v závislosti na prostředí. [38] [40]



Obrázek 2.11: IQMESH [38]

2.8.2 Transceiver

Základním prvkem je tzv. IQRF Transceiver, malé elektronické zařízení, obsahující mikrokontroler, napěťový regulátor, paměť EEPROM a anténu. Tyto transceivery existují v různých provedeních, lišících se převážně výkonem, velikostí paměti a fyzickou podobou. Vyrábí se buď s integrovanou "On-board" anténou, pájecí ploškou či U.FL konektorem. Jako patice pro jednoduché vyjmutí slouží specializované SIM konektory. [40]



Obrázek 2.12: IQRF Transceiver TR-76G [40]

Transceivery IQRF disponují periferiemi UART, SPI, integrovaným teplotním čidlem a dvojicí LED diod. K nim se přistupuje pomocí příslušných DPA příkazů. Použití komunikace UART a SPI musí být upřesněno v TR konfiguraci, která je do příslušného Transcieveru nahrána. Transciever může pracovat v různých režimech a to buď síťově nebo nesíťově. V nesíťové aplikaci se jedná většinou o přenos mezi dvěma sobě rovnými transceivery. V aplikaci síťové, neboli IQMESH, je třeba rozlišovat zda transciever zastává roli koordinátora nebo noda. V každé IQMESH síti je vždy jeden koordinátor, který tvoří centrální prvek sítě, vysílá žádosti nodům a případně komunikuje s IQRF IDE. Nodů může být v síti libovolné množství, maximálně však 239. [38] [40] [39]

Koordinátor může vysílat ve dvou režimech. Těmi jsou:

- Unicast - Paket je vyslán jednomu konkrétnímu nodu. Koordinátor čeká na odpověď.
- Broadcast - Paket je určen všem nodům. Koordinátor odpověď nežadá.

Parametry Transcieverů:

- Nastavitelné ISM pásmo - 868/916/433 MHz
- Nastavitelný vysílací výkon - 1 až 10 mW
- Dosah až 500 metrů při 10 mW
- 6 až 10 I/O pinů
- EEPROM 32 KB
- SPI, UART a I2C rozhraní

- MCU PIC16LF1938
- Napájecí napětí 3.1 – 5.3 V (Napěťový regulátor MCP1700)
- Odběr proudu 1.7 μ A až 25 mA v závislosti na režimu TR (spánek/příjem/-vysílání) a vysílacím výkonu

Ke komunikaci Transceiveru s IQRF IDE slouží tzv. Programmer, který je vybaven rozhraním USB. Ten je nutný pro všechny důležité akce, jako je nahrávání pluginů, TR konfigurací, Bonding a Discovering IQRF sítě. Prostřednictvím programátora lze rovněž odesílat coordinatoru DPA příkazy z počítače a číst odpovědi nodů, které obdrží. [41]



Obrázek 2.13: IQRF Programmer CK-USB-04A [41]

2.8.3 Další hardwarové prvky IQRF sítě

Dalšími volitelnými hardwarovými prvky IQRF sítí mohou být například Gateway a repeatery. Gateway slouží k propojení IQMESH sítě se zbytkem světa. To je možné buď pomocí Ethernetu, Wi-Fi nebo LTE. Díky tomu je možné např. k síti přistupovat přes mobilní aplikaci, či ukládat data na Cloud. Repeater slouží pro rozšíření sítě, díky čemuž mohou být transcievery ve větší vzdálenosti od sebe. Jako repeatery mohou sloužit i samotné transcievery, které v síti nemusí plnit žádnou speciální úlohu a pouze rozšiřují síť.

2.9 Porovnání bezdrátových technologií

Technologie	F.pásmo	Topologie	Dosah	Rychlost	Cena modulu
Wi-Fi (4)	2,4 GHz / 5 GHz	Hvězda/Mesh	70m (2.4GHz)	288 Mb/s (2.4GHz)	170 Kč
GSM	900/1800/1900 MHz	Hvězda hvězd	Závisí na pokrytí	12,2 Kbps	250 Kč
LoRa	868 MHz	Hvězda hvězd	15km	11 bps - 22 Kbps	375 Kč
IQRF	868 MHz	Mesh	500m	19,8 Kbps	350 Kč

Tabulka 2.2: Porovnání bezdrátových technologií

Technologie Wi-Fi je ve všech ohledech vhodnou volbou. Jedinou nevýhodou může být její dosah, který se na první pohled může zdát dostatečný, avšak ve vnitřních prostorech s překážkami a přítomností rušení od jiných sítí může být znatelně nižší. U technologie Wi-Fi byla v tabulce uvedena verze 4 (802.11 n) ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz, jelikož právě tu obsahuje modul ESP32, který bude dále v práci využíván.

U technologie GSM je navíc kromě ceny modulu zapotřebí SIM karta a placení jejích služeb. To se v případě přenosu dat může značně prodražit. Rovněž jeho vysoký dosah, který je závislý pouze na pokrytí signálu je v úlohách lokálních měření nadbytečný. LoRa disponuje rovněž velkým, až nadbytečným, dosahem. Stále však zůstává pro použití přijatelnou volbou.

Technologie IQRF má v porovnání s technologiemi GSM a LoRa velmi podobnou rychlost přenosu. Dosah 500m je dostatečný i pro měření na strojích v jiných částech haly či jiných budovách. výhodou IQRF je i velmi dostupná podpora díky tomu, že jde o malou lokální firmu.

3 Hardwarové prvky modulu

Tato část práce se bude věnovat postupnému výběru hardwarových komponent, který by měl modul obsahovat.

3.1 Výběr řídicí platformy

Řídicí platforma bude sloužit k měření dat, jejich zpracování a přípravě pro následný bezdrátový přenos. Možností, jakou řídicí jednotku využít, je mnoho. Roli zde budou hrát faktory jako je výkon CPU, cena, velikost a rozlišení AD převodníku vstupních analogových pinů. V případě zvolení možnosti napájení bateriemi i spotřeba.

3.1.1 Možnosti

Arduino

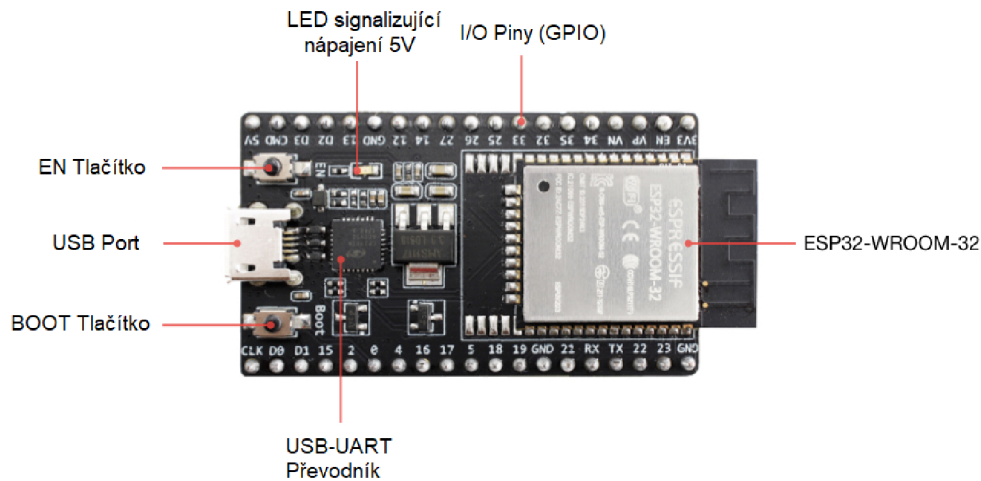
Arduino je velmi oblíbená a praktická platforma. Oblibu si získala díky své uživatelské přívětivosti. Oproti jiným platformám má však velmi nízký výkon CPU ATmega328P, který činí 20 MHz. Rovněž velikost paměti Flash 32KB a SRAM 2KB není mnoho. Proto pro aplikaci, kde je potřeba měřit a zpracovávat velké množství dat, není vhodná.

ESP32

ESP32 je výkonný, energeticky efektivní a vysoce integrovaný mikrokontroler vhodný pro širokou škálu aplikací, od průmyslových prostředí po IoT a bezdrátové technologie. Obsahuje hybridní Wi-Fi/Bluetooth čip pro nasazení v bezdrátových technologiích, rozhraní UART, SPI, I2C a celou řadu vstupně/výstupních (GPIO) pinů. ESP32 je optimalizován pro nízkou spotřebu energie, což je zásadní pro mobilní zařízení, nositelnou elektroniku a IoT aplikace. To dosahuje dynamickým škálováním výkonu a změnami pracovních režimů. [42]

CPU	240 MHz, 32 Bit 1 jádro / 160 MHz, 32 Bit, 2 jádra
Velikost paměti	Velikost paměti 448 KB ROM / 520 KB SRAM
Počet GPIO pinů	34
Počet ADC	2 (18 kanálů)
Rozlišení ADC	12 bitů
UART	3x
SPI	4x
I2C	2x
Wi-Fi	802.11n (2.4 GHz, až 150 Mbps)
Bluetooth	Bluetooth 5 (LE)
Provozní teplota	-40 až 120 °C

Tabulka 3.1: Parametry mikrokontroleru ESP32



Obrázek 3.1: Vývojová deska ESP32 [42]

Deska obsahuje 2 tlačítka. Tlačítko EN slouží převážně k resetu procesoru a tím programu. Tlačítko BOOT je pro nahrání programu z PC. Napájení musí být zajištěno právě pouze jednou ze třech uvedených možností, jinak může dojít k poškození desky. [42]

- USB
- 5V Pin + GND
- 3,3 V Pin + GND

Mikrokontroler ESP32 je vybaven dvěma 32-bitovými procesory. To umožňuje vykonávání dvou "tasků" najednou. Při tvorbě kódu v Arduino IDE je celý kód defaultně vykonáván pouze jedním procesorem, pro rozšíření je nutné vyvolat funkci pro založení druhého "tasku". [43]

Vybaven je dvěma kvalitními 12bitovými ADC převodníky, které může využívat až 18 různých měřicích kanálů (GPIO pinů). Nemůže tak probíhat více než 2 analogové měření současně. Tyto ADC podporují dva módy: ADC-RTC pro pomalejší vzorkovací frekvence a ADC-DMA pro rychlejší vzorkovací frekvence. Maximální dosažitelná frekvence pak závisí na obsahu tasku, ve kterém měření probíhá a zda modul pracuje s Wi-Fi. Uvádí se, že v režimu ADC-DMA lze teoreticky dosáhnout vzorkovací frekvence až 2 MHz. ESP32 se vyrábí v provedení pro Micro USB i pro USB C. [42] [44]

ESP8266

Jedná se o předchůdce ESP32. Má nižší výkon, pouze jedno jádro procesoru, menší paměť, méně I/O pinů atd. Díky nízké ceně má však stále využití, např. v různých IoT zařízeních.

PIC

PIC mikrokontroléry jsou známé svou cenovou dostupností pro nízkonákladové projekty. Jsou široce používány v různých aplikacích, od jednoduchých zařízení jako jsou hračky a domácí spotřebiče až po složitější systémy v průmyslu. PIC jsou dostupné v různých variantách, od jednoduchých 8-bitových modelů až po 16-bitové a 32-bitové mikrokontroléry. Pouze některé z variant obsahují integrované AD převodníky. Jedním z nich může být např. PIC16F687. Nevýhodou mikrokontrolerů PIC je to že nejsou v podobě vývojové desky, proto je nutno zajistit napájení a použít příslušný programátor. Toto však může být při hromadné výrobě z hlediska ceny a úspory místa výhodou. Další ale velmi důležitou nevýhodou je stejně jako u Arduina nízký výkon a velikost paměti.

Raspberry PI

Raspberry Pi je dnes velmi populární a to z důvodu, že běží na plnohodnotném operačním systému Linux a možnosti připojení různých periférií. Ve své standardní konfiguraci však nemá analogové vstupní piny, je navrženo pouze s digitálními GPIO piny. Pro analogové čtení bychom museli použít např. modul MCP3008, 8-kanálový 10-bitový AD převodník.

3.1.2 Porovnání

Platforma	Arduino Nano	ESP32	ESP8266	PIC16F687	Raspberry PI(4)
CPU	20 MHz, 8bit	240 MHz, 32bit (2x)	120 MHz, 32bit	20 MHz, 8 bit	1,5 GHz, 64 bit
Velikost paměti	32KB Flash, 2KB SRAM	4/8/16MB Flash, 520KB SRAM	1/2/4MB Flash, 160KB SRAM	7KB program, 256B RAM, 256B EEPROM	1GB RAM, SD karta
Počet ADC	6	2 (18 kanálů)	1	12	0
Rozlišení ADC	10bit	12bit	10bit	10bit	
Maloobchod. cena	od 150 Kč	od 180 Kč	od 90 Kč	od 50 Kč	od 950 Kč
Rozměry	45x18 mm	50x28 mm	49x26 mm	52x15 mm	88x58 mm
I2C rozhraní	ano	ano	ne	ano	ano

Tabulka 3.2: Porovnání řídicích platforem

Při srovnání uvedených platforem prakticky ve všech parametrech vynikala platforma ESP32, proto bude v obou řešeních použita. Navíc již obsahuje integrované Wi-Fi rozhraní, takže při prvním řešení nebude třeba žádného přídatného modulu.

ESP8266 by mohlo být použito pouze v případě měření jedním akcelerometrem s analogovým výstupem. Má totiž pouze jeden analogový měřicí pin a I2C rozhraní nedisponuje. Arduino je poměrem cena/výkon velmi špatnou volbou. Rovněž PIC mikrokontrolery nedisponují dostatečným výkonem a hlavně pamětí, která je opravdu velmi malá. Raspberry PI má výkon až zbytečně vysoký, čemuž odpovídá také cena. Po posouzení všech aspektů navržených platforem zůstalo ESP32 jediným vhodným řešením.

3.2 Výběr bezdrátové technologie

Z porovnání v předchozí kapitole byly pro řešení vybrány technologie Wi-Fi a IQRF. Při využití Wi-Fi technologie není při použití ESP32 třeba dalšího modulu. U technologie IQRF bude třeba každý modul vybavit Transceiverem. Výhody a nevýhody obou řešení jsou uvedeny v tabulce 3.3.

ESP32 Wi-Fi mesh	IQMESH
+ nízká cena	+ jednoduchá správa sítě přes IQRF IDE
+ jednoduchá implementace	+ vysoký dosah
+ vysoký možný objem přenášených dat	+ odolnost proti rušení
- nízký dosah	- obtížná implementace konkrétní aplikace
- rušení ostatními Wi-Fi sítěmi	- nízký možný objem přenášených dat
- není možné síť spravovat a dynamicky měnit	- vysoká cena IQRF prvků

Tabulka 3.3: Výhody a nevýhody navržených řešení

3.3 Výběr akcelerometru

Při výběru akcelerometru je důležité, aby měl velký měřicí rozsah neboli šířku pásma. Tak aby zachytil co nejvíce harmonických otáčkové frekvence. Otáčky obráběcích strojů se v závislosti na požadované řezné rychlosti a průměru obrobku/nástroje pohybují v řádech desítek až desetitisíců. Požadovanou řeznou rychlost ovlivňuje typ operace, materiál nástroje i obrobku a požadovaná přesnost a hrubost povrchu. U soustružení dosahují otáčky až 5000 rpm, u frézování to může být až 30000 rpm (v případě plastů). Frekvence otáčení odpovídá otáčkám za sekundu, proto je možné ji vyjádřit vzorcem, kde f je frekvence v hertzech [Hz] a n je počet otáček za minutu (rpm). [45]

$$f = \frac{n}{60} \quad (3.1)$$

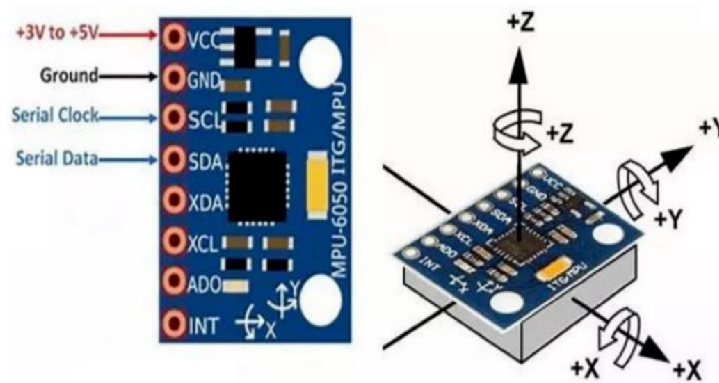
Pokud by například rychlost vřetena obráběcího stroje byla 3000 rpm, pak by otáčková frekvence byla 50 Hz. Pro detekci nízkofrekvenčních závad, jako jsou nesouososti, nevyváženosti, či volnosti stačí teoreticky vyhodnocovat např. prvních deset harmonických, tj. do 500 Hz. Pro detekci vysokofrekvenčních závad, jako je např. poškození ložisek, je vhodné vyhodnocení např. až do 16 KHz. [45]

Další požadavek na výběr akcelerometru je vysoká citlivost a to zejména v případě, kdy nelze akcelerometr umístit přímo na ložisko, ale na jinou část konstrukce stroje. Přívodní kabel k akcelerometru by neměl být zbytečně dlouhý, aby nebyl signál příliš rušen, např. od vinutí elektromotoru. Akcelerometr by měl mít také co nejnižší hmotnost, aby nedocházelo k ovlivnění naměřených dat. V neposlední řadě je důležitá teplotní stabilita akcelerometru, jelikož v prostoru jeho umístění může dojít k zahřívání. [46] [45]

Vhodnou volbou je použití akcelerometru piezoelektrického, který je běžně v podobných aplikacích profesionálně využíván. K prvotnímu testování však budou použity dvě levnější alternativy. Prvním z nich je modul GY-521 s akcelerometrem MPU6050. Druhým je ADXL335.

GY-521

GY-521 je běžně dostupný modul, který plní funkci akcelerometru a gyroskopu. Dokáže detekovat vibrace ve všech třech směrech a rotacích. Je vybavený 16-bitovým AD převodníkem a poskytuje tak velmi přesné výsledky. GY-521 obsahuje I2C rozhraní, díky kterému dokáže komunikovat např. s platformami Arduino nebo ESP32. Mikroprocesor na desce s akcelerometrem čeká na žádost o příslušné hodnoty a odešle je zpět. Výhodou je, že nemusí posílat všechny veličiny, pouze ty o které bylo zažádáno příchozím příkazem. K provozu komunikace I2C slouží např. knihovna *Wire.h*. [47] [48]

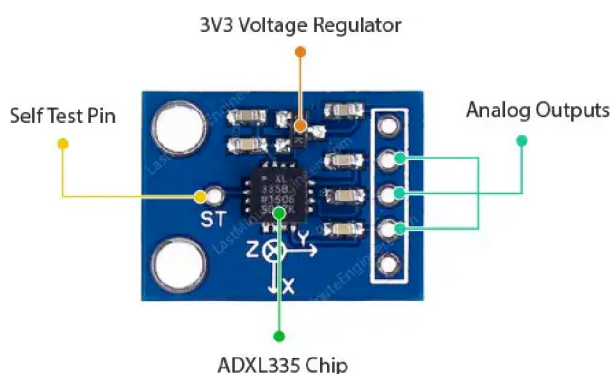


Obrázek 3.2: Akcelerometr GY-521 [49]

Napájecí napětí modulu může být v rozmezí 3 až 5 V. Odběr proudu se liší v závislosti na pracovním režimu. V režimu spánku $5\mu\text{A}$, v režimu měření zrychlení $500\mu\text{A}$. Maximální vzorkovací frekvence je udána 1 KHz. [48]

ADXL335

Tento akcelerometr nevyužívá žádnou speciální komunikaci. Obsahuje 3 datové piny (pro každou osu), které poskytují informaci o aktuálním zrychlení v podobě analogového signálu. Každý z těchto pinů může být připojen na analogové piny mikrokontroleru. Přesnost pak tedy záleží na rozlišení AD převodníku samotného mikrokontroleru. Parametry pro napájení a zpracování hodnot jsou uvedeny v tabulce 3.3. Bias neboli offset je stejnosměrná složka, potřebná pro měření zrychlení v obou směrech. [50]



Obrázek 3.3: Akcelerometr ADXL335 [50]

Napájecí napětí	1.8 až 3.6 V
Napájecí proud	350 A (3 V)
Měřicí rozsah	+3g
Citlivost	300 mV/g
Bias	1.5 V
Frekvenční rozsah	0.5-1600 Hz (X a Y) 0.5-550 Hz (Z)

Tabulka 3.4: Parametry akcelerometru ADXL335

3.4 Napájení

Pro napájení všech prvků je vhodné zajistit jednotné stejnosměrné napětí 3.3 V. Jako měnič na toto napětí bude použit stabilizátor LM1117. Ten dovoluje připojení zdroje napětí o velikosti 4.5 až 12V. Napájení bude však s největší pravděpodobností pro větší flexibilitu řešeno bateriově. Modul však bude mít stále možnost připojení pevného zdroje či napájení pomocí USB. Tyto tři možnosti napájení ho činí velmi praktickým.

Vzhledem k větší kapacitě a životnosti je vhodnější použití lithiových než alkalických baterií. V případě dlouhodobě zapnutého modulu, může dojít k jeho rychlému vybití. IQRF Transceiver dokáže být v režimu spánku, ale ESP32, akcelerometr a LED dioda ne. Pro účely testování však budou zatím použity baterie alkalické.

3.5 Vypínač a LED dioda

Modul by měl obsahovat vypínač pro úsporu energie z baterií při jeho nevyužívání. Rovněž je praktické ho vybavit LED diodou pro signalizaci napájení. Při použití LED diody je třeba použít vhodný ochranný resistor.

$$R = \frac{V_{\text{supply}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}} \quad (3.2)$$

R : Odpor ochranného rezistoru(Ω)

V_{supply} : Napájecí napětí zdroje (V)

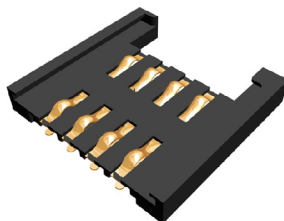
V_{LED} : Úbytek napětí na LED diodě (V)

I_{LED} : Proud procházející LED diodou (A)

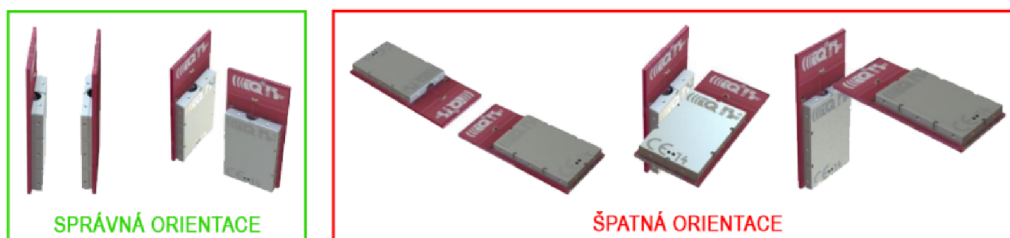
Při použití zelené diody s úbytkem napětí 2,2V, napájecím napětím 3,3V a maximálním pracovním proudem 10 mA, je třeba použít resistor s odporem minimálně 110 Ohmů.

3.6 Konektor IQRF

Jako patice pro IQRF Transceiver bude použit osmipinový SIM konektor. Transceiver usazený v konektoru by měl být ve svislé poloze pro dosažení nejlepších přenosových vlastností. Ač je mikrokontroler ESP32 velmi často celosvětově využíván, tak pro něho na trhu neexistují žádné patice, proto bude do desky přímo zapájen. Další možností by bylo využití standartních pinových konektorů s roztečí 2,5 mm.



Obrázek 3.4: SIM konektor pro IQRF Transceivery [51]

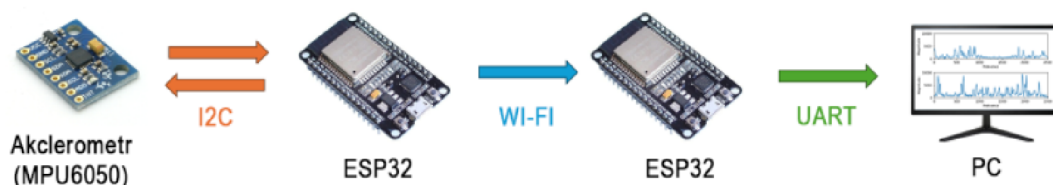


Obrázek 3.5: Orientace Transceiveru [52]

4 Vývoj software

4.1 WI-FI mesh varianta

V síti využívající knihovnu *PainlessMesh* neexistuje, narozdíl od IQMESH, žádný coordinator. Všechny uzly jsou si rovny. Datové pakety ze všech modulů jsou tak posílány mezi sebou. Připojením na sériový port libovolného modulu je možné všechna tyto data číst.



Obrázek 4.1: Struktura měřicí sítě využívající Wi-Fi mesh

4.1.1 Způsob přenosu dat

Pro přenos dat byla zde zvolena nejjednodušší cesta a to ve formě textových řetězců. Ty jsou pak vysílány do sítě a vždy po obdržení zapsány na sériový port. Libovolný uzel pak může být připojen k počítači, který bude data na portu číst. Na rozdíl od řešení s IQMESH, zde modul přijímá a odesílá data pouze, když neprovádí měření. Proto je pro lepší přenos použit uzel s nahraným programem, který měření neprovádí. Tento program pak může být nahrán do libovolného ESP32 pro rozšíření sítě. Oba programy jsou k dispozici v digitální příloze.

Podoba textových dat na COM portu je zobrazena na obrázku 4.2. Kromě čísla modulu je ve výpisu zobrazeno i Id nodu, které je automaticky přidělováno knihovnou *PainlessMesh*. Pro větší efektivnost lze tento text odstranit, na čtení dat nemá vliv.

```
Obdržena data od 4192279389: modul1:0.00, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01,
Obdržena data od 841471141: modul5:0.00, 0.02, 0.02, 0.11, 0.09,
Obdržena data od 3005980285: modul3:0.01, 0.02, 0.03, 0.03, 0.01,
Obdržena data od 4192279389: modul1:0.00, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01,
Obdržena data od 841471141: modul5:0.00, 0.02, 0.02, 0.11, 0.09,
Obdržena data od 3005980285: modul3:0.00, 0.02, 0.02, 0.06, 0.04,
```

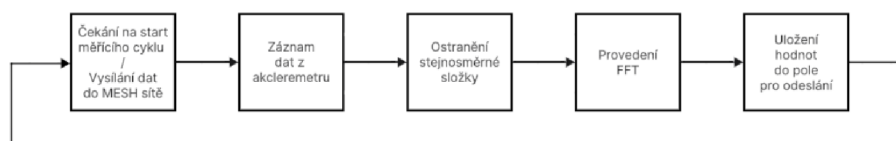
Obrázek 4.2: Výstupní text na COM portu

4.1.2 Firmware modulu

Program ESP32 pracuje v cyklu. Uživatel si nastaví časovou prodlevu mezi měřeními, tj. jak často probíhá aktualizace dat. Mezi měřeními dochází k odesílání získaných

dat do sítě. Kromě zmíněného intervalu měření, je možné nastavit vzorkovací frekvenci. Ta by měla být alespoň dvojnásobek maximální měřené frekvence. Maximum je omezeno výkonem CPU, ale i samotným akcelerometrem. Např. testovaný akcelerometr GY-521 má maximum pouze 1 KHz. Nastavením nadbytečně vysoké vzorkovací frekvence by došlo k roztažení vypočítaného spektra a tím ztrátě přesnosti ve frekvenčním pásmu, které nás zajímá.

Počet vzorků není možné nechat volně nastavitelný. Program je schopný odebrat libovolné množství vzorků (omezeno pamětí), FFT však vyžaduje, aby byl počet vzorků roven mocnině čísla dvě. V případě změny počtu vzorků (např. z 256 na 512), je třeba provést tuto změnu i v softwaru pro sběr dat.



Obrázek 4.3: Struktura smyčky programu

Konfigurace sítě

PainlessMesh je knihovna pro Arduino, která umožňuje vytváření mesh sítí mezi zařízeními ESP8266 a ESP32. Tato síť umožňuje zařízením komunikovat mezi sebou bez potřeby centrálního směrovače. Zde jsou vysvětleny nastavitelné parametry sítě:

- MESH_PREFIX: Tento parametr slouží jako identifikátor mesh sítě. Jedná se v podstatě o název sítě.
- MESH_PASSWORD: Toto je heslo pro přístup k síti. To zajišťuje základní úroveň zabezpečení sítě proti neoprávněnému přístupu
- MESH_PORT: Port, na kterém síť komunikuje. Výchozí hodnota je 5555. V případě konfliktu s jinými porty používanými na zařízeních je možné ho změnit.

Parametry lze libovolně měnit. Důležité je, aby všechna zařízení v síti měla tyto parametry nastavené stejně.

Zdrojový kód 4.1: Konfigurace Wi-Fi mesh sítě

```

#define MESH_PREFIX "MericiSit"
#define MESH_PASSWORD "vibrodiagnostika"
#define MESH_PORT 5555
  
```

Nastavení akcelerometru

Akcelerometr MPU6050 má nastavitelnou citlivost, která ovlivňuje také měřený rozsah. MPU6050 má totiž rozlišení 16 bitů, tudíž jeho výstup může nabývat hodnot

-32768 až +32767. Je pak na uživateli, zda dá přednost vyšší citlivosti či rozsahu. Pokud je třeba měřit velmi jemné změny ve zrychlení (např. právě při měření vibrací), je vhodné zvolit nastavení $\pm 2g$. Toto nastavení je nejcitlivější. Pokud očekáváme, že zařízení bude vystaveno vysokému zrychlení, měli bychom zvolit vyšší rozsah, aby se zabránilo saturaci signálu. Krom nastavení citlivosti je třeba zapsat hodnotu 0 do "Power Management" registru. Tím je deaktivován spánkový režim a MPU6050 je tak připraven ke sběru dat. [48]

Měřicí rozsah	Citlivost [LSB/g]	Nastavení 4. a 3. bitu konfiguračního registru	Zápis v HEX
$\pm 2g$	16384	00	0x00
$\pm 4g$	8192	01	0x08
$\pm 8g$	4096	10	0x10
$\pm 16g$	2048	11	0x18

Tabulka 4.1: Nastavení citlivosti akcelerometru MPU6050 [48]

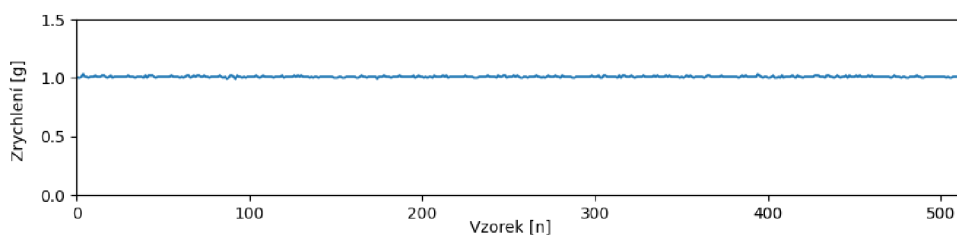
ADXL335 poskytuje analogový signál s biasem 1.5 V a citlivostí 300 mV/g, pro získání hodnoty zrychlení v g je třeba provést následující přepočít.

Zdrojový kód 4.2: Čtení a úprava dat z ADXL335

```
int z_adc = analogRead(zPin);
float z_volt = (z_adc / 4095.0) * 3.3;
z = (z_volt - 1.5) / 0.3;
```

Měření

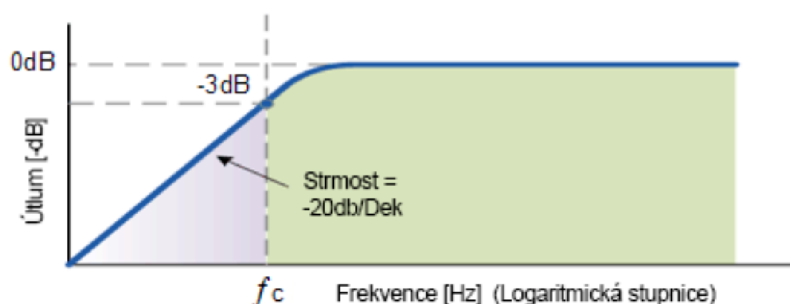
Při spuštění programu se okamžitě spustí první měření. Po jeho vykonání je uložen čas posledního měření a další je provedeno až po uplynutí nastaveného intervalu. V případě akcelerometru ADXL335 je měření prováděno jednoduše pomocí funkce analogRead, která je aplikována na jeden z pinů podle požadované osy. Data z akcelerometru MPU6050 jsou uložena v příslušných registrech. Jejich obsah je odeslán po vyžádání mikrokontrolerem. Zrychlení osy X je konkrétně uloženo v registrech 3B a 3C. Ose Y jsou pak vyhrazeny 3D+3E a ose Z 3D+40. V aktuální podobě program zpracovává pouze zrychlení v jedné ose. V případě potřeby by bylo snadné program rozšířit pro směry další. Jako výchozí je nastavena osa Z. V případě potřeby, je volba směru popsána v komentáři kódu. Výstup z akcelerometru v klidovém režimu je zobrazen na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Výstup z akcelerometru

Filtrování

Pro zpracování naměřených hodnot je vhodné použít horněpropustní filtr, který odstraní ze signálu stejnosměrnou složku neboli offset. Ta je bohužel u testovaných akcelerometrů vždy přítomna. Pokud je měřeno zrychlení ve vertikální ose, tak zahrnuje stejnosměrná složka gravitační zrychlení. Viz obrázek 4.4. Nejjednodušší možností je použít algoritmus pro filtr 1.řádu. S řády filtru stoupá strmost frekvenční charakteristiky filtru, avšak také náročnost výpočtu a fázový posun. Bodeho frekvenční charakteristika je zobrazena na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Frekvenční charakteristika horní propusti prvního řádu [53]

Každý filtr lze matematicky popsat. Symbolem y se označuje výstupní signál, x se značí signál vstupní. Index n určuje pořadí vzorku, n je tedy hodnota aktuální, zatímco $n-1$ je hodnota minulé.

$$y[n] = \alpha \cdot (y[n - 1] + x[n] - x[n - 1]) \quad (4.1)$$

Parametr α ovlivňuje, jak rychle výstup filtru reaguje na změny ve vstupním signálu a jaký druh frekvencí filtr propouští. Vysoká hodnota α vede k filtru, který reaguje na malé změny a má nízkou mezní frekvenci, zatímco nízká hodnota α vytváří filtr, který vyžaduje větší změny pro reakci a má vysokou mezní frekvenci. V případě analogové realizace filtru je přímo úměrné časové konstantě RC. Pro výpočet koeficientu můžeme použít následující vztah. f_s je vzorkovací frekvence a f_c je mezní frekvence. [54]

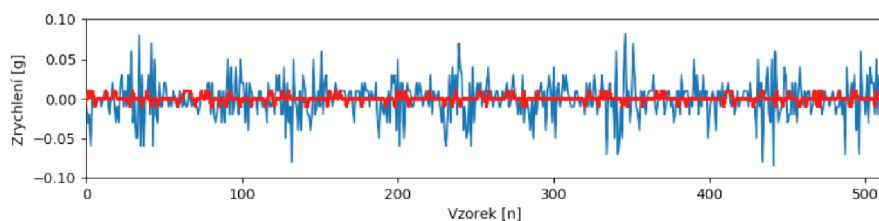
$$\alpha \approx \frac{1}{1 + 2\pi \frac{f_c}{f_s}} \quad (4.2)$$

Podle vztahu 4.1 byla realizována příslušná funkce, která je po měření vždy z hlavního programu vyvolávána.

Zdrojový kód 4.3: Implementace horněpropustního (High-Pass) filtru

```
void highPassFilter(double inputSignal[], double outputSignal[],
    int number_of_samples, double alpha) {
    outputSignal[0] = 0;
    for (int n = 1; n < size; n++) {
        outputSignal[n] = alpha * (outputSignal[n-1] +
            inputSignal[n] - inputSignal[n-1]);
    }
}
```

Na obrázku 4.6 jsou detailně zobrazeny dva signály z testování. Červená křivka je z měření v klidovém stavu. Modrá křivka pochází z měření na nespecifikovaném motoru.



Obrázek 4.6: Signály z akcelerometru po odstranění DC složky

Fourierova transformace

Po odstranění stejnosměrné složky jsou data připravena na výpočet FFT. Její princip je popsán v kapitole 1.4.1. V tomto případě je místo programování vlastního algoritmu efektivnější zvolit připravenou funkci z knihovny *arduinoFFT*. Poté mohou být data odeslána do sítě.

Odesílání dat

Data jsou odesílána v náhodných časových intervalech s nastavitelným minimem a maximem. To je z důvodu, aby se při současném vysílání více modulů předešlo k zahlcení sítě. K datům je připsáno klíčové slovo „modul“ a unikátní nastavené číslo. To bude sloužit pro rozbor textového řetězce při sběru dat.

4.1.3 Software pro vizualizaci a sběr dat

Pro vývoj jednoduchého software, umožňujícího sledovat a ukládat data, existuje mnoho možností. Zvolen byl programovací jazyk Python a to například díky knihovně *matplotlib*, která umožňuje snadnou práci s grafy. Kromě využití grafů pro zobrazení naměřených frekvenčních spekter, jsou data i při každé aktualizaci uložena do .xlsx souboru.

Nastavitelné parametry

Počátek kódu obsahuje, kromě importu knihoven, nastavení určitých parametrů. Pro správné přiřazování přijatých hodnot frekvencím spektra je nezbytné, aby se vzorkovací frekvence a počet vzorků shodoval s nastavením ve firmwaru modulu. Tyto parametry jsou jediné volně nastavitelné, proto jsou od ostatních proměnných zřetelně odděleny.

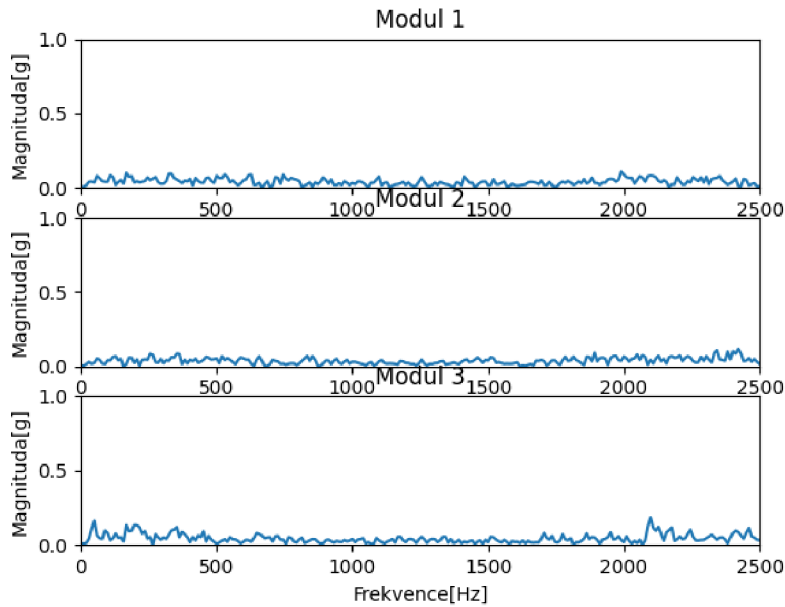
```
# Nastaveni seriového portu
ser = serial.Serial('COM5', 115200)
# Nastaveni vzorkovací frekvence měření
sampling_frequency = 2000
# Nastaveni počtu očekávaných hodnot
number_of_samples = 256
# Nastavení maxima osy Y v grafu
plot_y_max = 3
# Nastavení adresáře pro ukládání dat
excel_directory = "D:\\esp\\projekty\\dp"
```

Rozbor řetězců

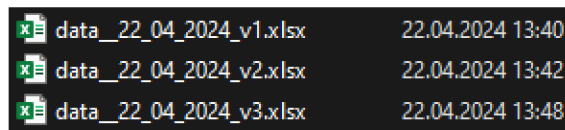
Při výskytu dat na sériovém portu je proveden průzkum, zda textový řetězec obsahuje klíčové slovo „modul“ a jeho číslo. Detekované číslo se později využije k popisu grafu a označení listu v xlsx souboru. Následně se řetězec rozdělí, pomocí jednotně zvoleného oddělovače (čárka), na konkrétní hodnoty, které jsou uloženy do pole.

Výstup

Všechny události, včetně přijímaných dat, lze sledovat v konzoli. Po jejich obdržení jsou aktualizovány grafy z knihovny *matplotlib* a soubor s příponou *xlsx*, kde jsou data uložena pro jakékoliv pozdější zpracování a analýzu. Název souboru nese datum měření a pořadí. Adresář pro ukládání lze kdykoliv jednoduše v programu přepsat. Každý modul má v souboru vlastní list se svým číslem.



Obrázek 4.7: Grafické zobrazení



Obrázek 4.8: Výstupní soubory

	A	B	C	D	E
1	Datum/Čas	0.0 Hz	9.8 Hz	19.5 Hz	29.3 Hz
2	30.04.2024 19:27:44	0,001118	0,009063	0,018459	0,041648
3	30.04.2024 19:29:29	0,00409	0,020337	0,029306	0,013582
4	30.04.2024 19:31:20	0,006068	0,02003	0,04901	0,050125
5	30.04.2024 19:33:11	0,009612	0,029774	0,035043	0,022169

Obrázek 4.9: Struktura xlsx souboru

4.2 IQMESH varianta

Jak již bylo zmíněno, IQMESH je síť IQRF transceiverů, které mají funkci nodů nebo koordinátora. Nody budou v tomto případě spolu s ESP32 a akcelerometry tvořit měřicí modul. Koordinátor bude sloužit pouze ke čtení dat. Popis funkce IQMESH, potřebný pro realizaci funkční sítě, bude vysvětlen v textu níže.



Obrázek 4.10: Struktura měřicí sítě využívající IQMESH

4.2.1 Tvorba a konfigurace sítě IQMESH

Nejprve je třeba vytvořit IQMESH síť v IQRF IDE. Tvorbou sítě zahrnuje 2 důležité procesy: Bonding a Discovering.

Bonding

Bondování je přiřazení nodů do příslušné IQMESH sítě. To lze provést ve vývojovém prostředí IQRF IDE buď manuálně pomocí tzv. Local bonding nebo přes tzv. Smart Connect. Při Lokálním bondování musí být nod přímo v přímém dosahu koordinátora a nesmí být již přibondován do jiné sítě. Koordinátor vyšle broadcast dotaz s volnou adresou, volný nod odpoví stiskem tlačítka a adresa mu bude přiřazena.

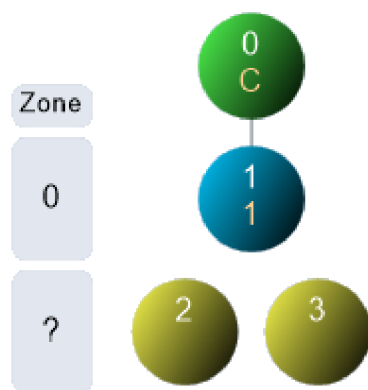
Při využití možnosti Smart Connect nemusí být nod v přímém dosahu. Stačí, aby byl v dosahu některého nodu, který již v síti je. Pro tuto metodu je však třeba znát identifikační údaje nodu, který má být přibondován. Těmi jsou MID (Module ID) a IBK (Individual Bonding Key). Při této metodě nemusí být na straně nodu provedeno stisknutí tlačítka či jiná akce.

Přiřazené logické adresy slouží k adresování příkazů a zůstávají neměnné.

Discovering

Po úspěšném bondování následuje proces objevování neboli Discovery, který vytvoří přenosové cesty a upřesní topologii. Cílem je najít a virtuálně předadresovat všechny propojené uzly ve vzestupném pořadí podle vzdálenosti od koordinátora. Výsledné adresy se nazývají VRN (Virtual Routing Numbers). Logické adresy zůstávají po objevení nezměněny. Během objevování jsou objevené uzly rozděleny do směrovacích zón (skupiny uzlů, které lze dosáhnout stejným počtem skoků od koordinátora). Zóna 0 obsahuje všechny objevené uzly ve přímém RF dosahu s koordinátorem (0 směrovacích skoků). Směrování paketů se řídí podle mechanismu TDMA. (Time Division Multiple Access).

Na obrázku 4.11 lze vidět vizualizaci sítě v prostředí IQRF IDE. Bílá čísla značí logické adresy, žlutá značí routovací adresy. Modře vybarvený nod má adresy obě, tzn. že byl proveden jak bonding tak discovering. Žlutě vybarvené nody mají adresu pouze logickou, tzn. že je přibondován, ale neproběhl u nich discovering. To může být tím, že jsou v síti nové nebo při discovering procesu nebyly napájeny.



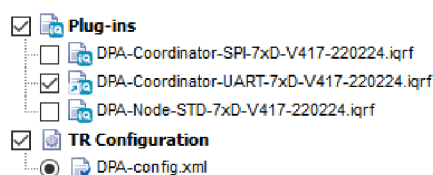
Obrázek 4.11: Vizualizace sítě v IQRF IDE

4.2.2 Pracovní režimy koordinátora

Vysílat DPA příkazy a tím provádět akce v IQMESH síti lze 4 způsoby:

Custom Device Mode

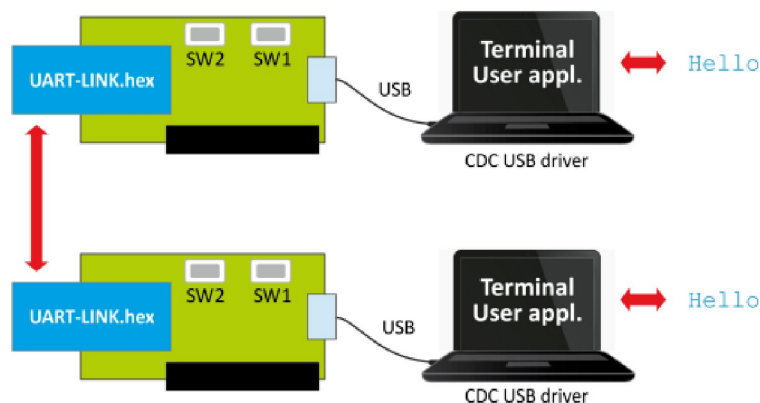
V tomto defaultním režimu komunikuje Transceiver s IQRF IDE, odkud lze manuálně posílat DPA příkazy, či nahrávat konfigurace a pluginy. Pokud má transceiver pracovat v jiném módu, musí být nahrán příslušný plugin.



Obrázek 4.12: Pluginy a konfigurace v IQRF IDE

CDC UART

V tomto režimu transceiver komunikuje pomocí sériové komunikace UART. Pomocí USB tak může uživatel vysílat z PC DPA příkazy a to manuálně, pomocí terminálu, či automaticky, pomocí vytvořené aplikace. Případně může tímto způsobem s transceiver komunikovat i mikrokontroler, či jiné zařízení s UART rozhraním. Příslušná komunikační rychlost je stanovena nahraným konfiguračním souborem. Tento mód bude následně využit. [55]



Obrázek 4.13: Princip komunikace s využitím módu CDC UART [55]

CDC SPI

Tento režim je podobný CDC UART s tím rozdílem, že komunikace probíhá přes rozhraní SPI. Transceiver pak může být řízen např. mikrokontrolery, které jsou tímto rozhraní také vybaveny. [55]

CDC IQRF

Tento režim vytváří virtuální sériový port, na který lze posílat příkazy v textové podobě. Tyto příkazy a odpovědi jsou popsány v dokumentaci. Pro tuto možnost musí být v PC instalován příslušný IQRF USB CDC driver. [55]

4.2.3 Způsob přenosu dat

Přenos dat pomocí textových řetězců

Velkou nevýhodou IQRF technologie je to, že dokáže přenášet pouze 55 bajtů uživatelských dat, tudíž 55 znaků. V případě přenosu celých frekvenčních spekter je třeba přenášet vysoké množství informací a to s velkou přesností. První možností jak toho dosáhnout je rozdělení textového řetězce s hodnotami na několik částí, které budou postupně přenášeny. Tím je však vhodné čísla zaokrouhlit na stejný počet míst a přenášet vždy stejné množství hodnot spektra. Řešení to není obtížné, ale není optimální. V případě přenosu 256 hodnot spektra, kdy každá hodnota je zaokrouhlena na 5 znaků (včetně tečky) a tyto hodnoty jsou odděleny příslušným oddělovačem, bude potřeba 29 přenosů. Rovněž zaokrouhlením dojde k snížení přesnosti.

Níže můžete vidět funkce pro zápis a čtení. Zápis je v C++, čtení v Python. Nejprve je číslo omezeno na 5 znaků celé části. Nicméně tak vysoká hodnota by neměla nastat. Poté je vyvolána funkce *dtostrf*, která provede převod čísla na pět znaků a nakonec řetězec ukončí. Bez ukončení „\0“ funkce nefunguje.

Zdrojový kód 4.4: Úprava hodnoty na 5 znaků

```
String UpravaNaPetZnaku(double number) {  
  
    if (number > 99999) {  
        number = 99999;  
    }  
  
    char znaky[5];  
    dtostrf(number, 0, 4, znaky);  
    znaky[5] = '\\0';  
    return String(znaky);  
}
```

Přenos dat v binární formě

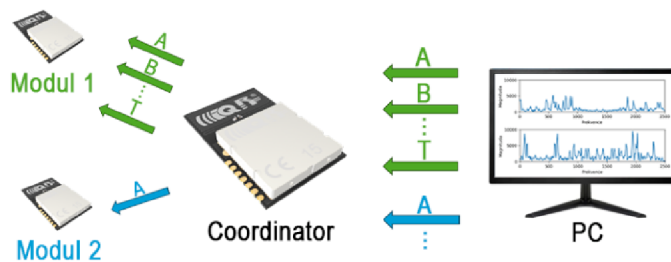
Dalším řešením je přenášet data ne jako znaky, ale jako typ float ve formě binárních dat. Float hodnota zabírá 4 bajty bez ohledu na její hodnotu nebo počet desetinných míst, zatímco stringová reprezentace může zabírat více bajtů, zvláště pokud pracujeme s velkými čísly nebo čísly s mnoha desetinnými místy, jako v tomto případě. Například číslo 151,236 zabírá ve string formě 7 bajtů, zatímco ve formě float pouze 4 bajty. Rovněž není třeba žádný oddělovač, protože každá hodnota má vždy pevnou velikost.

Stejným způsobem lze spočítat, že na jeden přenos lze přenést 13 hodnot, 3 bajty zůstanou volné. 256 hodnot bude tedy rozděleno do 20 přenosů. Tyto nuly na konci přenosu je však také nutné přechíst, ovšem nezpracovat je. V případě, že by tak nebylo provedeno, by byly přečteny na začátku zpracování další zprávy a docházelo by ke generování nesmyslných hodnot.

Zdrojový kód 4.5: Příprava dat na odeslání dat v binární formě

```
for(int i = 0; i < 13; i++) {  
    memcpy(&zprava[i*4], &data[i], sizeof(float));  
}  
Serial.write(zprava, sizeof(zprava));
```

Jako způsob přenosu dat byl tedy zvolen převod na datový typ Float a jejich následné rozdělení do 20 paketů. IQMESH funguje na principu žádostí a odpovědí. Bylo by snadné odesílat jednu univerzální žádost o data, tím však není možné zaručit správné a spolehlivé postupné sestavování spektra. Zejména v případech, kdy paket nebyl obdržén a je nutné ho přenést znovu. Každý z těchto paketů byl označen písmeny A až T. Dochází tedy k postupnému odesílání znaků abecedy každému modulu zvlášť, tak, jak je znázorněno na obrázku 4.14.



Obrázek 4.14: Znázornění zvoleného způsobu vyčítání dat

Výhodou tohoto řešení je to, že lze přenášet libovolnou část spektra, tedy pouze hodnoty, které nás skutečně zajímají, a tím přenos dat zefektivnit.

4.2.4 DPA příkazy

IQMESH používá komunikační protokol DPA. DPA příkazy a způsoby jejich vysílání budou následně podrobně popsány.

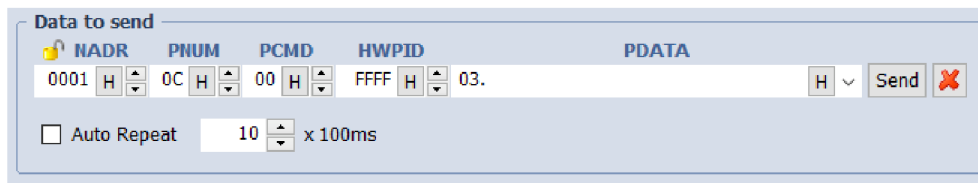
DPA protokol

DPA (Direct Peripheral Access) protokol používá ke komunikaci v IQMESH síti strukturované zprávy ve formě bajtů. Každá zpráva vždy obsahuje čtyři povinné parametry NADR, PNUM, PCMD a HWPID. Volitelně může zpráva obsahovat určitá data, označené jako PData. Vyslaná zpráva se nazývá DPA Request a obsahuje následující parametry:

- **NADR** (Network Address) určuje adresu Noda, kterému je příkaz odeslán. Adresu Nod získá při „Bondování“ a nemění se. Koordinátor má adresu 0, uzly mají adresy 1–239. Pokud je NADR nastavena na 0000, jedná se o Broadcast.
- **PNUM** (Peripheral Number) označuje číslo periferie, které je příkaz určený. Může to být například LED, UART, SPI, teplotní sensor či jiná připojená zařízení. Rozsah hodnot závisí na typu periferie.
- **PCMD** (Peripheral Command) určuje konkrétní příkaz, který má být vykonán na zvolené periférii. Příkazy jsou specifické pro každou periférii, například zapnutí/vypnutí LED či zápis na UART.
- **HWPID** (Hardware Profile ID) slouží k identifikaci zařízení a filtrování. Zařízení s stejným HWPID jako v DPA příkazu budou na něj reagovat.
- **PDATA** (Peripheral Data) jsou data, která mohou být volitelně přenesena ve zprávě. Může obsahovat až 55 bajtů dat, která jsou relevantní pro konkrétní operaci, např. data, které se zapíší na UART port. [56]

Na DPA request existují 3 typy DPA odpovědí: Response, Confirmation a Notification. Všechny tyto typy obsahují stejné hodnoty NADR, PNUM a PCMD jako původní DPA Request zpráva. Jediná skutečně podstatná odpověď, která bude

zpracována je DPA Response. Ta je skutečnou odpovědí na DPA Request. Obsahuje informace o výsledku operace a případně další data podle typu Requestu. [56]



Obrázek 4.15: DPA Test v prostředí IQRF IDE

Dále budou popsány DPA příkazy, které budou využity pro komunikaci přes UART port.

Otevření sériového portu

Před samotným přenosem dat, je nutné tzv. otevření sériového portu, které stanoví Komunikační rychlost. Ta může nabývat hodnot zobrazených v tabulce 4.2.

NADR	PNUM	PCMD	HWPID	0
NADR	0x0C	0x00	?	BaudRate

Obrázek 4.16: DPA příkaz - otevření sériového portu

BaudRate	Komunikační rychlost
0x00	1200 Baudů
0x01	2400 Baudů
0x02	5800 Baudů
0x03	9600 Baudů
0x04	19200 Baudů
0x05	38400 Baudů
0x06	57600 Baudů
0x07	115200 Baudů
0x08	230400 Baudů

Tabulka 4.2: Komunikační rychlosti

Zápis a čtení sériového portu

Zápis a čtení jsou v DPA protokolu řešeny stejným příkazem. První byte skupiny PDDATA specifikují timeout, resp. dobu čekání na data v násobcích 10 ms. Další bajty obsahují ASCII hodnoty znaků, které mají být na port zapsány. Pokud má probíhat pouze čtení, odešle se pouze timeout bit. [56]

NADR	PNUM	PCMD	HWPID	0	1 ... n
NADR	0x0C	0x02	?	ReadTimeout	WrittenData

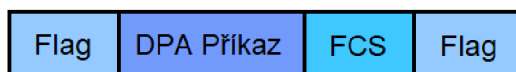
Obrázek 4.17: DPA Write request

NADR	PNUM	PCMD	HWPID	ErrN	DpaValue	0 ... n-1
NADR	0x0C	0x82	?	0	?	ReadData

Obrázek 4.18: DPA Write response

HDLC

UART Komunikace IQRF prvků používá kódování HDLC, neboli High-Level Data Link Control. K DPA příkazu se připojí tzv. flagy a kontrolní součet FCS. Flagy označují začátek a konec rámece a jsou tvořeny bajtem 0xE7 (binárně 2x01111110). FCS slouží k ověření bezchybnosti přenosu. V případě tvorby programu, který bude vysílat koordinátorovi DPA příkazy přes UART, bude potřeba rámeček doplnit.



Obrázek 4.19: Rámeček HDLC

Pro ověření či přímo vygenerování HDLC rámeček je k dispozici online nástroj přímo od společnosti Microrisc. Je možné ho nalézt na webové adrese <https://www.iqrf.org/technology/dpa/calculator>. Jeho funkce je zobrazena na obrázku 4.20. Konkrétně se jedná o příkaz UART Write/Read, který zapíše na port nodu 1 znak 'A' a čeká 10 milisekund na odpověď. Jakmile ji obdrží, odešle ji koordinátorovi. [56]

DPA UART HDLC and CRC calculator

Enter your DPA foursome and optional data to be sent via UART and you will obtain the appropriate DPA message including CRC and HDLC encapsulation.

NADR PNUM PCMD HWPID PDATA
 0x[0001] 0x[0C] 0x[02] 0x[FFFF] 0x[0141]

	NADR	PNUM	PCMD	HWPID		PDATA		CRC			
Data in	0x01	0x00	0x0C	0x02	0xFF	0xFF	0x01	0x41			
Data out	0x7E	0x01	0x00	0x0C	0x02	0xFF	0xFF	0x01	0x41	0x85	0x7E

Obrázek 4.20: Výpočet HDLC

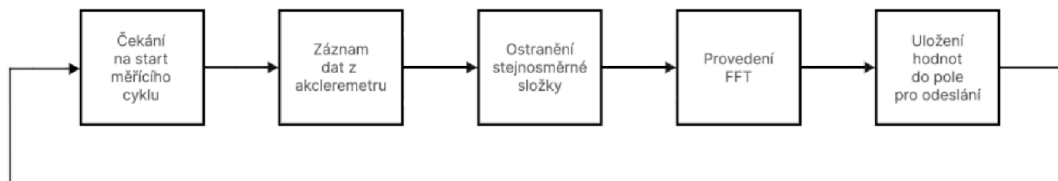
4.2.5 Firmware modulu

Na rozdíl od prvního řešení, kde odesílání dat probíhalo v čase kdy nedocházelo k měření, zde tento přístup není praktický. Synchronizace hlavní jednotky (coordi-

natoru), vyčítající data a měřicího modulu (nodu) by byla velmi obtížná. Rovněž by mělo být vyčítání dat variabilní, tzn. že modul by měl být nezávislý na čase, který si uživatel ve softwaru pro sběr dat nastaví. Lze využít toho, že ESP32 má dvě jádra, na kterých mohou běžet rozdílné procesy. Jedno z nich tak bude vyhrazeno pro měření a zpracování dat, druhé pro jejich vysílání.

Měřicí smyčka

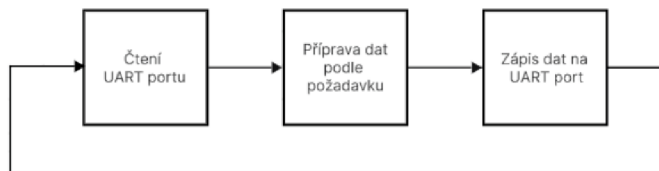
Měření, filtrování a výpočet spektra je proveden stejným způsobem jako v prvním řešení. Jediný rozdíl je v tom, že používají samostatné vlákno a jsou tak nezávislé na komunikaci



Obrázek 4.21: Struktura měřicí smyčky

Komunikační smyčka

Druhé vlákno zajišťuje pouze komunikaci. Čte příchozí znaky ze sériového portu a odesílá na něj příslušné hodnoty tak, jak bylo popsáno v sekci 4.2.3.



Obrázek 4.22: Struktura komunikační smyčky

4.2.6 Software pro vizualizaci a sběr dat

Stejně jako u prvního řešení byl program vyvinut v jazyce Python, ovšem velmi odlišným způsobem. Zatímco u Wi-Fi mesh byl sériový port použit pouze pro čtení, zde probíhá i zápis, který žádá IQRF koordinátora o hodnoty z příslušného nodu.

Nastavení parametrů

Podobně jako v první řešení je třeba správně nastavit určité parametry. Ty se však v obou řešení mírně liší. Například je zde navíc nastavitelný interval vysílání žádosti o data.

```

# Nastaveni serioveho portu
ser = serial.Serial('COM26', 9600)
# Nastaveni casové prodlevy mezi vysilanim
interval = 1
# Nastaveni vzorkovaci frekvence mereni
VzorkovaciFrekvence = 2000
# Nastaveni maxima osy Y v grafu
plot_y_max = 3
# Nastaveni adresare pro ukladani dat
excel_directory = "D:\\esp\\projekty\\dp"

```

Vzorkovací frekvence se musí shodovat s nastavením v ESP32. Dalším praktickým vylepšením do budoucna by mohlo být nastavení hodnoty frekvence pouze ve vizualizačním softwaru a její přenos do ESP32.

Identifikace aktivních modulů

Při spuštění programu je provedena identifikace napájených modulů na síti. To je docíleno vysláním příkazu UART OPEN každému modulu a čekáním na potvrzení. Pokud má přijatá zpráva velikost větší než 14 bajtů, pak bylo otevření portu potvrzené, tudíž modul je aktivní. V tu chvíli jsou podle čísla modulu zkopírovány příkazy z příslušného připraveného seznamu do hlavního seznamu, obsahujícího příkazy všech modulů. Rovněž je rozšířeno pole pro ukládané výsledky všech modulů. Pokud pokus o identifikaci selže, je proveden ještě pokus druhý. Počet pokusů je možné jednoduše v kódu upravit.

Bez potvrzení

```

15.04.2024 17:32:01.032 [TX] - 7E 02 00 0C 00 FF FF 03 EC 7E
15.04.2024 17:32:01.066 [RX] - 7E 02 00 0C 00 FF FF FF 3E 02 08 02 04 7E

```

S potvrzením

```

15.04.2024 17:33:03.540 [TX] - 7E 02 00 0C 00 FF FF 03 EC 7E
15.04.2024 17:33:03.574 [RX] - 7E 02 00 0C 00 FF FF FF 3A 02 08 02 0A 7E
                          7E 02 00 0C 80 00 00 00 1A 0E 7E

```

Obrázek 4.23: Výpis z terminálu

```

Otevření UART portu nodu 1
nalezen modul č. 1
Otevření UART portu nodu 2
nalezen modul č. 2
Otevření UART portu nodu 3
nalezen modul č. 3
Hledání dokončeno. Nalezeno: 3 modulů. S logickými adresami: 1 2 3

```

Obrázek 4.24: Výstup po inicializaci modulů

Vysílání a příjem dat

Vysílání a příjem jsou rozděleny do dvou funkcí. Každá z nich pak běží ve svém vlastním vlákně. Původní myšlenkou bylo totiž je udělat na sobě nezávislé, avšak pro lepší synchronizaci a opakování stejných příkazů při neobdržení odpovědi byly vytvořeny globální proměnné, které předávají pověření. Jakmile jsou data správně přijata, může dojít po uplynutí nastaveného intervalu k další žádosti o data.

Opakování žádosti o data

V případě že jsou přijatá data chybná či neuplná, je příkaz odeslán znovu. Pokud ani po čtyřech pokusech o opravu nejsou přijatá data bez chyby, tj. s délkou 80 bajtů, pak je modul vyrazen a jeho příkazy jsou ze seznamu vysílaných příkazů odstraněny.

```
Odeslaná data: 7E01000C03FFFFF1046E37E

Data přijata
Délka: 25
Příjem: 7e01000c03ffffff38010801a87e7e01000c8300000036057e
Modul 1 neodpovídá

Probíhá oprava
Odeslaná data: 7E01000C03FFFFF1046E37E

Data přijata
Délka: 80
Příjem: 7e01000c03ffffff38010801a87e7e01000c83000000363e87f643b26aa9430e80444
```

Obrázek 4.25: Nová žádost o data

Přepis hodnot

Problém nastává, když se transceiver pokouší přenést v datech hodnotu 0x7E. Ta je v HDLC vyhrazena pro začátek a konec zprávy, proto ji kóduje jako 0x7D 0x5E. To ovšem při zpracování dat dělá velké komplikace, proto je nutná část kódu, která toto ošetří. Stejným způsobem je kódovaná 0x7D na 0x7D 0x5D. Pro lepší představu je níže zobrazena příslušná část kódu a její výstup.

Zdrojový kód 4.6: Přepis hodnoty 7E

```
i = 0
while i < len(data) - 1:
    if data[i] == 0x7D and data[i+1] == 0x5E:
        data[i] = 0x7E
        del data[i+1]
        data += ser.read(1)
    i += 1
```

```

Data přijata
Délka: 81
Příjem: 7e01000c03ffffff39010801277e7e01000c8300000038500a844354e91e437d5eb4c1439
probíhá přepis
Přepis: 7e01000c03ffffff39010801277e7e01000c8300000038500a844354e91e437eb4c14393c
Číslo modulu: 1
DATA: 500a844354e91e437eb4c14393c4dc4304e9d24323b30a44246d1a4414b30644897bf34375f

```

Obrázek 4.26: Výstup v konzoli při přepisu hodnoty 7E

Dále by mohlo být řešeno na straně ESP ošetřením, které nevyše za sebou kombinaci 0x7d 0x5e či 0x7D 0x5D. V tuto chvíli se nabízí řešení mírnou změnou hodnoty, která by v konečném důsledku nemusela příliš ovlivnit přesnost spektra. Například hodnota 247.0 má v hexadecimálním float tvaru právě zmíněnou problematickou hodnotu 00007d5e, zatímco 256.99 má hodnotu 71fd7643.

Výstup

Podobně jako u prvního řešení jsou všechny události včetně odesílaných a přijímaných dat zobrazeny v konzoli. Grafy a soubor xlsx jsou zde aktualizovány až po obdržení kompletní sady dat.

4.2.7 Test spolehlivosti

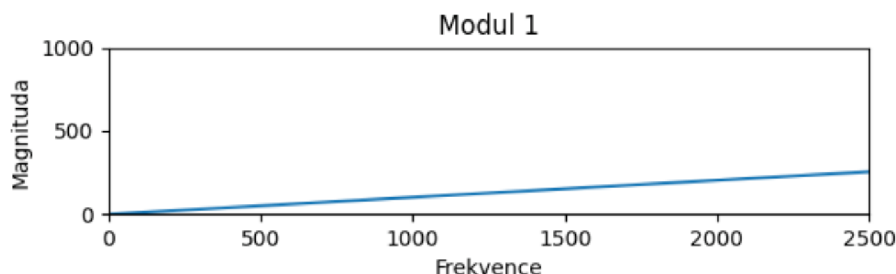
Pro testování spolehlivosti přenosu byl vytvořen program pro ESP32, který pomocí cyklu vytvoří pole s hodnotami 0-255 a ty jsou odesílány do sítě jako hodnoty spektra.

```

Seznam data all dosáhl 256 prvků.
Float hodnoty: [0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0, 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0, 26.0, 27.0, 28.0, 29.0, 30.0, 31.0, 32.0, 33.0, 34.0, 35.0, 36.0, 37.0, 38.0, 39.0, 40.0, 41.0, 42.0, 43.0, 44.0, 45.0, 46.0, 47.0, 48.0, 49.0, 50.0, 51.0, 52.0, 53.0, 54.0, 55.0, 56.0, 57.0, 58.0, 59.0, 60.0, 61.0, 62.0, 63.0, 64.0, 65.0, 66.0, 67.0, 68.0, 69.0, 70.0, 71.0, 72.0, 73.0, 74.0, 75.0, 76.0, 77.0, 78.0, 79.0, 80.0, 81.0, 82.0, 83.0, 84.0, 85.0, 86.0, 87.0, 88.0, 89.0, 90.0, 91.0, 92.0, 93.0, 94.0, 95.0, 96.0, 97.0, 98.0, 99.0, 100.0, 101.0, 102.0, 103.0, 104.0, 105.0, 106.0, 107.0, 108.0, 109.0, 110.0, 111.0, 112.0, 113.0, 114.0, 115.0, 116.0, 117.0, 118.0, 119.0, 120.0, 121.0, 122.0, 123.0, 124.0, 125.0, 126.0, 127.0, 128.0, 129.0, 130.0, 131.0, 132.0, 133.0, 134.0, 135.0, 136.0, 137.0, 138.0, 139.0, 140.0, 141.0, 142.0, 143.0, 144.0, 145.0, 146.0, 147.0, 148.0, 149.0, 150.0, 151.0, 152.0, 153.0, 154.0, 155.0, 156.0, 157.0, 158.0, 159.0, 160.0, 161.0, 162.0, 163.0, 164.0, 165.0, 166.0, 167.0, 168.0, 169.0, 170.0, 171.0, 172.0, 173.0, 174.0, 175.0, 176.0, 177.0, 178.0, 179.0, 180.0, 181.0, 182.0, 183.0, 184.0, 185.0, 186.0, 187.0, 188.0, 189.0, 190.0, 191.0, 192.0, 193.0, 194.0, 195.0, 196.0, 197.0, 198.0, 199.0, 200.0, 201.0, 202.0, 203.0, 204.0, 205.0, 206.0, 207.0, 208.0, 209.0, 210.0, 211.0, 212.0, 213.0, 214.0, 215.0, 216.0, 217.0, 218.0, 219.0, 220.0, 221.0, 222.0, 223.0, 224.0, 225.0, 226.0, 227.0, 228.0, 229.0, 230.0, 231.0, 232.0, 233.0, 234.0, 235.0, 236.0, 237.0, 238.0, 239.0, 240.0, 241.0, 242.0, 243.0, 244.0, 245.0, 246.0, 247.0, 248.0, 249.0, 250.0, 251.0, 252.0, 253.0, 254.0, 255.0]

```

Obrázek 4.27: Výpis přijatých hodnot do konzole



Obrázek 4.28: Grafický výstup přijatých hodnot

Při testování bylo zjištěno, že pro spolehlivost přenosu je místo příkazu UART WRITE/READ vhodné použít příkaz UART CLEAR/WRITE/READ, který před čtením vyčistí buffer sériové linky. Jedná se o ošetření proti nepředvídatelným chybám, které by však neměly nastat.

5 Porovnání obou řešení

5.1 Rychlost přenosu

5.1.1 IQMESH

Při testování bylo zjištěno, že potřebná prodleva mezi zápisem a čtením UART portu, při komunikační rychlosti 9600 Bd, je minimálně 70 sekund. Testovací program v pythonu byl pro měření maximální dosažitelné rychlosti přenosu upraven tak, aby docházelo k čistému vysílání a příjmu dat bez pauz, oprav a prepisů. Přenos všech dat, čili 20 paketů, trval 10.9 sekundy. V přepočtu činila celková rychlost přenosu 1174 b/s, po odečtení uživateli nepodstatných dat pak 807,4 b/s. Při změně komunikační rychlosti celého řetězce z 9600 Bd na 115200 Bd, se čas trvání změnil na 10.84 sekund. Zvýšením rychlosti fyzických přenosů bylo ušetřeno pouze 60 milisekund. Zřejmě se tedy pohybujeme na vysílacím limitu bezdrátové technologie, aby nedošlo k zahlcení prostoru. Tento limit je stanoven na 1% vysílacího času.

5.1.2 Wi-Fi mesh

Při testování byly odesílány zprávy o velikosti 2048 bajtů. Předpokládejme, že odesíláme 256 hodnot, pak by každá hodnota včetně oddělovače měla vyhrazených 8 bajtů, čili 8 znaků. Testovací software dokázal přijmout 63 těchto zpráv za sekundu. Rychlost přenosu tak činí 126 Mbps. Při snížení velikosti zprávy na 1024 bajtů byl počet přijatých zpráv navýšen na 78, závislost tedy není lineární. Rychlost přenosu tedy není pro použití tohoto řešení limitující.

5.1.3 Optimalizace přenosu

Množství přenášených dat je omezené, a i když je možné postupně přenést všechna zpracovaná data, bude to trvat déle. Vždy se jedná o kompromis a musíme se rozhodnout mezi přesností spektra a dobou jeho přenosu. Je tedy vhodné se zamyslet i nad tím, zda jsou všechna data skutečně nezbytná. Podle potřeby tak může být přenášena pouze určitá část spektra. Další z možností je redukovat frekvenční spektrum na menší počet hodnot. Toho lze dosáhnout například podvzorkováním či průměrováním. Velmi důležitá je však samotná volba vzorkovací frekvence. Ta určuje rozsah a rozlišení spektra.

5.2 Dosah

Pro měření rozsahu byly oba typy testovacích modulů rozmístěny po zámečnické dílně s různými obráběcími stroji. Počítač s přijímacím modulem se nacházel na stole

jedné strany místnosti. Poté byly měřicí moduly zkušebně přemístovány po dílně. Příklad roložení, se vzdálenostmi od místa sběru dat, je vyobrazen na obrázku 5.1. Uvedené vzdálenosti jsou zaokrouhlené na jednotky metrů.



Obrázek 5.1: Rozmístění modulů v dílně při testování

5.2.1 Wi-Fi mesh

Při testování Wi-Fi mesh sítě bylo zjištěno, že maximální spolehlivá vzdálenost mezi jednotlivými moduly je 13 metrů. Pomocí tří modulů pak bylo možné pokrýt celý prostor dílny. Pokud by bylo vyžadováno měření pouze na nejbližším stroji, dosah by byl nedostatečný. V případě otevřených dveří bylo možné umístit modul i do další místnosti. Překážky neměly na dosah vliv. Uzavření celého průchozího prostoru však dosah velmi snížilo.

Vliv velikosti přenášených dat na dosah

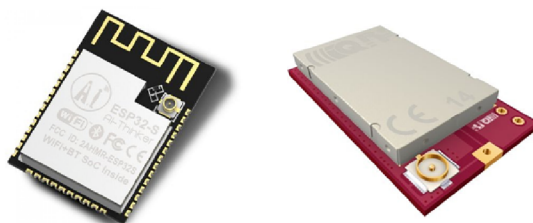
Pokud je modul v dosahu, není problém přenášet i zprávy dlouhé 8192 Bajtů. Jen výjimečně nebyla zpráva této velikosti obdržena. Velikost zprávy tedy nehrála významnou roli. Každý uzel využívající *PainlessMesh* vysílá tzv. „heartbeat“ zprávy v pravidelných intervalech, které informují ostatní uzly o jeho dostupnosti. Po uplynutí timeoutu dojde k vyřazení nekomunikujícího uzlu. Nikoliv tedy uživatelské zprávy, ale zmíněné heartbeat zprávy rozhodují, zda je modul vyřazen.

5.2.2 IQMESH

V případě testování dosahu IQMESH, s použitím transceiverů TR-72DA s integrovanou anténou, nebylo umístění v dílně nijak omezeno. Dosah byl dostačující i v případě umístění koordinátora a noda do opačných rohů místnosti. Modul bylo možné umístit i dále do vedlejší místnosti na maximální vzdálenost cca 35 metrů. Navíc zde oproti technologii Wi-Fi mělo mnohem menší vliv uzavření prostoru. Signály na nižších frekvencích totiž obecně lépe prochází překážkami než signály na frekvencích vyšších.

5.2.3 Navýšení dosahu

Pro zvýšení dosahu obou sítí by bylo možné použít externí anténu. Například provedení ESP32-S obsahuje U.FL konektor pro připojení antény. Stejným konektorem je vybaven rovněž IQRF TR-72D. Další možností je umístění do prostoru více modulů, které budou plnit pouze funkci repeateru. V případě IQMESH lze zakoupit samostatný repeater, který lze připojit do běžné zásuvky se střídavým napětím 230 V.



Obrázek 5.2: ESP32-S a TR-72D, vybavené konektory U.FL

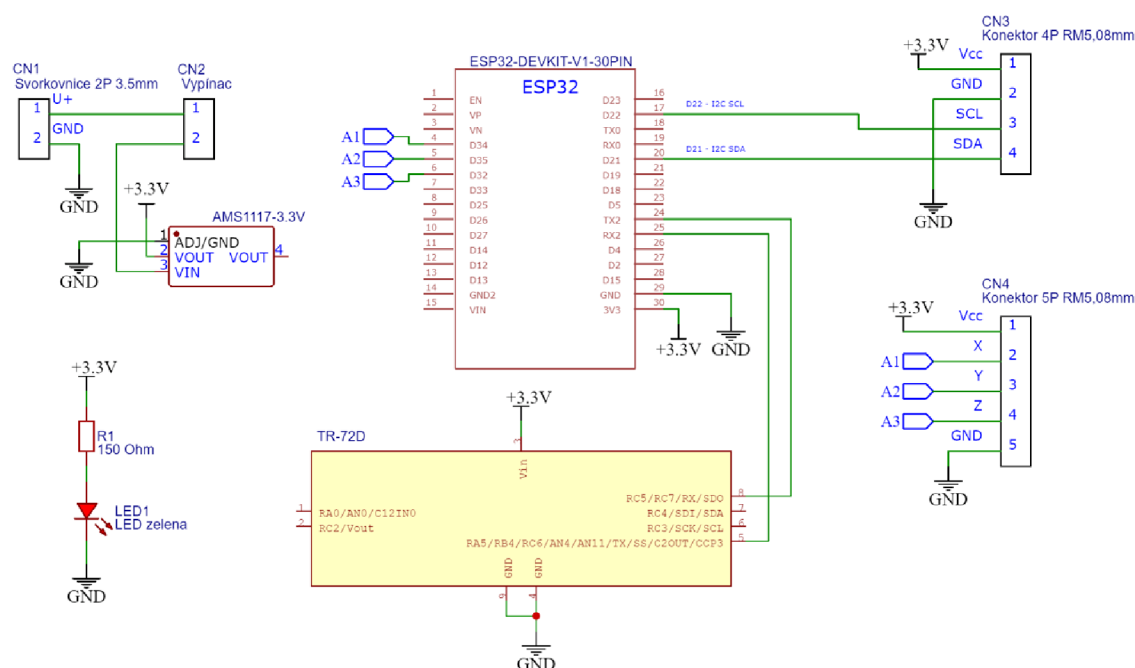
5.3 Spotřeba elektrické energie

Dalším důležitým aspektem je spotřeba elektrické energie. V případě pevného napájení není tento rozdíl podstatný, avšak při napájení z baterií značně ovlivní interval výměny baterií. Při řešení s Wi-Fi mesh byl odběr proudu samotného ESP32 změřen na 72,6 mA. Při řešení s IQMESH byl celkový odebíraný proud 70,3 mA. ESP32 odebírá 61 mA a IQRF Transceiver 9,3 mA. Rozdíl obou řešení je tedy minimální.

Při testování byl modul ponechán napájen čtyřmi obyčejnými spotřebními AAA bateriemi. Po 14 hodinách došlo k poklesu napětí pod 2,8 V a tím ke ztrátě funkčnosti ESP32 a mírnému kolísání svitu LED diody. IQRF Transceiver však komunikoval i při napětí 2,6 V. Prodloužení doby funkčnosti je možné použitím rezistoru s vyšší hodnotou odporu. Při použití 150 Ω rezistoru, byl při protékajícím proudu 7,3 mA svit použité LED diody až oslňující. Při připojení akcelerometru GY-521 vzrostl celkový proud o 4,6 mA, což je víc, než je uvedeno v katalogovém listu. Rovněž bylo změřeno, že regulátor napětí LM1117 má vlastní odběr 1,5 mA.

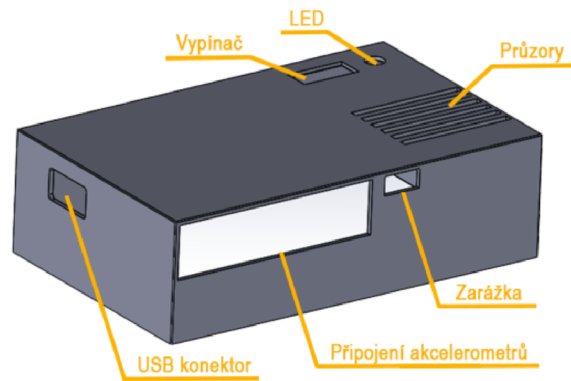
6 Návrh desky plošných spojů

Nejprve byl modul realizován na nepájivém poli. Navržený modul je však velmi komplexní a obsahuje množství komponent, což vyžaduje pečlivé uspořádání a integraci. Ideální řešením je implementace na PCB desku, neboli desku plošných spojů. To zjednoduší montáž, zvýší spolehlivost a ušetří místo.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení

Navržená PCB deska je dvojrvtvá. Uspořádání součástek je zobrazeno na obrázku 6.2. Červenou barva značí vodivé cesty na vrchní straně desky, modrá značí cesty na straně spodní. Celkem byly navrženy 3 varianty desky. První byla s konektorem pro zapojení akcelerometru s I2C rozhraním, druhá s konektorem pro zapojení analogového tříosého akcelerometru (MEMS) a třetí pro zapojení tří analogových akcelerometrů, měřících v jedné ose (piezoelektrických). Výsledný modul nakonec obsahuje, pro jeho univerzálnost, konektory z první i druhé varianty. Třetí varianta v této fázi nemá význam, jelikož jsou použity pouze tříosé MEMS akcelerometry. Pokud by byl do budoucna zájem, je připraven i rozšířený návrh. Dále by pro značnou úsporu místa bylo vhodné místo celého DEVKITU použít ESP32 ve formě samotného čipu s pájecími ploškami. Jelikož se jedná pouze o prototyp, tak z důvodu nedostatku zkušeností a času byla tato možnost zatím zavrhnuta. Pokud modul najde využití a budou poptány další moduly, bude tato změna provedena.



Obrázek 6.4: Vrchní část krytu

Kryt je vyroben technologií 3D tisku z materiálu PETG. Jeho výhodou je vyšší pružnost, oproti materiálům PLA a ABS. 3D tisk je v případě této kusové výroby nejvíce dostupná varianta. Je nutné zmínit, že se jedná zatím pouze o prototyp krytu sloužící pro účely testování. Montáž ke konstrukci stroje je možná pomocí šroubků, v případě krátkodobého měření použitím vhodného lepidla. Na obrázku 6.5 je modul umístěný na konstrukci stroje. Je třeba znovu zdůraznit, že pro přesné měření by měl být akcelerometr připevněn k ložisku stroje nebo materiálu, který je s ním v kontaktu.



Obrázek 6.5: Krytý modul na stroji

7 Závěr

Teoretická část práce obsahuje základní informace z odvětví vibrodiagnostiky a bezdrátových komunikací. Podle vlastností byly vybrány dvě ze zmíněných technologií pro realizaci a jejich porovnání v praktické části. Konkrétně se jednalo o technologie Wi-Fi a IQRF.

Pro obě technologie byla vytvořena měřicí síť a následně vyvinut firmware modulu a software pro sběr dat. Obě řešení jsou plně funkční a připravena k použití. Každá z nich má své výhody a nevýhody. Rozhodujícím aspektem se stala maximální vzdálenost přenosu, jenž je u sítě IQRF přibližně trojnásobně vyšší. Důležité je zmínit, že i samotná společnost Microrisc mě v této cestě podpořila a věnovala mi potřebný hardware.

Firmware pro mikrokontroler ESP32, který zpracovává a dále vysílá připravená data, byl vytvořen v programovacím jazyce C++. Software pro vizualizaci a sběr dat byl následně vyvinut v jazyce Python. Při tvorbě kódů a jejich testování byl kladen důraz na spolehlivost řešení a bezchybný přenos informací. Vstupem celého procesu jsou data z akcelerometru. Výstupem je grafické zobrazení frekvenčního spektra z posledních měření a soubor obsahující data ze všech měření, která mohou být následně analyzována. Modul je vybaven vypínačem a signalizací napájení, konektory pro připojení dvou typů akcelerometrů a ochranným krytem. Napájení je možné pomocí tužkových baterií, pevného zdroje či USB konektoru. V rámci testování byly moduly umístěny na konstrukce obráběcích strojů a byl proveden úspěšný sběr dat.

Na tuto práci by se dalo do budoucna navázat například softwarem, který analyzuje naměřené spektrum a upozorní uživatele na nutnost servisu, případně konkrétně posoudí typ defektu. Pro vytvoření takového algoritmu by bylo nutné provést kalibraci a řadu zkušebních měření na strojích s různými defekty a tím získání vzorů jejich vibrací. Případně v aktuální době, kdy se umělá inteligence rychle vyvíjí a nachází stále nová uplatnění, by ji bylo možné implementovat i do tohoto procesu.

V neposlední řadě byla tato práce ve velké míře i mým osobním obohacením. Díky ní jsem získal mnoho cenných zkušeností v pro mě zcela nových odvětvích.

Použitá literatura

- [1] BLATA, Jan Ing. Ph.D. *METODY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY: Učební text předmětu „Technická diagnostika“*. 1. vydání. 2010. Dostupné také z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2735-3.pdf>.
- [2] FERNANDEZ, Alfonso. *Misalignment* [online]. Maintenance Intelligence LLC [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/Misalignment>.
- [3] *Practical Solutions to Machinery and Maintenance Vibration Problems* [online]. Update International [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://updateinternational.com/Book/VibrationBook7i.htm>.
- [4] SOPCIK, Pete. *Detecting and Diagnosing Misalignment in a System* [online]. Mobius Institute [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.cbmconnect.com/detecting-and-diagnosing-misalignments-in-a-system/>.
- [5] *6 common causes of machine vibrations* [online]. ISTECH INTERNATIONAL [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.istec.com/en/6-common-causes-of-machine-vibrations/>.
- [6] *Types of imbalance* [online]. Maintenance Intelligence LLC [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/types-imbalance>.
- [7] S. P. MOGAL AND D. I. LALWANI. Experimental investigation of unbalance and misalignment in rotor bearing system using order analysis. *Journal of Measurements in Engineering* [online]. 2015, roč. 3, s. 114–122 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.extrica.com/article/16117>.
- [8] FERNANDEZ, Alfonso. *Looseness* [online]. Maintenance Intelligence LLC [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/looseness>.
- [9] FERNANDEZ, Alfonso. *Bent Shaft* [online]. Maintenance Intelligence LLC [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/bent-shaft>.
- [10] *VIBRATION ANALYZERS AND CONDITION MONITORING* [online]. Adash spol. s r.o [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://adash.com/>.
- [11] *Resonance* [online]. Maintenance Intelligence LLC [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/resonance>.
- [12] *Vibrace, měřené veličiny* [online]. Ekosoftware [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/vibrace-merene-veliciny>.
- [13] VOJÁČEK, Antonín. *Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů* [online]. Automatizace.hw.cz, 2015 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>.

- [14] *Vibration analysis - commonly used terms and definitions* [online]. 2021. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/reliability/VibrationGlossary/>.
- [15] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické* [online]. 2007. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>.
- [16] *Piezoelectric Accelerometers* [online]. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/vibration/piezoelectric-accelerometers>.
- [17] ARAR, Steve Dr. *Understanding Piezoelectric Accelerometer Basics* [online]. EETech Media, LLC., 2022 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>.
- [18] O'REILLY, Rob, Alex KHENKIN a Kieran HARNEY. *Sonic Nirvana: Using MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments* [online]. Analog Devices, Inc., 2009 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/mems-accelerometers-as-acoustic-pickups.html>.
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní* [online]. 2007. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>.
- [20] *What is Discrete Fourier Transform(DFT)* [online]. 2023. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.ee-diary.com/2023/05/what-is-discrete-fourier-transformdft.html>.
- [21] *Network Topology* [online]. HEAVY.AI. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.heavy.ai/technical-glossary/network-topology>.
- [22] *Introduction to Mesh* [online]. Commotion Wireless [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://commotionwireless.net/docs/cck/networking/intro-to-mesh/>.
- [23] *Radio Frequency Bands* [online]. TeraSense [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://terasense.com/terahertz-technology/radio-frequency-bands/>.
- [24] *ISM radio band* [online]. Wikipedia [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_radio_band.
- [25] *Využívání vymezených rádiových kmitočtů* [online]. Český telekomunikační úřad [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://ctu.gov.cz/vyuzivani-vymezenych-radiovyh-kmitoctu>.
- [26] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. Český telekomunikační úřad, 2021. Dostupné také z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf>.
- [27] *WLAN Frequency Bands* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://ipcisco.com/lesson/wlan-frequency-bands/>.

- [28] *Wi-Fi 4, 5 and 6: which one should you choose ?* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://eu.strong-eu.com/blog/wi-fi-4-5-and-6-which-one/>.
- [29] *Different Bluetooth Versions: What You Need to Know* [online]. Headphonesty [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.headphonesty.com/2021/01/bluetooth-versions/>.
- [30] *Mobile Networking: 1G vs. 2G vs. 3G vs. 4G vs. 5G* [online]. BAELDUNG, 2023 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/cs/mobile-networking-generations>.
- [31] *GSM: Global System for Mobile Communications* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/cs/mobile-networking-generations>.
- [32] ZDENĚK BEČVÁŘ Pavel Mach, Ivan Pravda. *Mobilní sítě*. 1. vydání. Praha 6: České vysoké učení technické v Praze, [b.r.]. ISBN 978-80-01-05305-8. Dostupné také z: https://techpedia.fel.cvut.cz/project/modules/improvet/download/C4CZ/Mobilni_site.pdf.
- [33] *New LoRa world record: 1336 km / 830 mi* [online]. THE THINGS NETWORK [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/article/new-lora-world-record-1336-km-830-mi>.
- [34] *LoRa Bitrate & Sensitivity Calculator And how to understand LoRa parameters* [online]. Unsigned.io [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://unsigned.io/understanding-lora-parameters/>.
- [35] *What are LoRa® and LoRaWAN®?* [online]. SEMTECH [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan>.
- [36] LUCA LEONARDI, LUCIA LO BELLO , FILIPPO BATTAGLIA, GAETANO PATTI. *Comparative Assessment of the LoRaWAN Medium Access Control Protocols for IoT: Does Listen before Talk Perform Better than ALOHA?* Department of Electrical, Electronics a Computer Engineering, University of Catania, 2020. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/340100897_Comparative_Assessment_of_the_LoRaWAN_Medium_Access_Control_Protocols_for_IoT_Does_Listen_before_Talk_Perform_Better_than_ALOHA.
- [37] *What Is LoRa®?* [online]. SEMTECH [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [38] *IQMESH* [online]. IQRF TECH S.R.O. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/technology/iqmesh>.
- [39] *RF* [online]. IQRF TECH S.R.O. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/technology/rf>.
- [40] *Transceivers* [online]. IQRF TECH S.R.O. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/products/transceivers>.
- [41] *CK-USB-04A* [online]. IQRF TECH S.R.O. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/technology/ck-usb-04a>.

- [42] *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide* [online]. Espressif Systems (Shanghai) Co. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>.
- [43] *How to use ESP32 Dual Core with Arduino IDE* [online]. RandomNerdTutorials.com [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-dual-core-arduino-ide/>.
- [44] *Analog to Digital Converter* [online]. Espressif Systems (Shanghai) Co. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.3-beta2/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>.
- [45] *Material Cutting Speeds* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.etantdonnes.com/MACHINE/TABLES/cuttingSpeeds.html>.
- [46] QUINNELL, Richard A. *Rychlá implementace MEMS senzorů do systému prediktivní údržby* [online]. 2020. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/rychla-implementace-mems-senzoru-do-systemu-prediktivni-udrzby.html>.
- [47] *Interface MPU6050 Accelerometer and Gyroscope Sensor with Arduino* [online]. LastMinuteEngineers.com [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/mpu6050-accel-gyro-arduino-tutorial/>.
- [48] *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.1* [online]. InvenSense, Inc, 2011. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General%20IC/PS-MPU-6000A.pdf>.
- [49] *An Introduction for IMU 1 - IMU principle and MPU6050 data acquisition* [online]. fatalerrors.org [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.fatalerrors.org/a/an-introduction-for-imu-1-imu-principle-and-mpu6050-data-acquisition.html>.
- [50] *How Accelerometer works? Interface ADXL335 with Arduino* [online]. LastMinuteEngineers.com [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/adxl335-accelerometer-arduino-tutorial/>.
- [51] *KON-SIM-02* [online]. MICRORISC S.R.O [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://eshop.microrisc.com/p/kon-sim-02>.
- [52] *TR-72D RF Transceiver Module Series Data Sheet* [online]. IQRF Tech s.r.o., IQRF Tech s.r.o., 2024 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/product-detail/tr-72d>.
- [53] *Passive High Pass Filter* [online]. AspenCore [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html.
- [54] *High-pass filter* [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/High-pass_filter.
- [55] *CK-USB-04A IQRF Programmer and Debugger HW v1.00, FW v1.14 User's Guide* [online]. IQRF Tech s.r.o., IQRF Tech s.r.o., 2024 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/product-detail/ck-usb-04a>.

- [56] *IQRF DPA Framework V4.14 - Technical Guide*. MICRORISC s.r.o., 2022. Dostupné také z: https://doc.iqrf.org/DpaTechGuide/Tech_Guide_DPA-Framework-430_221019.pdf.
- [57] *Wi-Fi* [online]. Espressif Systems (Shanghai) Co. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-faq/en/latest/software-framework/wifi.html#>.
- [58] *ESP32* [online]. ESPRESSIF SYSTEMS [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [59] *ESP32 Series Datasheet*. Version 4.5. ESPRESSIF SYSTEMS, 2024. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [60] HELEBRANT F. – ZIEGLER, J. *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. 1. vydání. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2004. ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

Přílohy

Obsah přiloženého CD:

- Zdrojové kódy
- IQRF pluginy
- Data k výrobě deesky plošných spojů
- Modely a výkresy částí ochranného krytu