

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**POKROČILÁ VIBRODIAGNOSTIKA TOČIVÝCH
STROJŮ**

ADVANCED VIBRATION DIAGNOSTICS OF ROTATING MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrea Duráníková

VEDOUĆÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Studentka:	Bc. Andrea Durániková
Studijní program:	Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Pokročilá vibrodiagnostika točivých strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrodiagnostika je jedna z důležitých diagnostických metod, které slouží k popisu a rozboru stavu strojů. I tato metoda prodělala složitý vývoj, v současné době se diagnostická data získávají přímo z řídicích systémů (PLC) s využitím vhodného hardwaru a softwaru. Začíná se rozvíjet pokročilá vibrodiagnostika. Vznikají různé moderní diagnostické systémy. Diplomová práce se zaměřuje na systémy firmy Siemens, které mají označení SIPLUS CMS.

Cíle diplomové práce:

Pojednejte o technické diagnostice a rozeberte vibrodiagnostiku strojů a zařízení.

Proveďte rešerši stavu analýzy vibrací pomocí moderních on-line systémů.

Zaměřte se na rozbor vibračního monitoringu od firmy Siemens SIPLUS CMS.

Popište jednotlivé hardwarové a softwarové komponenty.

Zaměřte se na diagnostiku točivých strojů. Data se budou získávat měřením na reálném modelu, který je k dispozici a který je vybaven systémem SIPLUS CMS. Získaná dat budou odeslána přes protokol FTP k dalšímu zpracování v programu Matlab.

Výsledky náležitě vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

Learn-/Training Textbook. Siemens Automation Cooperates with Education (SCE). TIA Portal Modules for Automation System SIMATIC S7-1200 from version V14 SP1. Siemens AG 2017.

HAVEL, Josef. Dotykový panel HMI (Animace, alarmy, receptury). 49 s. Firemní materiál. Firma Siemens, s.r.o. Praha.

HAVEL, Josef. SIMATIC S7-1200. Krok za krokem. 142 s. Firemní materiál. Firma Siemens, s.r.o. Praha.

SCE Training Curriculum. Automation System SIMATIC S7-1500. Siemens AG 2016.

Firemní materiály Siemens, s.r.o., 2022. Dostupné z: new.siemens.com/cz/cs.html.

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

ČSN ISO 20816-1. Vibrace – Měření a hodnocení vibračních strojů - Část 1: Obecné pokyny. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou diagnostiky točivých strojů. K řešení byla využita online diagnostika společně s tvorbou vyhodnocovací aplikace v prostředí Matlab. Provedeným testováním byla získána data pro použití neuronové sítě. Výsledkem bylo určení stavu modelu pomocí uživatelské aplikace.

ABSTRACT

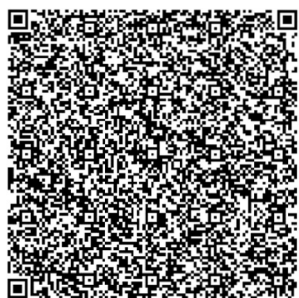
The diploma thesis deals with the issue of diagnostic of rotating machines. Online diagnostics was used for the solution with the creation of an evaluation application in the Matlab. Through the performer testing, data was obtainde for the use of an neural network. The result was the determination of the state of the model using the user application.

KLÍČOVÁ SLOVA

Online diagnostika, vyhodnocení neuronovou sítí, diagnostika točivých strojů, porucha ložiska, porucha typu nevyváženost

KEYWORDS

Online diagnostic, evaluation with neural network, diagnostic of rotating machines, bearing failure, imbalanced failure



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DURÁNÍKOVÁ, Andrea. Pokročilá vibrodiagnostika točivých strojů. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149625>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Miloš Hammer.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 26. 5. 2023

.....

Andrea Durániková

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA.....	17
3	VIBRODIAGNOSTIKA	21
3.1	Vibrace.....	21
3.2	Mechanické kmitání	22
3.3	Snímače	24
3.3.1	Snímače výchylky.....	25
3.3.2	Snímače rychlosti	25
3.3.3	Snímače zrychlení.....	26
3.3.4	Uchycení snímače.....	27
3.4	Vyhodnocení signálu	28
3.4.1	Fourierova transformace.....	29
3.4.2	Rychlá Fourierova transformace	30
3.4.3	Volba časového okna.....	30
3.4.4	Průměrování.....	31
3.5	Spektra.....	32
3.6	Detekovatelná poškození	33
3.6.1	Nevyváženost.....	33
3.6.2	Ložiska.....	35
4	VIBRODIAGNOSTIKA – ONLINE SYSTÉMY	39
4.1	Adash	39
4.2	SKF	40
4.3	Pruftechnik.....	41
4.4	Lami Kappa Teplice	42
4.5	ifm.....	42
4.6	Profess	42
4.7	ABB	42
4.8	Siemens.....	43
5	VIBRAČNÍ MONITORING FIRMY SIEMENS	45
5.1	Obecný popis	45
5.2	Hardwarové komponenty	45
5.3	Software	48
6	REÁLNÝ MODEL A SOFTWARE.....	51
6.1	Popis reálného modelu.....	51
6.2	Měření na reálném modelu	52
6.3	Zpracování a vyhodnocení dat v programu Matlab	54
6.4	Testování uživatelské aplikace	63

6.5	Zhodnocení dosažených výsledků	67
7	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	75
	SEZNAM PŘÍLOH	77

1 ÚVOD

V průmyslové praxi dochází k prudkému rozvoji technické diagnostiky. V tomto směru nastává vývoj v oblasti různých metod a přístupů. Moderní rozvíjející se možností je online diagnostika se snadnějším přístupem k vyhodnocení a uživatelskému využití. Tento vývoj je v jednotlivých firmách odlišný.

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor vibrační diagnostiky a vymezení základních pojmů. Pojmy zahrnují jednotlivé možnosti, které mohou být potřebné pro praktickou část. Jedná se o popis měřených veličin a jejich matematické zpracování. Další částí je charakteristika poruch.

Diplomová práce zahrnuje výčet produktů nabízených na trhu pro vibrační diagnostiku se zaměřením na online část. Jedná se o popis daných produktů firem s hardwarovým a softwarovým řešením. Výčet zahrnuje charakteristiku komponent použitých pro reálný model.

Reálný model je použit od firmy Siemens s definovanými komponenty a připraveným softwarem na naměření dat. Komponenty a využitý software popisuje samostatná kapitola.

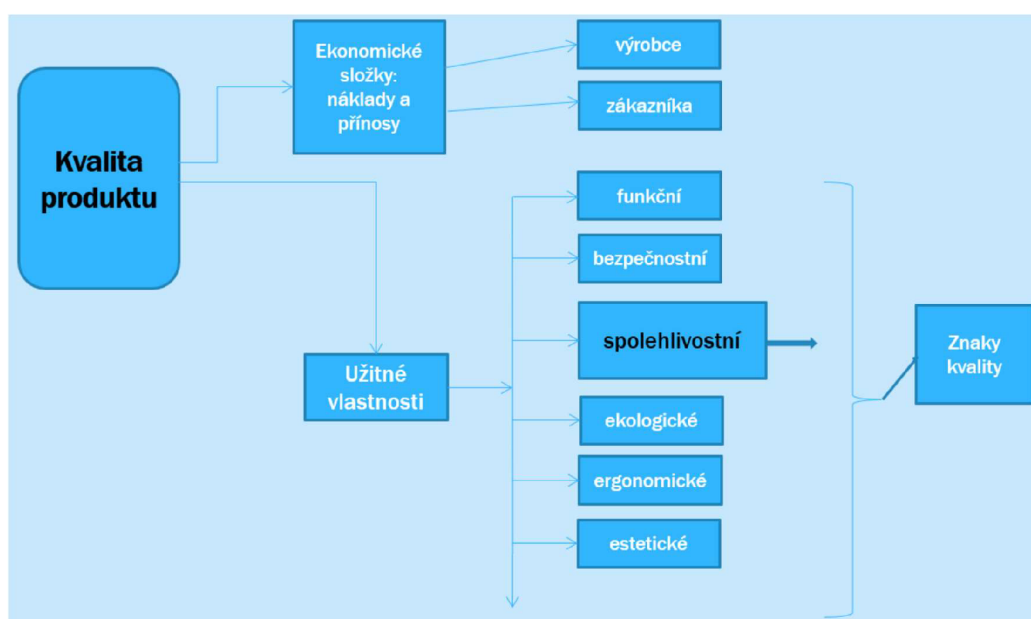
Praktická část se zaměřuje na softwarové vyhodnocení měřených vibračních dat reálného modelu, jejich přenos do daného softwaru, kterým je Matlab. V tomto prostředí se pomocí uživatelského rozhraní definují a tvoří jednotlivé výstupy potřebné pro diagnostiku modelu. Pro vyhodnocení dat je použita neuronová síť, která klasifikuje stav modelu.

2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Tato kapitola pojednává o technické diagnostice, její definici a pojmech nutných k této problematice.

Technická diagnostika je komplexní vědní disciplína zjišťující aktuální stav stroje. Pro zjištění stavu využívá různé metody. Jedná se o metody, které jsou nedestruktivní a bez demontáže. Diagnostika tedy probíhá v reálném čase na zařízení, které je jinak využíváno v provozu. Tímto pomáhá s včasným nalezením závady, a tím umožní plánování údržby a případné opravy. O technické diagnostice pojednává například norma ČSN ISO 13372. Definice obsažená v normě popisuje diagnostiku jako ověření symptomů a syndromů k určení povahy vad a poruch. Symptom definuje příznak získaný pozorováním nebo měřením, jenž může indikovat poruchu. Syndrom je souborem symptomů dohromady definujících abnormální stav [1].

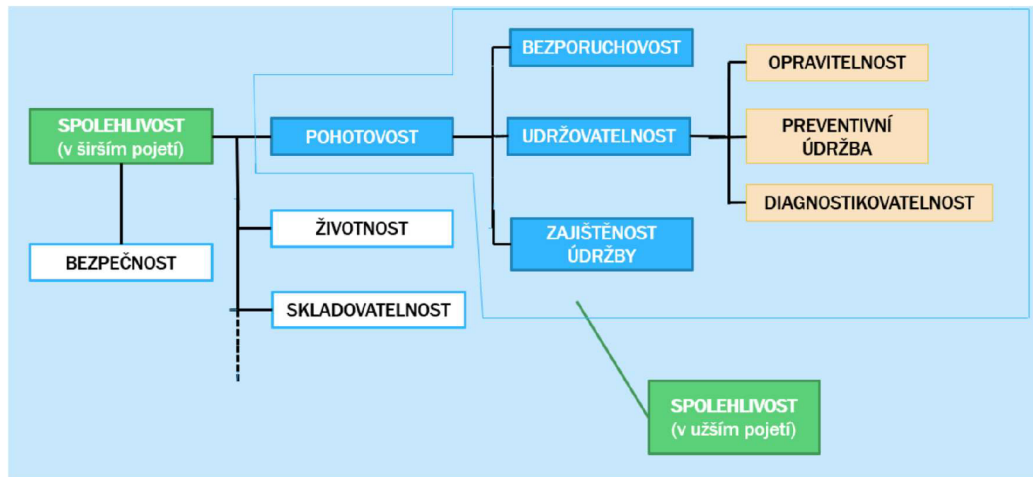
Technická diagnostika má souvislost se spolehlivostí produktu. Kvalita produktu je definována například normou ČSN EN ISO 9000:2001. Kvalita produktu v tomto případě má význam úrovně splnění požadavků pomocí specifických vlastností stroje. Zde je chápána jako pojem zahrnující užité vlastnosti a ekonomické složky, což je vidět na obrázku níže. Na tomto obrázku je zobrazena kvalita produktu s návazností na spolehlivost, jenž je zahrnuta v užitných vlastnostech [2].



Obrázek 1: Schéma kvality produktu, převzato z [3]

Spolehlivost je definována více definicemi díky svému postupnému vývoji. První definice ji popisuje jako kvalitu v čase s pravděpodobností plnit požadovanou funkci bez poruch v daných podmínkách. Druhá definice ji vyjadřuje, jako schopnost plnit požadovanou funkci po danou dobu v daných podmínkách. Zde se přidávají

ke spolehlivosti další pojmy jako je životnost, diagnostikovatelnost a bezporuchovost. Poslední definice udává spolehlivost jako souhrn popisující pohotovost a činitele ovlivňující tuto pohotovost jako je bezporuchovost, udržitelnost a zajištění údržby, což je vidět na obrázku níže [2].



Obrázek 2: Schéma spolehlivosti, převzato z [3]

Základní pojmy

Technická diagnostika používá různé typické pojmy. Mezi první lze řadit aktuální stav stroje. Ten je popisován pojmem diagnóza. Ta je vyhodnocením stavu v daném okamžiku. Pro diagnózu se používá detekce, která může odhalit přítomnost poruchy. Porucha, která je lokalizována se dá specifikovat. Pomocí specifikace se stanoví vznik a vývoj poruchy. Dalším pojmem je geneze, která je založená na znalosti předchozích stavů. Na základě znalostí geneze a diagnózy je možné stanovit predikci pro budoucí chování a vývoj poruchy. Tato predikce se nazývá prognóza. Predikce je podstatná pro informace o životnosti stroje a plánování údržby [2,3].

Diagnóza je založena na technickém stavu stroje. Tento stav je souborem technických parametrů a vlastností definovaných diagnostickou veličinou s danou velikostí a vývojem [3]. Stav je zjišťován a využíván pro výše zmíněné pojmy diagnózy, geneze a prognózy. Technický stav ukazuje pomocí souboru parametrů a veličin na stav stroje jako bezvadný, poruchový nebo provozuschopný [2].

Provozuschopnost definuje funkčnost zařízení v daném stavu a vhodnost k provozu s přihlédnutím k diagnostické veličině. Lze říct, že provozuschopný stroj je funkční stroj schopný vykonávat úkony, ke kterým je určen [3]. Provozuschopný stroj má hlídané hodnoty v rámci tolerancí pro hlavní parametry. Bezvadný stav má všechny parametry dle včetně trendů správně a plní zároveň své definované funkce [2].

Při poruchovém stavu stroje je snaha o identifikaci poruchy, která je definována jako stav přerušující provoz. Při poruše není diagnostický objekt provozuschopný. Před poruchou je obvykle možné nalézt vadu či poškození, které mohou vést k poruše, ale zařízení s nimi je schopné ještě fungovat [3]. Vada zde nemusí znamenat přerušení

schopnosti fungovat. Vada ovlivňuje splnění požadavku, jenž se může lehce lišit vzhledem ke specifickému využití. Dále je možný vznik poškození. Poškození jsou pomocí diagnostiky sledována v čase s odhadem životnosti komponentu, kde poškození vzniklo. Poškození může vzniknout i jako přirozené opotřebování součásti.

Pro sledování stavu a míry poškození je využívána diagnostická veličina. Tato veličina udává informaci o aktuálním technickém stavu objektu [3]. Mezi diagnostické veličiny mohou například patřit výchylka, rychlost a zrychlení kmitání, elektrické veličiny či teplota. Hodnota veličiny je definována pro ověření správné funkčnosti. Při diagnostice je měřena pomocí senzorů a následně vyhodnocována, či zpracovávána do formy například trendů. Trend je potom daná hodnota závislá na čase. Dále se pomocí diagnostické veličiny rozlišují jednotlivé druhy diagnostiky jako je pro výchylku, rychlost a zrychlení kmitání vibrační diagnostika nebo pro teplotu termodiagnostika.

Při diagnostice se využívají diagnostické prostředky, jenž slouží k provedení diagnostických metod. Prostředky mohou být statické i mobilní. Prostředky musí plnit základní funkce potřebné pro provedení daných metod. Tyto funkce jsou schopny objektivní kontroly s vyhodnocením parametrů. Parametry by měly být měřeny s danou přesností, věrohodností a stálostí. Dále by měly splňovat požadavky na možnosti jednoduché obsluhy a přípravu kontroly či možnost kontroly bez demontáže a destruktivních zásahů do produktu [2].

Diagnostické prostředky používá ke své činnosti diagnostik. V dnešní době je diagnostikem osoba způsobilá k vykonávání těchto úkonů. Diagnostik může být osoba proškolená k vykonávání diagnostiky nebo může mít potřebnou certifikaci. Diagnostik používá určitou diagnostickou metodu, která je obvykle dána diagnostickou veličinou. Diagnostik může využívat jednu diagnostickou metodu či jejich kombinaci, které se mohou rozšiřovat pro více diagnostických veličin. Pokud diagnostik řeší více diagnostických veličin jedná se o multiparametrickou diagnostiku [2]. V rámci Asociace technických diagnostiků v České republice je certifikace diagnostiků rozdělena do více skupin, například specialista vibrační diagnostiky, technik diagnostik tribodiagnostiky, termodiagnostiky, elektrických zařízení a dalších. Jednotlivá zaměření jsou dále dělena na kategorie s různě rozsáhlou kvalifikací, která je dána například normou ČSN ISO 17359 zabývající se diagnostikou a monitorováním strojů a normou ČSN ISO 13373-1 [6].

Pro diagnostiku je také důležitý pojem diagnostický systém. Tento systém se skládá z objektu diagnostiky, diagnostických metod a metodik, diagnostických prostředků a diagnostika [3]. Systém určuje aktuální technický stav, tvořen diagnostickým procesem a využívá daných metod. V základním rozložení se jedná o diagnostiku online a offline. Při diagnostice offline je proveden úkon jednou za předem definovanou dobu. Oproti tomu diagnostika online probíhá při běžném režimu fungování a pokud probíhá s neustálým sběrem dat, tak se jedná o monitorování. Při monitorování se data ke zpracování obvykle přenáší na další média, která jsou poté součástí diagnostického systému [2].

Pro lepší návrh diagnostického systému se může navrhnout diagnostický model. Model lze rozdělit na fyzický, kde se jedná o zmenšeninu reálného objektu, nebo na abstraktní, kde se nejčastěji používá model matematický. Matematický model popisuje reálnou soustavu sadou proměnných parametrů a rovnic, které je potřeba vhodně nastavit. Matematické modely se následně dají podrobněji rozdělit na statické a dynamické dle použití rovnic nebo na procesní, stavové, spojité či nespojité nebo na několik dalších podle zadání vstupů, výstupů a znalosti systému v reálných podmínkách. Modely jsou využívány v různých kombinačních situacích, mezi které patří reálný objekt v reálných podmínkách, reálný objekt v modelových podmínkách, modelový objekt v reálných podmínkách nebo modelový objekt v modelových podmínkách [5].

3 VIBRODIAGNOSTIKA

Vibrodiagnostika je často využívanou nedestruktivní diagnostickou metodou. Diagnostickou veličinou jsou nejčastěji výchylka, rychlost a zrychlení vibrací, které jsou vyjádřením kmitavého pohybu. Tento kmitavý pohyb je citlivý na poruchy zařízení a je možné jej při zadaných referencích používat k jejich detekci. Vibrace jsou závislé nejen na poruše, ale i na budícím signálu. Tento budící signál je proměnný pro daná měření a diagnostiku. Tento budící signál bude dále popsán jako samostatný pojem.

Společně s budícím signálem budou předmětem této kapitoly pojmy potřebné pro definici kmitavého pohybu, měření, vyhodnocení včetně matematických operací k tomu potřebných a správnou interpretaci výsledků.

3.1 Vibrace

Vibrace lze definovat jako kmitání. Kmitání je periodický děj, který je možné popsat například pomocí harmonické funkce sinus. Lze říct, že je to děj opakující se v čase s danou periodou, frekvencí a amplitudou.

Pro zjednodušení lze vibrace představit na harmonickém kmitání. Pro tento děj lze pomocí periody určit frekvenci dle vzorce níže, kde frekvence f je definována převrácenou hodnotou periodou cyklu T .

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

Dále lze pro harmonický průběh definovat výchylku, z výchylky poté pomocí derivace rychlost a další derivací zrychlení. Výchylka je dána vztahem (2), kde je okamžitá výchylka v čase $x(t)$ dána maximální výchylkou X_{max} , časem t a periodou T . Vztah v závorce je dále zjednodušen na úhlové zrychlení ω .

$$x(t) = X_{max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

V následujících vzorcích je vztah převeden pomocí derivace podle času na vztahy pro výpočet rychlosti a zrychlení. Hodnoty V_{max} a A_{max} určují maximální amplitudu rychlosti a zrychlení. Vztah v závorce za harmonickou funkcí lze v posledních úpravách zapsat jako posun od základní funkce.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{max} \cdot \cos(\omega t) = V_{max} \cdot \cos(\omega t) = V_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{max} \cdot \sin(\omega t) = -A_{max} \cdot \sin(\omega t) \\ &= A_{max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (4)$$

Pro vyhodnocení se používá jiných hodnot než samotné amplitudy. Pomocí amplitudy lze vyjádřit efektivní hodnotu kmitání, střední hodnotu nebo rozkmit.

V literatuře se používá značení RMS pro efektivní hodnotu, což je 0,707 násobek amplitudy, pro střední hodnotu se používá pojmenování average, které je 0,637 násobkem amplitudy, a poslední hodnotou je rozkmit, jinak nazývaný peak to peak hodnota, daný jako dvojnásobek amplitudy [4].

Další specifickou hodnotou, která může být použita je DKW. Tato veličina je využívána pro diagnostiku zařízení v závislosti na aktuální hodnotě amplitudy a RMS hodnotě. DKW je používáno pro výpočet ze zrychlení výchylky kmitání. Obecně se tedy jedná o poměr mezi násobkem aktuálních hodnot amplitudy a RMS a počátečními hodnotami těchto dvou parametrů. Tyto počáteční parametry jsou obvykle voleny v konečném násobku voleny blízko 1 nebo jsou experimentálně zjištěny pro nové ložisko [24].

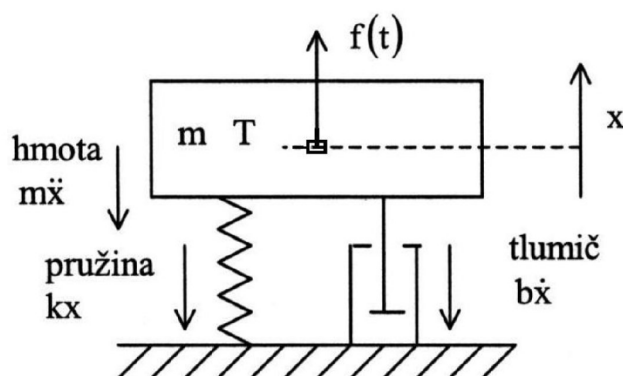
V praxi se jedná častěji o stacionární náhodné kmitání než periodické kmitání zmíněné výše. Pro vyhodnocení těchto jevů je potřeba použít hustoty pravděpodobnosti. Nejčastější rozdělení pravděpodobnosti, které je využíváno, je Gaussova křivka. Pro výpočet je používána odchylka a směrodatná odchylka vibrací. Dále se pro zpracování a správné definování časového úseku používá autokorelační funkce, která vyjadřuje závislost výchylky na její předchozí hodnotě [3].

Dalším jevem je nestacionární náhodné kmitání. Tohle kmitání je proměnné v čase. Takový druh kmitání je složitý na analýzu a je potřeba použít průměrování nebo v závislosti na vývoji v čase převést kmitání na stacionární verzi. Tento převod je možný pro pomalu se měnící změny v kmitání [3].

3.2 Mechanické kmitání

Mechanické kmitání je druh kmitání, které je možné vyjádřit pomocí pohybových rovnic. V základním rozdělení se soustavy s mechanickým kmitáním dělí na lineární a nelineární. Následně se u těchto soustav určuje počet stupňů volnosti pro možný pohyb soustavy. Po určení těchto kategorií je možné kmitání vyjádřit pohybovými rovnicemi závislými na parametrech jako je hmotnost, tlumení, frekvence pohybu a dalších mechanických vlastnostech soustavy.

Základním možným modelem je lineární model s jedním stupněm volnosti. Jednoduché znázornění tohoto modelu je zobrazení na obrázku níže. Model je zde definován hmotností pohybujícího se tělesa, tuhostí pružiny a vlastností tlumiče bez zanedbání gravitační síly tvořící gravitační zrychlení. Tyto parametry lze přepsat do pohybové rovnice v čase. Při kombinaci více modelů v jedné soustavě lze využít principu superpozice pro snadnější výpočet rovnic [3].



Obrázek 3: Model Lineární soustavy s jedním stupněm volnosti, převzato z [3]

Dalším modelem je lineární model s více stupni volnosti. Tento model může být znázorněn jako těleso s více možnými pohyby nebo jako soustava pružně spojených těles. Model je poté popsán pohybovými rovnicemi, které se skládají z diferenciálních rovnic a parametrů zapsaných pomocí matic či vektorů [3].

Pro lineární soustavy byly parametry konstantní. Z posledních možností nelineárních modelů se jedná o funkčně závislé parametry na jednotlivých veličinách v čase. Pro tyto případy nelze použít zjednodušení výpočtu pomocí superpozice. Místo tohoto zjednodušení lze hledat v soustavě jen jako možné převedení části parametrů na konstanty. V tomto převodu by bylo možné například považovat všechny parametry za lineární kromě pružiny, která by byla nelineární. Pro tuto soustavu by poté byla určena vlastnost pružiny a její charakteristická funkční závislost. Během výpočtů jsou určeny důležité frekvence systému [3].

Důležitým bodem pro výpočty a vyhodnocování modelů se soustavami jsou specifikace budící síly, která ovlivňuje pohybové rovnice a následnou odezvu soustavy. Při jednotlivých budících signálech je možné určit různé odezvy a informace o soustavě. V základním rozdělení se jedná o budící signál pomocí harmonických funkcí nebo skokových změn nebo o náhodný budící signál [4].

První možností budící síly je tedy periodická síla, která je zároveň poměrně jednoduchá při vyjádření harmonickou silou. Harmonickou silou s pouze jednou složkou nelze v reálném měření vytvořit, ale lze použít součet více harmonických složek. Těleso při použití harmonické budící síly po ustálení přebírá stejnou kruhovou frekvenci jako má budící síla, avšak amplituda pohybu se bude měnit a zároveň může být odezva fázově posunutá. Stav se nazývá vynucené kmitání. Stav je možné sledovat u některých poškození jako je například nevyváženost rotoru [4].

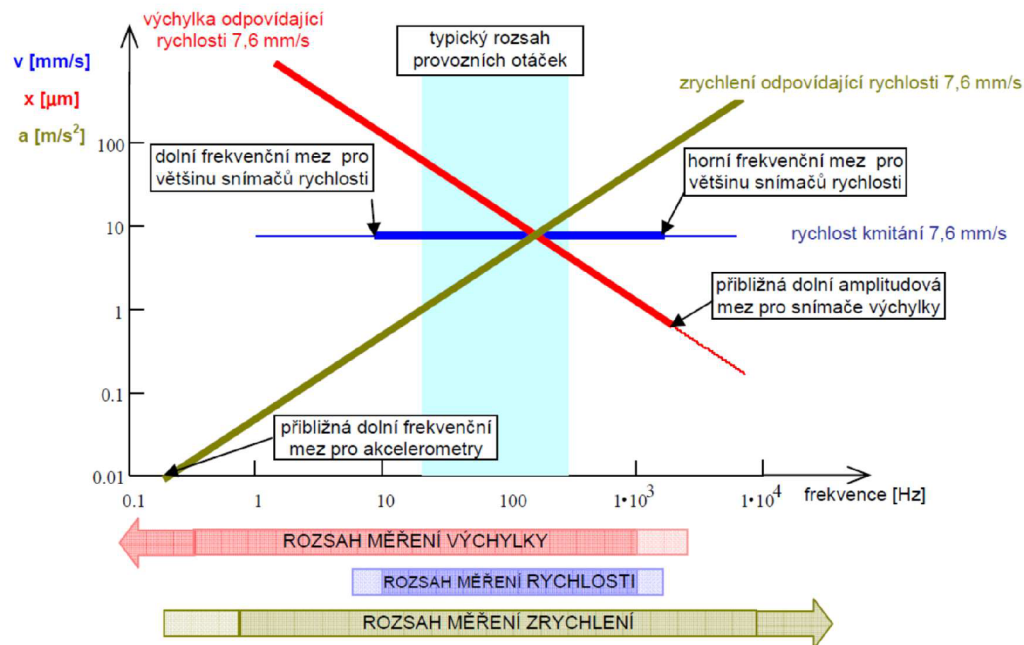
Další budící silou je impulsní síla. Tato síla vyvede těleso z rovnovážné polohy a následně těleso samovolně kmitá bez dalšího ovlivnění budící silou. Pro buzení a vznik odezvy je použito jednoho nebo více impulzů na daném místě tělesa. Odezvou na impulsní budící sílu je pohyb ve vlastní frekvenci nebo frekvencích tělesa. Při vzniku poškození se tímto rázovým chováním může projevit vada valivých ložisek [4].

Další možnou budící silou je náhodná síla. Při náhodném buzení vzniká rovněž náhodná odezva, což je odlišné od předchozích sil. V této náhodné odezvě je možné získat vlastní frekvence stejně jako při buzení impulsní silou. Nevýhodou náhodné budící síly je její přítomnost u téměř všech měření jako šum v některých případech i jinou fyzikální vlastností systému a jeho okolí.

Posledním možným buzením je samovolné buzení. Tohle buzení je pro soustavu obvykle destruktivní. Dochází k němu pomocí vnějších sil daných aerodynamikou systému, které soustavu přivedou ke kmitání na vlastní frekvenci. Takto vzniklá energie není utlumena a amplituda kmitání roste, pak dochází k destruktivním poškozením. Tato poškození a vlivy je možné nalézt pouze zkouškou reálného systému [4].

3.3 Snímače

Snímače lze pro měření vibrací rozdělit. Mezi základní rozdělení patří rozdělení dle měřené veličiny, které je použito v této práci. Jednotlivé snímače jsou popsány níže a rozděleny do skupin dle měřené veličiny. Měřená veličina je velmi důležitá. Vhodnost měření jednotlivých veličin je závislá na frekvenčním rozsahu měření. Pro měření je potřeba stanovit frekvenční rozsah měření, který pro běžná měření náleží do rozsahu 10 Hz až 1 kHz a pro tento rozsah je nejvhodnější veličinou rychlost. Při měření vyšších frekvencí je doporučeno použít měření zrychlení a pro nižší naopak výchylku. Jednotlivé rozsahy jsou vidět na obrázku níže [přednáška 9].



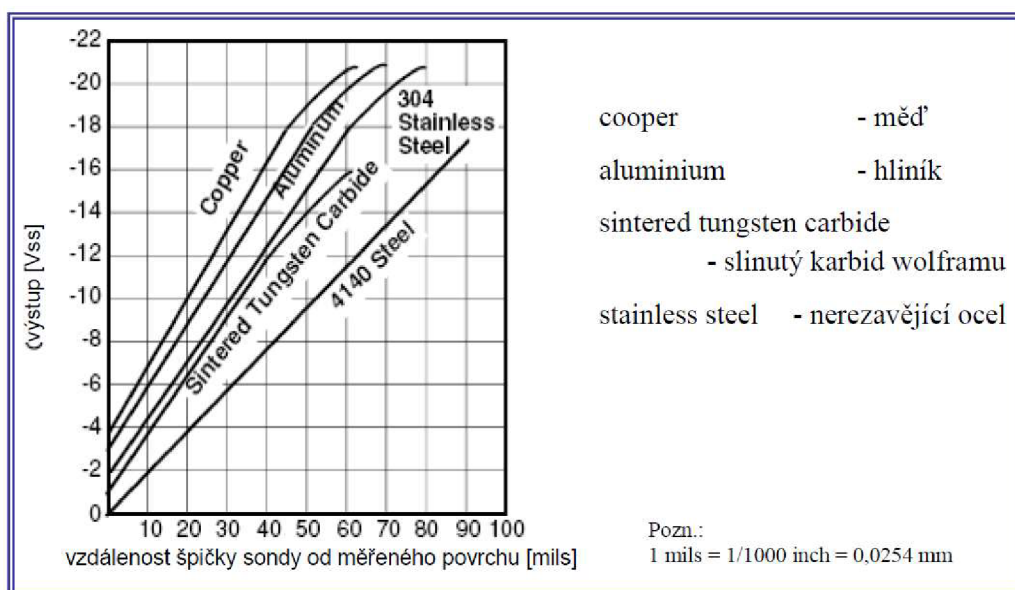
Obrázek 4: Rozdělení měřených veličin, převzato z [3]

3.3.1 Snímače výchylky

Nejčastěji používané snímače výchylky pracují v rozsahu 0 Hz až 10 kHz. Nulovou frekvenci lze využít na statické měření pro relativní hodnotu bez pohybu hřídele. Dále je možné umístit dva snímače ve vhodné poloze a snímat kinematickou dráhu hřídele. Vhodnou polohou je v tomto případě 90° mezi osami snímačů [5].

Typů snímačů je více, v dnešní době se však často objevují snímače, kde je hlavní funkčnost závislá na vířivých proudech snímače. Principem je vzdálenost mezi špičkou snímače a vodivou plochou. V této oblasti se vytvářejí vířivé proudy a ovlivňují tak elektromagnetické pole cívky. Změny tohoto pole jsou převedeny na změny impedance, kde výsledkem ze snímače je změna napětí. Systém je závislý na celkovém odporu snímače i kabeláže, protože celkový odpor zahrnuje nejen ohmickou složku, ale i kapacitní a indukční [4]. V rámci lepší přesnosti měření jsou snímače vyráběny v obalech se stíněním od prostředí. Tohle stínění má za cíl potlačit šum v měřeném signálu [5].

Sondy neobsahují hybné součásti, a proto nejsou náchylné k umístění v prostoru. Sondy jsou však omezeny citlivostí, která je závislá na materiálu měřeného hřídele. Sondu je tedy potřeba správně vybrat a kalibrovat na dané umístění. Ideální kalibrace spočívá v nastavení citlivosti do její lineární závislosti. Různé druhy sond pro dané materiály jsou vidět na obrázku níže [4].



Obrázek 5: Závislost materiálu pro sondy, převzato z [4]

3.3.2 Snímače rychlosti

Pro střední frekvenční pásmo se používá snímačů rychlosti. Používá se hlavně indukčních sond s proměnlivým magnetickým polem. Odezvou je napětí indukované k úměrné rychlosti změny magnetického pole. Jedná se tedy o elektrodynamický snímač [5].

Princip funkce je v permanentním magnetu spojeném s konstrukcí stroje a pohyblivému jádru cívky. Tohle jádro je umístěno v prostoru pomocí namotané pružinky, která svou tuhostí ovlivňuje vlastnosti a frekvenční rozsah sondy. Při pohybu jádro zůstává relativně v klidu a pohybuje se kolem něj magnet spolu s konstrukcí měřeného stroje. Tento pohyb a jeho odezvu je možné upravit nejen volbou a způsobem namotání pružiny kolem jádra, ale i použitou výplní, například olejem [4].

Při umístění sondy je potřeba dbát na správnou orientaci, neboť sonda obsahuje pohyblivé části, které jsou ovlivnitelné polohou snímače. Snímače se tedy vyrábějí ve variantách pro vertikální a horizontální osu montáže a je nutné ji dodržovat. Sonda je dále náchylná k bočním vibracím (jiné vibrace než v ose sondy), což je zapříčiněno pohybem jádra vůči magnetu a jejich případnému kontaktu s následným poškozením [4].

Snímače rychlosti mají však výhodu ceny a citlivosti na vibrace, ale nevýhodu své křehkosti a trvalé montáži na konstrukci vzhledem k možným nevhodným vibracím [4]. Jako jejich náhrada může být použit akcelerometr (snímač zrychlení) s kombinací integrační složky, kdy je rychlost kmitání určena po změření hodnot zrychlení [5].

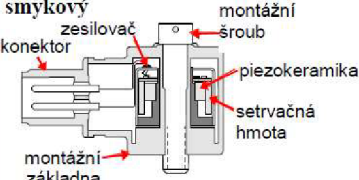
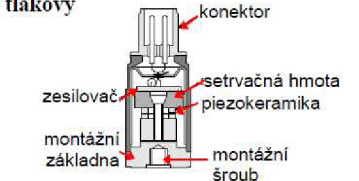
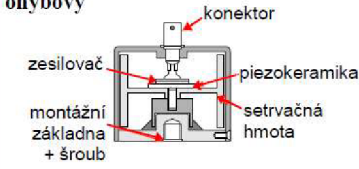
3.3.3 Snímače zrychlení

Pro snímání zrychlení jsou používány piezoelektrické akcelerometry. Výhodou těchto snímačů je umístění na nehybných částech konstrukce a získání celkových informací o vibracích, protože k dalším složkám rychlosti a výchylky se lze dostat přidáním integračního prvku ke zpracování signálu.

Princip funkce piezoelektrického akcelerometru je ve snímání deformace speciální keramické destičky, na které vzniká elektrický náboj. Tento náboj je přímo úměrný deformaci. Dále se v sondě nachází setrvačná referenční hmota a druhá hmota pevně spojená s pouzdem snímače a tím i s měřeným strojem. Setrvačná hmota je spolu s keramickou destičkou uložena pružně na předepjatém šroubu. Pomocí těchto prvků je předem určena hmotnost, tuhost a rezonanční frekvence systému. Daný typ snímače měří absolutní zrychlení vibrací, protože referenční složka zůstává v klidu. Snímače jsou při výběru definovány citlivostí a frekvenčním rozsahem, a to pomocí kalibrační křivky [4].

Pro umístění je třeba volit vhodné místo, aby byl snímač namáhán pouze na vibrace. Možnou chybu může ovlivnit teplota nebo špatný utahovací moment šroubů uchycení. Na orientaci na rozdíl od snímače rychlosti nezáleží díky dostatečné tuhosti systému [4].

Akcelerometry se obecně vyrábějí ve třech základních konfiguracích, které jsou uvedeny včetně výhod níže. Tyto tři základní typy jsou smykový, tlakový a ohybový. Pro své výhody a méně nevýhod je často užíván akcelerometr smykový, který je méně odolný na poškození základny [4].

Typ akcelerometru	výhody	nevýhody
smykový 	široký frekvenční rozsah relativně odolný nízký teplotní vliv	menší citlivost
tlakový 	široký frekvenční rozsah odolný na rázy	náchylný na teplotní vlivy náchylný na deformaci základny
ohybový 	měří velmi nízké frekvence má velmi vysokou citlivost	křehký, citlivý na rázy

Obrázek 6: Typy akcelerometrů, převzato z [4]

Pro nejčastěji využívané smykové snímače jsou obvykle použity tři dvojice krystalů a tělísek umístěných na středovém trojúhelníkovém prvku. Celá konstrukce je poté předepnuta prstencem. Předpětí krystalů zaručuje správnou linearitu snímače. Náboj, který je získáván, vzniká mezi prstencem a povrchem snímače. Rozložení komponent dává sondě dobrou citlivost v poměru k její hmotnosti [5].

3.3.4 Uchycení snímače

Problematikou správného uchycení snímačů se zabývá norma ČSN ISO 5348. Správná montáž je dána nejen normou, ale i rozvahou nad přístupností a vhodností plochy, ekonomickým a technickým hlediskem. Tato rozvaha a výběr je důležitý pro měření signálu, který bude možné použít pro vyhodnocení a vytvoření závěru vzhledem k poruše a diagnostikované komponentě stroje [3].

Mezi uchycení s nejmenším ovlivněním frekvencí je montáž pomocí šroubů. Dosedací plocha musí být vhodná pro umístění snímače s vhodně vrtanými dírami o správné hloubce a závit. Vzhledem k těmto požadavkům je obtížné je splnit na již fungujících strojích, které nemají plochy nachystané z výroby. Na takovýchto strojích mohou být snímače umístěny na podložkách k tomu určených a je tedy snadnější jejich výměna při poruše snímače [4].

Další možností je upevnění lepidlem. Pro tohle upevnění je třeba použít vhodného lepidla a správně upravené plochy pod snímačem. Při dodržení těchto doporučení nemusí být frekvenční rozsah omezen. Pro lepší servis snímačů při jejich poškození se nelepi

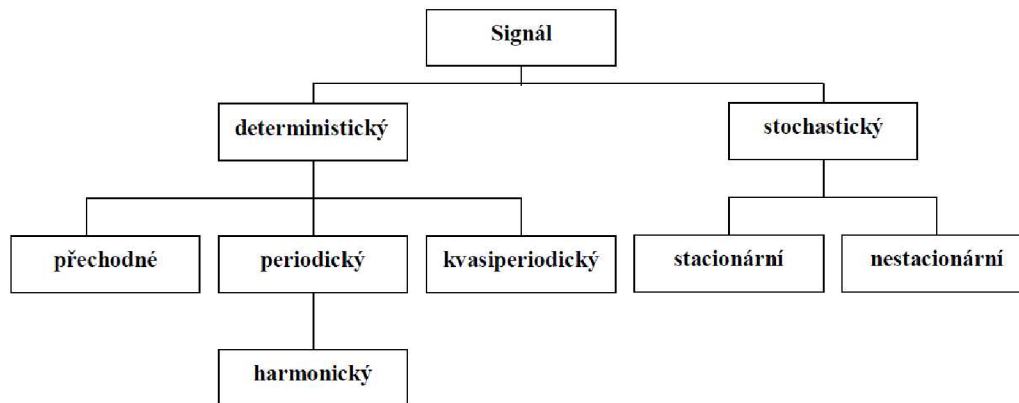
přímo na měřené stroje, ale na podložku k tomu určené. Dále je lepidlem omezen teplotní rozsah funkčnosti, kdy je lepidlo stále pevné a stabilní [4].

Pro běžná měření s omezením frekvenčního rozsahu do 2 kHz lze použít montáž pomocí magnetu. Požadavky na dosedací plochu jsou podobné jako v předchozích případech. Pro magnety jsou použité speciální materiály, aby jejich síla byla vyšší, než je u běžných magnetů [4].

Pro měření s rozsahem do 1 kHz je možné použít dotykovou jehlu. Pro některá měření může být rozsah dostačující, ale pro dlouhodobější měření je vhodné použít jiný typ montáže stejně jako pro tuto práci. Daný způsob je zde uveden pouze k úplnosti možností [4].

3.4 Vyhodnocení signálu

Pro vyhodnocení je potřebná práce se signálem získaným z měření. Signál se dá všeobecně klasifikovat do několika skupin, jež jsou níže na obrázku. Zjednodušeně lze označovat deterministický signál s funkčním pravidlem a je možné jej předvídat. Stochastický signál je opakem k deterministickému, proto je chování tohoto signálu zcela náhodné [3].



Obrázek 7: Schéma rozdělení signálu, převzato z [3]

Mezi deterministické signály výše patří přechodný signál, který je specifický pro časový úsek, může se například jednat o odezvu na budicí impuls. Mezi nejznámější však patří periodický signál. Základem tohoto signálu je harmonický signál složený z vlastní frekvence a jejích násobků. Násobky vlastní frekvence mohou být celočíselné čili vyšší harmonické nebo částečné neboli subharmonické. Výsledky odpovídají různému kmitání v reálné časové ose [3].

Dalším druhem patřícím do stejné skupiny je signál kvasiperiodický. Tento signál je rovněž složen alespoň z násobku dvou vlastních frekvencí. Násobek má velikost poměru rovnou iracionálnímu číslu [3].

Do skupiny náhodných signálů patří stacionární a nestacionární signál. Jejich rozdíl je definován pouze jako ustálený (stacionární) nebo nestálý (nestacionární) časový úsek.

Kritérium je však závislé na délce pozorovaného signálu, kdy se signál s časovou délkou může stát z nestacionárního stacionárním. Mezi náhodné signály je patří i dělení na úzkopásmový, kde je obsažena jedna náhodná frekvence s proměnnou amplitudou, nebo širokopásmový, který obsahuje více náhodných frekvencí. Zcela náhodný jev je poté označován jako šum [3].

Pro zpracování signálu v diagnostice se využívá rozkladu na vlastní frekvence a jejich násobky s rozdílnou amplitudou, fází a úhlovou frekvencí v čase. Tyto násobky tvoří Fourierovu řadu. Pro reálné diagnostiku je předpoklad obecné neperiodické funkce, která pro zpracování využívá rychlou Fourierovu transformaci (FFT) [3].

3.4.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace je matematickou operací, kdy se za obecnou funkci dosazuje harmonická funkce o rozdílném kmitočtu, ale stejném součtu. Při této transformaci vzniká ze signálu kmitočtové spektrum udávající periodické děje signálu. Základním pravidlem pro periodické děje rozklad funkce do nekonečného součtu harmonických funkcí [5].

Pro neperiodické děje platí, že časový úsek je definován na konečnou velikost. Signál mimo tuto časovou oblast nabývá hodnoty nula. Tento interval se následně periodicky opakuje a pro periodu blížíci se nekonečnu se amplituda složek spektra blíží nule, jejich vzdálenost se rovněž limituje k nule a počet čar spektra je blízko nekonečna. V této oblasti se spektrum stává spojitým [5].

Pro periodický signál přechází signál během transformace na Diracovy impulsy, což je limitním příkladem na daném intervalu s periodou blížíci se nekonečnu. Tento limitní případ nastává z důvodu chybějící existence Fourierova integrálu pro periodické signály [5].

Stejně jako pro periodické signály je transformace limitním případem, tak pro náhodný signál transformace neexistuje. Při transformaci náhodného signálu vznikne náhodná funkce. Tento problém je řešen dříve zmíněnou hustotou pravděpodobnosti. Při transformaci nejčastěji hustotou středního výkonu. Vznikne výkonová spektrální hustota definovaná transformací výskytu náhodného jevu [5].

Speciální úpravou Fourierovy transformace vzniká diskrétní Fourierova transformace (DFT), která místo spojitého signálu pracuje se signálem diskrétním. Diskrétní signál je ovlivněn vzorkováním, jenž je následkem převodu analogového formátu na digitální. Díky vzorkování se pro výpočet bere N vzorků. Skupina N vzorků se následně chová jako spojitá skupina až na informaci o hodnotě v daném čase. Nenulové hodnoty jsou obsaženy pouze v násobcích periody [5].

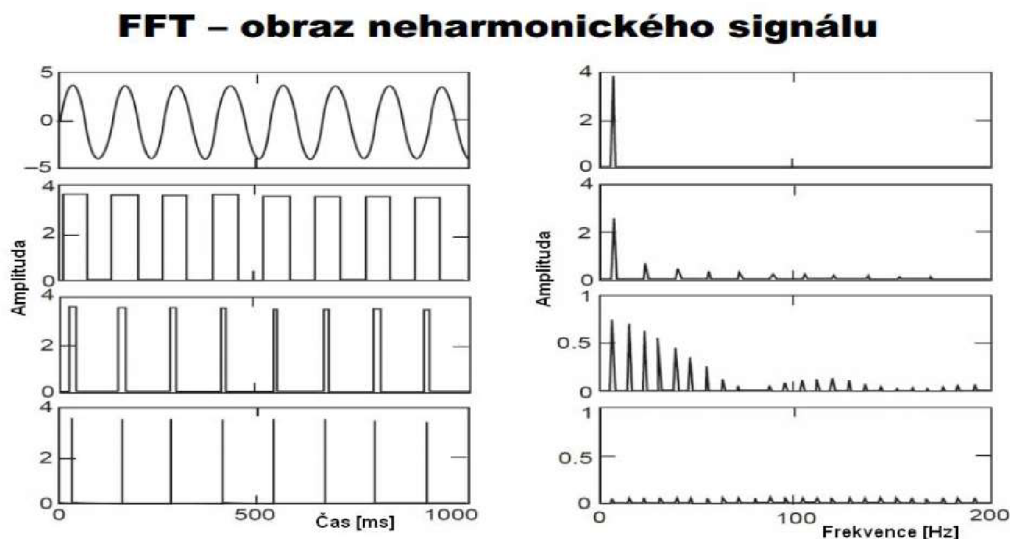
Pro diskrétní zpracování může vzniknout chybný výsledek v důsledku špatného vzorkování neboli aliasing. Tento jev vzniká při nízké vzorkovací frekvenci pro rychlý jev. Vzorkovací frekvence má omezené pásmo, ve kterém je možné získat správné výsledky. Tohle pásmo pro měřené frekvence je dáno maximální frekvencí, která je polovinou frekvence vzorkovací. Pro snížení rizika chyby aliasingem je používán anti-aliasing filtr, který vysokofrekvenční pásmo ze signálu odstraní před jeho diskretizací [4].

3.4.2 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace je úpravou diskrétní Fourierovy transformace za účelem snížení výpočetní náročnosti a následné urychlení výpočtu. Tato metoda má čtyři základní parametry [5].

Prvním parametrem je rozsah frekvenčního pásma. Tento rozsah je obvykle definován od 0 Hz do poloviny vzorkovací frekvence. V reálných případech je tohle pásmo ještě zúženo vlivem filtrování proti aliasingu. Dalším parametrem je tzv. zoom, definující zmenšení frekvenčního rozsahu. K dalším patří počet čar spektra. Tento počet se řídí omezením počtu vzorků, kdy počet spektrálních čar je dán jako polovina počtu vzorků N . Každá čára má pořadové číslo dané časovým pásmem, což je dalším parametrem. Posledním je rozlišitelnost frekvenční analýzy. Rozlišitelnost je dána intervalem neboli rozestupem mezi spektrálními čarami daným poměrem vzorkovací frekvence ku počtu vzorků [5].

Při použití FFT je k dispozici pouze N hodnot daných mocninou čísla dvě. Tohle omezení je vyváženo rychlostí výpočtu. Počet hodnot kmitočtového spektra bude poloviční oproti počtu hodnot v časovém signálu a maximální frekvence bude definována jako polovina frekvence vzorkovací. Tato omezení souvisejí se Shannonovým vzorkovacím teorémem, dle kterého musí být vzorkovací frekvence alespoň dvakrát větší než nejvyšší harmonická frekvence obsažená v signálu. Při reálném měření tedy může dojít ke ztrátě dat. Tato data mohou být však pouze náhodným šumem. Příklad zpracován signálu pomocí FFT je vidět na obrázku níže [5].



Obrázek 8: Příklad FFT, převzato z [5]

3.4.3 Volba časového okna

Časové okno se volí z důvodu předcházení záskmitů v signálu. Signál se v rámci časových oken zpracovává jen pro určitou délku signálu a velikost odezvy vibrací. Základní signál

by měl být upraven pomocí Fourierovy transformace, ale při použití oken je signál před transformací pro dané okno vynásoben váhami okna. Následně proběhne transformace a nemělo by dojít k zámkitům na okrajích okna [5].

Časová okna jsou tedy definovány funkcí, která následně určuje váhy. Z této definice vyplývá, že je více druhů různých časových oken. Tyto okna rozdělují signál do diskrétních částí s proměnnou vahou. Pro výpočty je využívána krátkodobá Fourierova transformace (STFT), což zahrnuje rozdělení na menší úseky a počítání transformace na těchto úsecích. Tyto úseky nemusí být vždy násobkem periody signálu. Vznikají frekvenční odezvy, které v reálném signálu nejsou. V rámci vykreslení amplitudy a frekvencí je signál zobrazen ve tvaru obloučků. Nejvyšší oblouček se nazývá hlavní lalok, ostatní jsou postranní laloky. Ideální stav je velký rozdíl mezi hlavním lalokem a postranními pro hodnou amplitudy. Dalšími podstatnými parametry jsou minimální pokles amplitudy pro hlavní lalok, šířka pásma šumu [5].

K základním oknům patří obdélníkové okno. Tohle okno má pouze jednu hodnotu váhy v celém rozsahu. Signál je v celém rozsahu násoben vahou 1. Tato váha vede k nespojitostem na okrajích oken, pokud nebylo okno přesně na délce periody. Metoda je vhodná pro spojitý signál vzhledem k nulové úpravě signálu a výpočtu FT bez úprav. Zpracovaný signál má malou vzdálenost mezi hlavním a postranními laloky. Pro signál, kde se perioda nerovná oknu vzniká zkreslení amplitudy spektra pro hlavní frekvenci a spektrum je roztaženo [5].

Dalším oknem je Hanningovo okno. Okno nabízí kompromis mezi ostrostí spektra a potlačením nepravých frekvencí. Typickým znakem je úzký hlavní lalok s malými postranními laloky. Další vlastností je překrytí vzorkovacích frekvencí o 50 %. Tohle okno je nejvhodnější pro vibrodiagnostiku. Používá se k vyhodnocení přechodných jevů, sinusových signálů, úzkopásmového náhodného signálu i neznámého obsahu [5].

Mezi další patří Flat Top. Vzorec pro váhy je v případě tohoto okna delší. Okno je vhodné používat na přesné jednotónové amplitudové měření, ke kalibraci snímačů a sinusové vlny s důrazem na amplitudovou přesnost [5].

Posledním oknem je Gaussovo okno. Tohle okno lze parametrizovat pomocí parametru alfa, který udává roztažení okna. Je zde možné optimalizovat okno pro pomalu se měnící signály a tím dosahovat lepších výsledků. Další výhodou je fakt, že Gaussova funkce je pomocí Fourierovy transformace převedena na jinou Gaussovu funkci. Okno v amplitudové charakteristice vypadá jako obrácená parabola bez laloků. Tento tvar je ideální pro zpracování, avšak šířka pásma je poměrně široká, což může být nevýhodou. Z principu neurčitosti je tohle okno nejvhodnější a v kombinaci s krátkou Fourierovou transformací je označováno za Gaborovu transformaci [5].

3.4.4 Průměrování

Průměrování je podstatné pro snížení chyb spekter, odfiltrování rušivých složek s potlačením nežádoucích složek signálu a odfiltrování šumu nekoherentního se signálem.

Průměrování lze rozdělit dle oblasti na frekvenční a časovou. Při průměrování frekvenční oblasti jsou zachovány signály vztahující se k součásti a ostatní jsou potlačeny. Je to tedy nejčastější formou frekvenční analýzy. Vždy se vyhodnotí jeden naměřený úsek. Úseků musí být naměřeno více pro průměrování a dále je potřeba správně určit časovou váhovou funkci. Druhou oblastí je časová. Tato možnost se zaměřuje opět na danou součást a následně se dělí na synchronní a asynchronní oblast [5].

Synchronní průměrování se dá využít pro odfiltrování nežádoucích frekvencí. Pro využití průměrování je potřeba, aby požadovaný signál byl periodický a je nutná časová spoušť s aktivací spouště (časová, manuální a další). Tohle průměrování je dobrým základem pro následnou diagnostiku periodického signálu [5].

Asynchronní průměrování nevyužívá spouště a je použito náhodně během periody signálu. Se stoupajícím počtem průměrování jde celková hodnota k nule. Tato metoda není vhodná pro technickou diagnostiku. Může však při diagnostice vzniknout špatným nastavením analyzátoru [5].

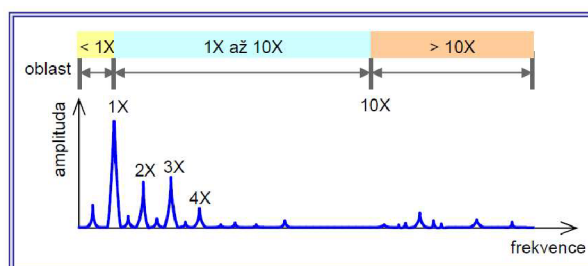
Dalším možným dělením je lineární a exponenciální. Zde jsou jednotlivé vzorky při průměrování váženy. Váhy pro lineární průměrování jsou pro všechny vzorky stejně velké. Při použití exponenciálního je váha posledního vzorku větší než ostatních [5].

Průměrování je často spojeno při analýze s překrýváním signálu. Překrytí je definováno jako poměr času začátku nového záznamu měřeného od konce ku celkovému času daného záznamu. Překrytí je možné pouze pokud FFT nelimituje počátky záznamu. Pro určení překrytí se používá pojem míra překrytí definovaná jako způsob vstupu vzorků měřeného spojitého časového signálu do analýzy. Pokud je doba zpracování v analyzátoru menší než časový vzorek, tak je možné průměrovat s překrytím. Pro tuto operaci se obecně doporučuje překrytí 66,6 nebo 75 % při použití Hanningova okna. Doba pro sběr dat je definována rozsahem spektra a možnostmi analyzátoru [5].

3.5 Spektra

Výstupem z výše uvedeného zpracování je spektrum. Spektrum je základem pro vyhodnocení vad sestavy ve vibrační diagnostice [3]. Ve spektru jsou důležité informace, které lze získat. Mezi první z nich patří významné frekvence [4].

Významné frekvence jsou specifické pro každé zařízení. Jedná se o frekvence, které by měly být znatelné z výsledků dle sestavy jako například otáčkové, ložiskové apod. Prvním označením je značení pro otáčkovou frekvenci hřídele, která se značí jako 1X. Dále se značí harmonické násobky této frekvence (2X, 3X apod). Spektrum se dělí do tří částí. Podotáčková část je zpravidla nebezpečná, protože se zde vyskytují chyby pro olej v ložiscích. Další oblast je do desetinásobku otáčkové frekvence, kde se objevují základy mechanických závad (nesouosost, nevyváženost atd.). Poslední část je nad desetinásobek otáčkové frekvence, která je specifická pro vady ložisek [4].



Obrázek 9: Příklad spektra, převzato z [4]

V praxi se pracuje obvykle s referenčním spektrem, které se naměří u nového nebo opraveného stroje pro jednotlivé pracovní body. Při porovnání s novým měřením lze zjistit aktuální změnu otáčkové frekvence nebo jiných frekvencí. V případě dlouhodobých měření lze vyhodnotit trend změn potřebný pro predikci životnosti [4].

V kombinaci se spektrem se využívá pojmu fáze. Fáze je zde definována rozdílem mezi fází budícího signálu a odezvy. Fáze je pro diagnostiku pomocnou veličinou pro určení závady. Tato veličina v daném významu udává informaci, jak sestava kmitá a je pouze doplňkovou informací ke spektru [4].

3.6 Detekovatelná poškození

Jednotlivá poškození stroje jsou specifická pro jeho různé součásti. Níže jsou popsána rozdělení závad a jejich rozpoznání při diagnostice stroje. Závady uvedené v této práci nesou kompletním výčtem, jsou specifikovány závady potřebné pro praktickou část práce. Mezi závady dále nepopsané například patří nesouosost nebo komplex pro závady elektromotorů a další.

3.6.1 Nevyváženost

Jednou z častých závad je nevyváženost stroje. Příčin nevyváženosti může být několik. Jednou z nich je montážní a výrobní příčina. Ta je dána nerovnoměrnou hustotou materiálu, výrobními odchylkami pro rotační součásti, trvalé deformace, nekruhovitost funkčních dílů jako jsou ložiska a neobrobené plochy. Další je funkční příčina. Způsobuje se během fungování stroje vzniklou deformací, nerovnoměrným opotřebením jednotlivých částí, kinetickou energií stroje nebo jeho prostou funkcí (hlavně u odstředivky). Nevyváženost jako taková zapříčiňuje vznik budících frekvencí pro vibrace a hluk, což následně ovlivňuje trvanlivost ložisek, dynamické namáhání rotoru, funkci stroje nebo může způsobit kolizi rotoru a statoru [3].

Protikladem tohoto pojmu je vyváženost. Ta je definována jako nejpřesnější přiblížení osy těžiště k ose rotace a zlepšení rotující hmoty tak, aby nedocházelo k působení volných odstředivých sil a ložiska nebyla namáhána periodickými silami s frekvencí otáček [3]. Na základě rozložení hmoty kolem rotoru lze následně pro nevyvážené soustavy určit tři druhy nevyváženosti [4].

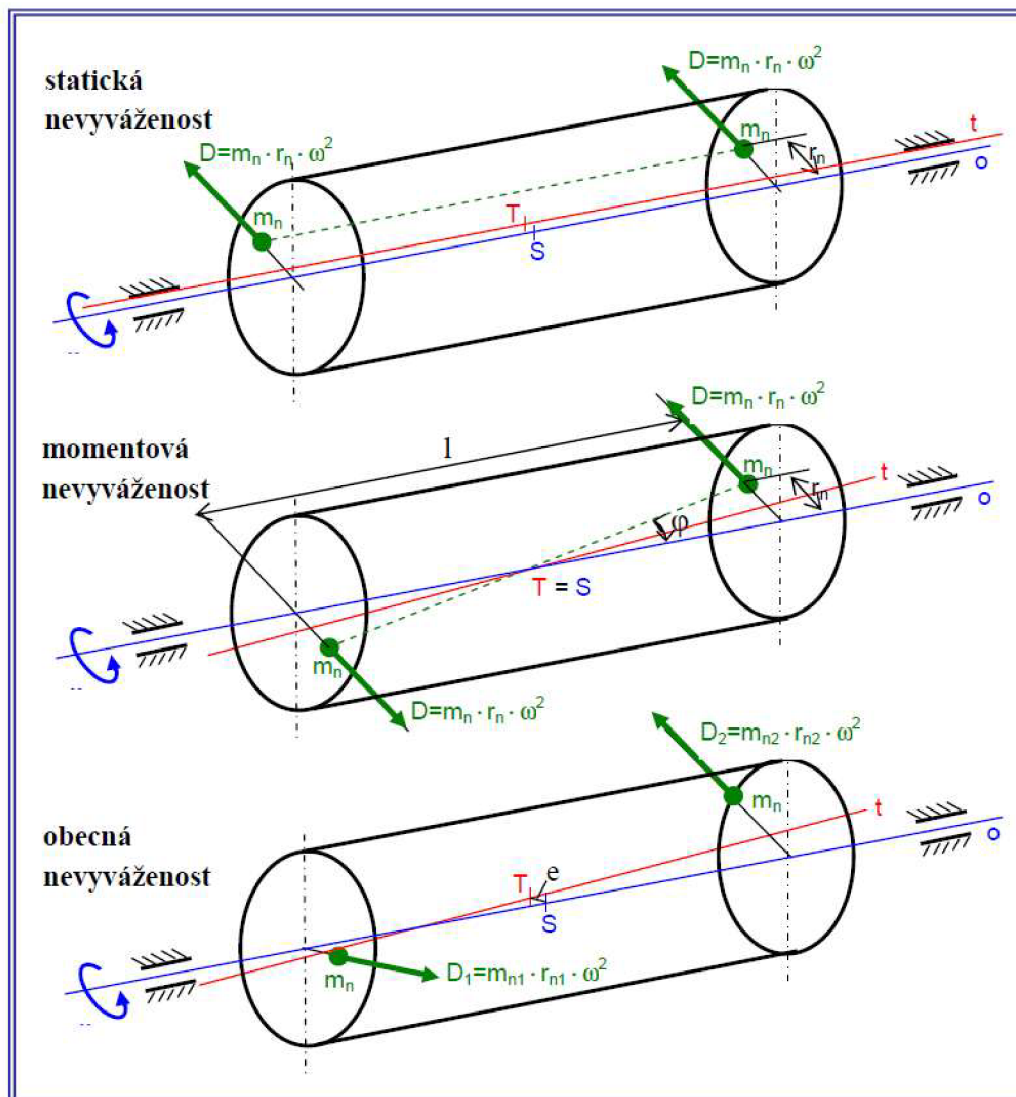
Statická nebo silová nevyváženost znamená rovnoběžnost os rotace a setrvačnosti s jejich konstantní vzdáleností od sebe. V praxi se může jednat o dvě stejné hmotnosti uložené souměrně na rovině kolmé k ose rotace a procházející těžištěm. Tato vada je statickou vadou z důvodu projevu bez rotace objektu. Nápravou je odebrání přebytečné hmotnosti nebo přidání hmotnosti z opačné strany tělesa za účelem přiblížení os těžiště a rotace k sobě. Případ samostatné statické nevyváženosti je v praxi ojedinělý pro speciální sestavy, kdy je průměr hřídele větší než jeho délka, anebo se jedná o osamocený kotouč na dlouhé hřídeli [4].

Momentová nevyváženost vzniká, když je těžiště na ose rotace, ale osa rotace je různoběžná s hlavní osou setrvačnosti. Tento případ je možné definovat jako symetrické umístění dvou těles o stejné hmotnosti na poloměru procházejícím těžištěm. V klidovém stavu se nevyváženost neprojeví a je nutné tuto kontrolu provádět při rotaci. Hmotnosti při rotaci vytváří silovou dvojici způsobující vychýlení osy setrvačnosti [4].

Nejběžnějším případem je obecná neboli dynamická nevyváženost. Ta je kombinací dvou výše zmíněných. Nastává pro možnost mimoběžnosti os setrvačnosti a rotace. Je možné je definovat jako dvě různé hmotnosti v různých vzdálenostech od těžiště. Tyto hmoty vytvoří při rotaci dvě odstředivé síly. Pro vyvážení je potřeba použít speciální postup a odebrání či přidání hmoty na dvou místech na tělese [4]. Všechny tři typy nevyváženosti jsou vidět na obrázku 10.

Z pohledu frekvenční analýzy pro diagnostiku se u této poruchy jedná o jednu frekvenci s amplitudou stejnou pro všechny radiální směry. Dále má sinusový průběh s periodou jedné otáčky. Spektrum nezobrazuje harmonické násobky otáčkové frekvence, pokud nejsou vibrace velké. Amplituda narůstá s navyšováním otáček směrem ke kritickým otáčkám a zároveň v oblasti kritických otáček nelze vyvažovat [3].

Diagnostika dle měření může rozlišit zmíněné druhy pomocí jejich fází a amplitud. Statická nevyváženost je stacionární a ve fázi. Amplituda se v tomto případě zvětšuje s kvadrátem otáček. Pro měření je vždy přítomna první harmonická frekvence, která zároveň v měření dominuje. Při měření je možné zjistit z těchto parametrů velikost nevyváhy. Stejně výstupy pro amplitudu a harmonickou frekvenci jsou platné i pro momentovou nevyváženost. Tato nevyváženost se liší snahou o opačnou fázi na stejné hřídeli, jedná se o posun o 180 stupňů. Tento typ může kromě velkých radiálních vibrací působit i velké axiální vibrace. Poslední nevyvážeností je dynamická. Zde platí, že centrální osa setrvačnosti a osa rotoru jsou mimoběžky. Fázový posun je v tomto případě obecný. Dominuje zde otáčková frekvence rotoru. Tato nevyváženost může způsobit nelinearitu a amplitudu s dvojnásobkem otáčkové frekvence rotoru. Všechna měření pro nevyváženost se provádí na domácích ložisek [3].



Obrázek 10: Typy nevyváženosti, převzato z [4]

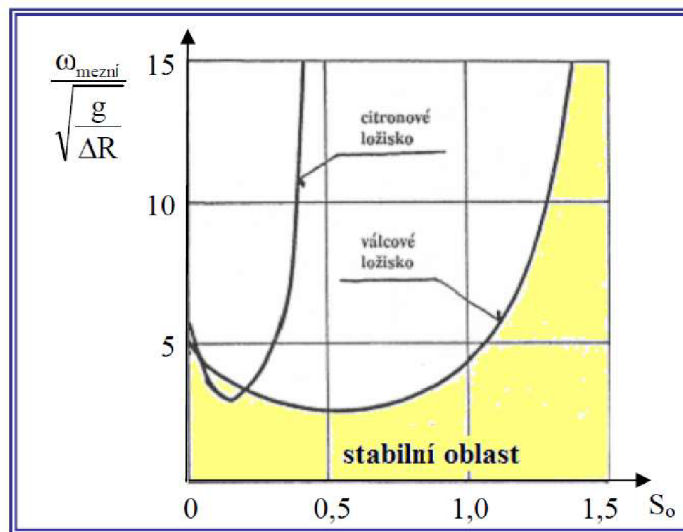
3.6.2 Ložiska

Ložiska jsou jednou z důležitých součástí strojních sestav a tvoří podstatnou problematiku v diagnostice systému. Běžně jsou používána ložiska kluzná či valivá, výjimečně mohou být užita speciální ložiska pro dané případy [3]. Pro praktiku část této práce byla využita ložiska valivá.

Kluzná ložiska

Princip fungování těchto ložisek závisí na vytvoření mazacího filmu mezi rotujícím čepem a statickou pávní ložiska. Dle tvaru se rozdělují do tří skupin na válcová, citrónová a kluzná s naklápěcími segmenty. Při pohybu je čep nesen v kluzném ložisku pomocí hydrodynamických sil. Poloha čepu v kluzném ložisku závisí nejen na mazacím filmu a konstrukci ložiska, ale i na vyvinutých otáčkách stroje. Dále se pro tyto ložiska a jejich

podobnost využívá specifikace Sommerfeldova čísla, které odráží závislost velikosti ložiska a sil v něm tvořených spolu s efektem maziva a úhlovou rychlostí otáčení. Ložisko v tomto kontextu nelze považovat za tuhý spoj, jedná se o pružný spoj se závislostí na vlastnostech maziva a tvaru ložiska daných v Sommerfeldově čísle. Pomocí toho lze definovat stabilní a nestabilní oblast pro bezrozměrné otáčky stroje. Tyto otáčky je nutné udržovat ve stabilní oblasti, aby nedocházelo k opotřebení a následné havárii. V obrázku níže jsou závislosti vyznačeny pro citrónové a válcové ložisko, v obou případech se nachází stabilní oblast pod křivkou daného ložiska [3].



Obrázek 11: Mezní otáčky v závislosti na Sommerfeldově čísle, převzato z [4]

Nestabilita ložiska může vzniknout z různých důvodů včetně odlehčení ložiska. Ke stabilitě se lze vrátit snížením otáček hřídele. Pro diagnostiku je podstatné, že nestabilita se projevuje vibracemi v nižších než otáčkových frekvencích. Z literatury je frekvence dána jako 35 - 48 % otáčkové frekvence. V závislosti na potřebě kontroly lze volit různé snímače, pro kontrolu ložiska bez vlivu maziva na přenos vibrací lze použít bezkontaktní měření výchylky. Při použití snímačů rychlosti a zrychlení je měření ovlivněno přechody materiálů a maziva v ložisku [3].

Mezi časté vady patří opotřebení a nadměrná vůle ložiska. Tyto dvě vady mají podobné projevy ve vibracích. Základní rozdíl zde bude pro obě varianty ve snímačích, konkrétně zda jsou měřeny absolutní vibrace či relativní. V případě absolutních vibrací jsou ve spektru patrné jako harmonické násobky otáčkové frekvence, u relativních vibrací potom jako velká amplituda 1X bez dalších násobků [4]. Tyto vady jsou obvykle způsobeny špatným provozním nastavením jako může být přetěžování, mazání, zvýšená vůle a uvolnění [3].

Další vadou je nestabilita oleje, víření oleje. Nestabilita způsobená vířením oleje se považuje za výraznou při překročení amplitudy o 40 % vůle v ložisku, dále je znatelná v hodnotách RPM. Příčinou mohou být nedostatečné zatížení a dynamické síly, výrazné

opotřebením či velkou vůlí, změna viskozity, teploty či teploty oleje nebo změna vnitřního tlumení. Tato vada se dá popsat jako vibrace v olejovém filmu, dochází k navýšení odstředivých a vířivých sil, což může vytvořit stálou destabilizaci. Vada se dá lehce potlačit provozními podmínkami a viskozitou oleje, popřípadě zvýšením zatížení. Naopak při provozu na nebo nad dvojnásobkem frekvence otáčení může dojít k nestabilitě oleje tlučením. Tlučení vzniká z víření, kde dojde k vysokému navýšení vibrací v olejovém filmu. Stejně jako víření je tlučení nestabilní a může vést k poruše [3].

Valivá ložiska

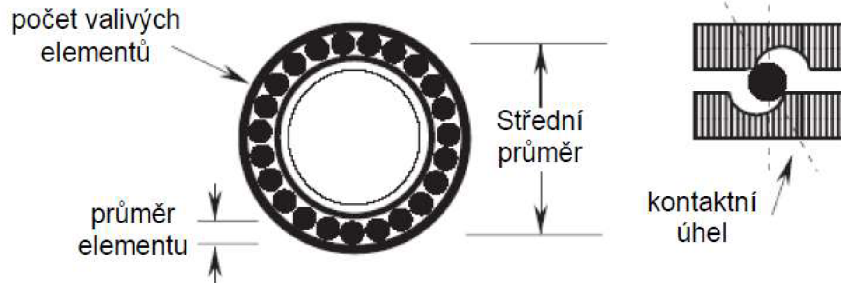
Valivá ložiska jsou obvykle nerozebratelná a používají další tělesa k odvalování, obvykle kuličky nebo válečky. Kromě svých výhod oproti kluzným ložiskům mají nevýhody jako jsou náchylnost k rázům, hlučnější chod, náročnější výroba s montáží včetně nároků na prostor. Jsou složena z více komponent, a to z vnějšího a vnitřního kroužku, klece a valivých komponent (kuličky nebo válečky) [5].

Závady na valivých ložiscích vznikají z více příčin mezi ty časté se řadí dynamické zatížení vzniklé nevyvážeností nebo nesouosostí, špatná volba maziva nebo jeho špatná filtrace či chybný proces při montáži ložiska. Vady jednotlivých komponent lze zjistit ze specifických frekvencí daných znalostí rozměrů ložiska a otáček. Popřípadě postupným porovnáváním stavu spektra pro případ sestavy bez úplných informací o ložisku. Při poškození se objevují periodicky se opakující pulzy, které jsou označovány jako ložiskové frekvence. Níže jsou uvedeny vzorce pro výpočet frekvencí jednotlivých komponent [5].

Vady jsou vzniklé obvykle drobením materiálu na valivých plochách. Tento jev se nazývá pitting. K úbytku materiálu dochází postupně, tak se obecně rozděluje do čtyř etap, které se vzájemně liší svou vibrační odezvou. Vibrační odezva je pro počáteční fázi hůře rozeznatelná a je potřebné mít zařízení s vhodným dynamickým rozsahem a nízkým vlastním šumem zesilovače, protože pro první etapu jsou typické nízké vibrace. Tyto nízké vibrace lze zaměnit s šumem. Využití vyhodnocení pomocí spektra není ideální, proto je vhodné využít jiné metody [3].

Mezi tyto alternativní metody lze zařadit trend některých měřených hodnot. Mezi vhodnější varianty, než trend patří obálka zrychlení. Obálka má dvě úrovně zpracování. Cílem procesu je zvýraznění malých signálů. V rámci první fáze se provádí pásmová filtrace. Dále se signál zpracovává pomocí opakujících se sinusových frekvencí pro dosažení zvýraznění signálu. Tento signál lze porovnat s harmonickou frekvencí specifickou k dané vadě [3].

Poruchové frekvence valivého ložiska



$$\text{Poškození vnějšího kroužku (BPFI)} = \frac{n}{2} \frac{\text{RPM}}{60} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \vartheta \right)$$

$$\text{Poškození vnitřního kroužku (BPFO)} = \frac{n}{2} \frac{\text{RPM}}{60} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \vartheta \right)$$

$$\text{Poškození valivých elementů (BSF)} = \frac{P_d}{2B_d} \frac{\text{RPM}}{60} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2 \vartheta \right]$$

$$\text{Poškození klece (FTF)} = \frac{1}{2} \frac{\text{RPM}}{60} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \vartheta \right)$$

P_d = střední průměr

n = počet valivých elementů

B_d = průměr val. elementu

ϑ = kontaktní úhel

RPM = otáčky hřídele [1/min]

Obrázek 12: Vzorce pro poruchové frekvence, převzato z [3]

4 VIBRODIAGNOSTIKA – ONLINE SYSTÉMY

Diagnostické systémy jsou děleny do dvou typů. Dříve ale i dnes se používá offline diagnostika. Další možností je online diagnostika. Pomocí online diagnostiky je možné vyhodnotit vše co u offline diagnostiky. Online diagnostika využívá vyhodnocení, které může být prováděno různými metodami. Aktuálně se začíná rozšiřovat použití umělé inteligence pro určení závady.

V následujících částech jsou popsány možnosti jednotlivých společností zabývajících se touto problematikou.

4.1 Adash

Společnost Adash nabízí možnost monitoringu pomocí svého zařízení A3716, A3800 nebo A3900 II. Tato firma se zabývá zpracováním vibračních signálů, a proto jejich zařízení jsou určena primárně pro vibrační senzory výjimečně doplněny například teplotou. První zmíněný systém A3716 lze používat jako samostatnou monitorovací diagnostickou jednotku nebo jako nástavbu pro systém instalovaný na stroji. Jednotka jde skládat stavebnicovým systémem, díky čemuž lze tvořit mnohakanálové systémy optimální danému zadání. Tento systém má dvě označení podle rozsahu vstupů na základní verzi 2U a 3U. V základní 2U verzi se jedná o 16 AC a 16 DC kanálů společně se 4 TACHO vstupy. Rozšířená verze 3U nabízí navíc 16 výstupních proudových smyček a 16 relé výstupů. AC vstupy jsou v obou případech s filtry horní a dolní propusti v rozsahu 1 Hz – 12800 Hz a 25 Hz – 25600 Hz. Nezávislé TACHO vstupy mají rozsah 0,8 Hz – 1000 Hz. Vstupní rozsahy napětí jsou pro AC ± 12 V, pro DC ± 24 V nebo 4 – 20 mA a pro TACHO je to ± 10 V. Převodník A/D má 24 a 64 bitů. Frekvenční rozsah je dán maximální frekvencí 25,6 kHz, vzorkovací frekvence pro 16 kanálů je 65,5 kHz, kde vzorkování pro 16 kanálů je plně synchronní. Omezení pro FFT je minimum 100 čar a maximum 25600 čar, kdy FFT probíhá jako zpracování v reálném čase. Dále systém nabízí širokopásmové hodnoty, časové signály, obálkovou analýzu, analýzu pomaloběžných ložisek, řadovou analýzu, měření otáček, snímání DC signálů, orbity a uživatelskou definici pásem. Pro veškeré programy je dostupná paměť RAM o velikosti 4 GB, disk SSD o velikosti 128 GB. Vše je zpracováno procesorem Intel Core 2 - 2,5 GHz. Komunikace je možná přes Ethernet 1 GB RJ45 [7].

Druhé zařízení A3800 je obdobou prvního sloužící k monitorování stroje při maximálním přizpůsobení zadání. Systém je dostupné ve více variantách a to v počtu kanálů 4, 8, 12 nebo 16. A3800 je verze systému dodávaná společně se softwarem DDS, který slouží pro vytvoření měřicích bodů a algoritmů diagnostiky. Spojení s externí jednotkou na zpracování dat je možné přes Ethernet nebo Wi-Fi. Nebo se dá tento systém A3800 využít jako výkonný analyzátor v kombinaci se softwarem VA5 Pro, což je Virtual Unit společnosti Adash. Technická specifikace je obdobná jako u verze A3716, synchronní vzorkování je však po čtyřčlenných skupinách. Liší se i nabízená paměť

a procesor. Paměť je v tomto případě pro RAM 2 GB a disk SSD 32 GB. Procesor je zde použit Intel Atom E3815 – 1,46 GHz. Vlastní paměť je menší z důvodu předpokladu řízení přes externí zařízení s nainstalovaným softwarem společnosti [8].

Poslední možností je jednobanálový online systém A3900 II. Vstupem je zde signál z akcelerometru. Jednotka má jeden výstup s proudovou smyčkou a jeden relé výstup pro nastavení alarmu přímo na jednotce. Maximální možný rozkmit pro vstupní signál je ± 5 V. Frekvenční rozsahy je možné upravovat dle specifických požadavků. Jednotka A3900 je pouze diagnostická jednotka, pro potřeby nahrávání dat je nutné ji rozšířit o jednotku A3600 memory. Spojení s počítačem na zpracování dat je možné přes RS232. Nastavení je možné pomocí softwaru Hyper Terminal [9].

4.2 SKF

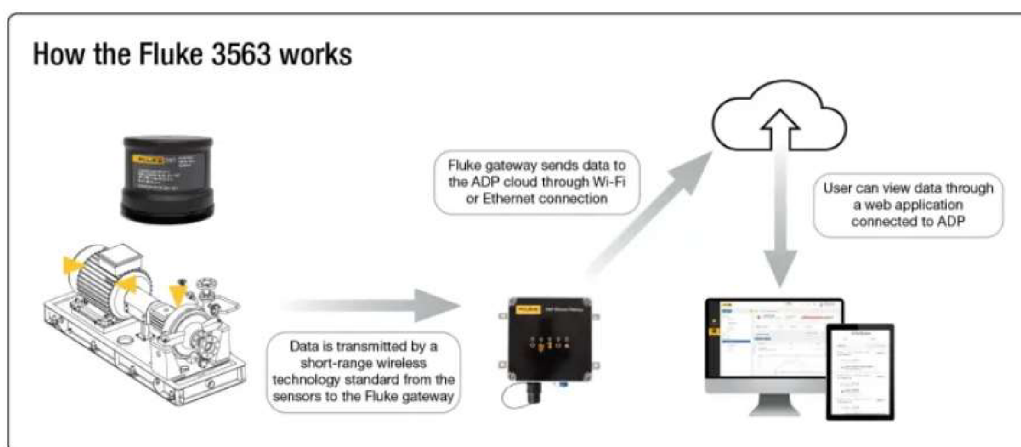
Společnost SKF nabízí také možnosti diagnostiky strojů. Mezi zařízení vhodná pro online diagnostiku a monitorování patří IMx-8 a IMx-16Plus. Další možností je v nabídce rozhraní spolu se softwarem na zpracování dat nazývané Axios. Zde jsou data snímána senzorem, poté přenesena bezdrátovým systémem na bránu a z ní do cloudu. Celý algoritmus funguje v cloudu ve spolupráci s Amazon Web Services. Rozhraní funguje jako zpracování sbíraných dat vibrací a teploty, kde se spojuje znalost rotačních strojů firmy SKF a umělá inteligence firmy Amazon Web Services. Tato umělá inteligence využívá strojové učení s vlastní detekcí anomálních stavů a intuitivní aplikací. Její výhodou je učící proces, který se stává lepším s navýšením dat, na kterých se učí [10].

Druhou podobnou možností je SKF Enlight Collect IMx-1. Tohle rozhraní je vhodné ke sběru teplotních a vibračních dat. Tyto data je možné zpracovávat a vyhodnocovat v reálném čase. Mezi jednu z aplikací je výpočet obálky pro měřené hodnoty zrychlení. V případě potřeby zpracování velkých dat a složku umělé inteligence lze software rozšířit o možnost SKF Enlight AI, která je počínajícím řešením tohoto zpracování dat [11, 12].

Systémy IMx-8 a IMx-16Plus jsou komplexní jednotky pro detekci chyb. Jednotky mají různý počet vstupů, přičemž IMx-8 má 8 analogových a 2 digitální. IMx-16Plus má dvojnásobek vstupů, to je 16 analogových a 4 digitální. Obě zařízení jsou kompatibilní s mobilními zařízeními a sítí. Systémy je možné propojit s jinými zařízeními od firmy SKF a s cloudem SKF. Jednotky jsou schopny práce v reálném čase a synchronizace všech kanálů. Interní paměť je pro potřeby jednotlivých událostí velká 4 GB. Zařízení mohou fungovat s Ethernetem, přes který funguje i napájení v rozmezí 24 až 48 V DC. Propojení s mobilní aplikací iOS nebo Android je možné pomocí Bluetooth. Pouze pro IMx-16Plus je k dispozici připojení k WiFi a mobilním datům a dále je různá konfigurace pro analogové vstupy, kde se očekává připojení teplotních čidel ke vstupům 9 až 16 [13].

4.3 Pruftechnik

Firma Pruftechnik se zabývá diagnostikou a monitorováním vibrací. Jejich systémy jsou také podpořeny vlastním softwarem a možnostmi zpracování bezdrátově, a to jak vibračních, tak teplotních dat. K prvním možnostem patří Fluke 3563 Analysis Vibration Sensor system. Tento systém je tvořen vlastním vysoko frekvenčním piezoelektrickým senzorem. Data snímaná tímto senzorem jsou na krátkou vzdálenost přenášena do lokálního zařízení, které funguje jako brána. Odtud dále přes Ethernet nebo Wi-Fi do ADP cloudu, kde jsou data dostupná z webové aplikace. Výhodou je přenos dat bezdrátově, což umožňuje jednodušší instalaci. Systém disponuje chytrým managementem baterií, což umožňuje kontrolu správnosti dat. Software nabízí rozmanité funkce na zjednodušení práce s daty a jejich vhodným vyhodnocením a určením vad. Pro instalaci je nutné využít odbornou podporu firmy Pruftechnik [14].



Obrázek 13: Schéma fungování Fluke 3563, převzato z [14]

Další možností je systém VIBGUARD IIoT. Tento systém je kompatibilní s Průmyslem 4.0. Jeho využití je rozmanité díky 12, 16 nebo 20 analogovým kanálům pro vibrace a zpracování dat, které pracují paralelně nebo jsou synchronizovány. Zařízení má časový signál, je schopno pracovat s charakteristickými hodnotami, tvorbou FFT spektra, kde veškeré zpracování je možné provádět paralelně nebo real time. Zařízení má mnoho možností tvorby alarmů nápomocných k dobré diagnostice a predikci náprav počínajících poškození a je flexibilní na instalaci. Data jsou přenášena přes MQTT rozhraní na portál, kde jsou pomocí OMNITREND Asset View softwaru zpracována do vhodných vizualizací [15].

Poslední možností je VIBGUARD compact. Tento systém nabízí 6 analogových kanálů pro měření. Zařízení také nabízí inteligentní nahrávání událostí a je možné jej používat online pomocí připojení k Wi-Fi s následným finálním zpracováním a vizualizací pomocí výše zmíněného portálu se stejným rozhraním pro přenos dat nebo je možné použít offline. Zařízení nabízí časový signál a tvorbu obálek. Ze všech možností této firmy je to nejméně rozsáhlý systém [16].

4.4 Lami Kappa Teplice

Tato společnost může být využívána na lokálním trhu. Firma sama o sobě se zaměřuje na diagnostiku strojů, ale nemá vlastní zařízení pro vibrodiagnostiku. Na diagnostiku používá výrobky společnosti Pruftechnik, které jsou zmíněny výše. V seznamu je uvedena pouze k úplnosti přehledu společností na trhu [17].

4.5 ifm

Firma ifm nabízí diagnostiku vibrací pomocí systému integrace PLC a kombinace sběrnice. Nabízená sběrnice VSE150 má 3 Ethernetové porty a 6 kanálů, přičemž 4 jsou určeny pro dynamické veličiny a 2 analogové. Dále je sběrnice vybavena interní pamětí a nahráváním s reálnou časovou značkou. K dalším možnostem sběrnice patří 2 rychlé digitální výstupy pro alarmany systému [18]. Firma dále nabízí inteligentní verze sensorů, ale hlavní myšlenkou zde zůstává jednoduchost systému a propojení s PLC daného stroje.

4.6 Profess

Firma Profess je další v oblasti vibrodiagnostiky. Jejich měřicí zařízení však slouží spíše jako přenosné jednotky a kontinuální nahrávání delší, než stanovenou dobu není doporučeno. Proto v této práci nejsou popsána daná zařízení [19].

Dále společnost nabízí software pro online monitorování v oblasti vibrodiagnostiky. Mezi nabídku patří software od firmy Adash. Dalším softwarem je Emerson MHM, ten je schopen offline analýzy a sběru dat v reálném čase. Jeho využití je však omezené z důvodu kompatibility zařízení. MC-monitoring CMS 500 je dalším z nabízených softwarů a slouží k ukládání a vizualizaci dat pomocí různých možností jako jsou orbity, FFT, časový signál a jiné. Obdobně jako Emerson i tento software má omezenou kompatibilitu, a i poslední software je na tom stejně. Jedná se o Sparks Instruments TMS-2000, ten je hlavně na diagnostiku elektrických výbojů [20].

Mezi další nabídky společností patří zabezpečovací systémy od firmy Emerson skládané z jednotlivých měřicích karet vhodné pro monitorování. Z hardwarového hlediska je možné systém sestavit z karet na míru dle požadavků postupným rozšiřováním vstupů a výstupů. Karty jsou kompatibilní se softwarem Machine Studio, který firma dále nepopisuje z hlediska možností a funkcionality [21].

4.7 ABB

Firma ABB svou nabídku staví hlavně na použití smart senzoru, který je k dispozici ve dvou verzích. První verze standard performance a druhá high performance. Rozdíl v těchto dvou produktech je jen v pár parametrech. Dále je možné využít sestavy PLC, které jsou v tomto případě chystány pro jiné aplikace než diagnostiku.

Chytré senzory mají za účel jednoduchost montáže a použití jednoho senzoru pro každý stroj, který je sledován. Nejčastějším využitím mohou být elektrické motory. Přenos dat je zde zajištěn bezdrátově pomocí Bluetooth na mobilních zařízení nebo přes bránu pomocí zabezpečené cesty na cloudové uložení ABB. Data je možné zpracovávat jak ve webové aplikaci, tak v aplikaci pro mobilní zařízení. V obou variantách je velká škála vyhodnocovacích kritérií zjednodušených na přehlednou verzi semaforů označujících aktuální stav [22].

Další možností společnosti jsou různorodá programovatelná PLC, která je možné sestavit do sestav dle potřeby a nainstalovat na nich potřebná pravidla. K PLC patří i možnosti kontrolních panelů. Veškerá rozhraní lze propojit přes multifunkční AC500-eCo V3. Vše je možné programovat pomocí vhodného softwaru společnosti [23].

4.8 Siemens

Firma Siemens nabízí ve svém portfoliu sestavy vhodné k diagnostice strojů a zařízení v závislosti na použitých senzorech. Konkrétním příkladem nabídky je produkt řady Simplus CMS, který je sestaven z jednotlivých zařízení. Tato sestava nabízí jak offline, tak online diagnostiku s vyhodnocením pomocí softwaru Siemens nebo externího. Program společnosti zpracovává data primárně pro offline diagnostiku, ale při zpracování v jiném softwaru lze data posílat online. Podrobnější popis tohoto zařízení bude předmětem další kapitoly z důvodu použití systému pro vlastní řešení této práce.

5 VIBRAČNÍ MONITORING FIRMY SIEMENS

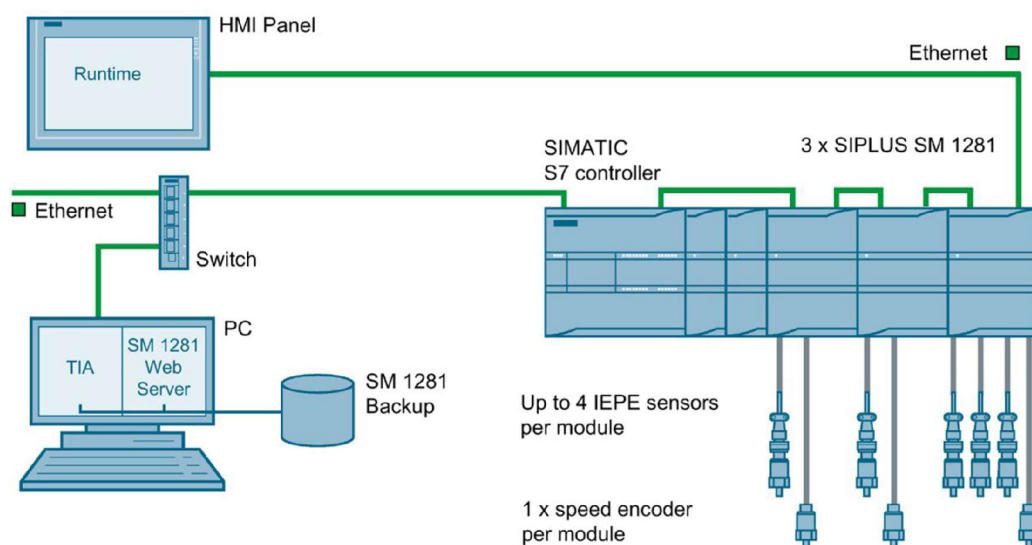
V rámci této práce bylo vybráno pro vibrodiagnostiku zařízení společnosti Siemens. Konkrétně se zde jedná o zařízení SIPLUS CMS, které je složené z SM 1281 a SIMATIC. Jejich popis bude předmětem této části.

5.1 Obecný popis

V porovnání s výše zmíněnými firmami zabývajícími se vibrodiagnostikou, tak firma Siemens nabízí zařízení založená na PLC systému. Tato možnost nabízí flexibilitu pro daný problém.

Jak bylo zmíněno, jedná se zde o sestavu z více dílčích zařízení. Zařízení SM 1281 a SIMATIC jsou schopná monitorovat a odesílat data k dalšímu zpracování. Jednotka má k dispozici v základní verzi 4 kanály pro sledování veličin, jeden digitální vstup, synchronizované nahrávání dat a jejich zpracování a následného vyhodnocení například použitím TIA portálu.

Zařízení se dá konfigurovat do sítě jako je vidět na obrázku níže. Je zde vidět provázání jednotlivých částí se serverem a TIA portálem. Dále je zmíněn HMI Panel pro možnost spuštění měření či základního vyhodnocení.

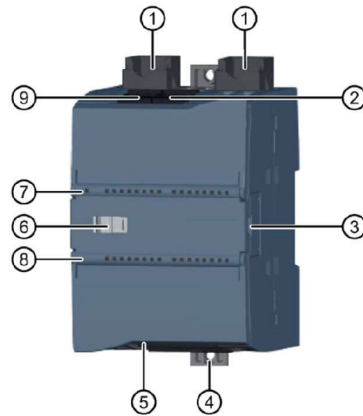


Obrázek 14: Konfigurace, převzato z [24]

5.2 Hardwarové komponenty

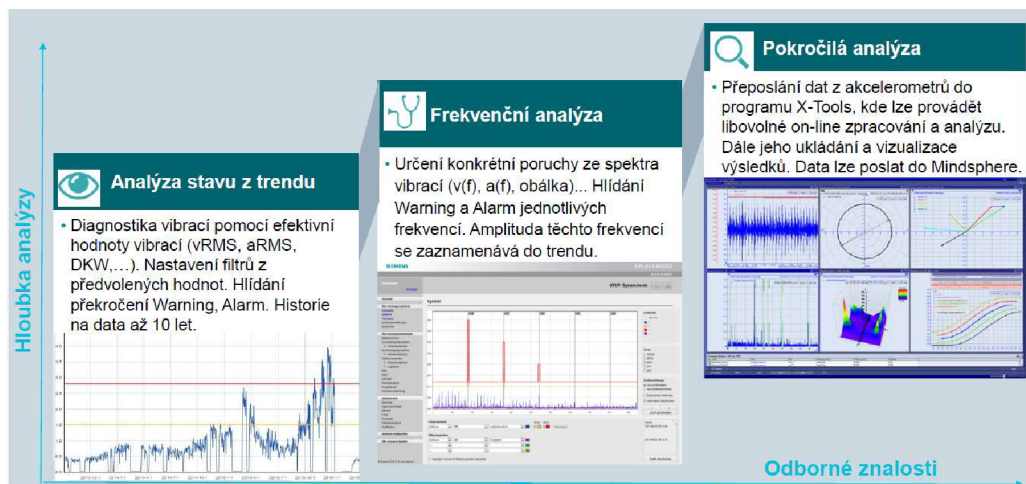
Struktura SM 1281 je promyšlená s vhodným umístěním konektorů a možností montáže. Jak je vidět na obrázku 15, SM má dva konektory na ethemetové rozhraní (1), konektor pro senzor rychlosti (2) a pro vibrační senzory (5), spojení se základní deskou

„downstream“ (3) a spojení pro bus „up stream“ (6), dále napájení (9), uchycení (4) a kontrolky systému (7 a 8).



Obrázek 15: SM 1281 – struktura, převzato z [24]

Funkce jsou velmi rozšířené už v první jednotce SM 1281, která je schopná přes spojení backplane bus předávat další jednotce S7-1200 mnoho vyhodnocených dat. Mezi základní možnosti patří přenos surových dat, tvorbu trendů a tvorbu vyhodnocení pomocí spektra pro měřené veličiny. Přes připojení k serveru je zajištěna detailní diagnostika. Pro diagnostiku systému se zpracovávají hodnoty pro jednotlivé veličiny. Sestava je schopná pomocí vyhodnocení hlídat limity a spouštět varovná upozornění, další funkce jsou zprávy systému. Na obrázku 16 jsou vidět úrovně možností podle hloubky analýzy na ose y a odborných znalostí na ose x.



Obrázek 16: Siplus CMS – úrovně analýzy, převzato z [25]

Sestava umožňuje při monitorování spuštění různých operačních módů při běžící operaci. Základním prvkem je inicializace systému a konfigurace. Následuje mód nazvaný „STOP: System ready“, který umožňuje nastavení sledovaných hodnot při diagnostice, restart zařízení, obnovení dat, administrativní úkony nebo restart zařízení

do původního nastavení. Poté lze spustit „RUN: Systém Diagnostics“, jenž slouží ke kontrole senzorů a obvodů. Kontrola probíhá na základě vyhodnocení vstupu ze senzorů, který se musí nacházet v daném rozsahu 6,2 V až 15 V a předpokládá se obvyklá citlivost 100 mV/g. Při tomto rozsahu a citlivosti je možné měřit zrychlení nad ± 30 g. Dále lze spustit v části RUN mód měření, kde je možné nahrávat měření. Nejedná se však o plnohodnotné monitorování. Během této aplikace je možné spočítat vRMS, aRMS a DKW a uložit je jako trend nebo nahrávat surová data. K online diagnostice je využívána poslední aplikace monitorování. Tento mód ukládá procesní data a pro kontrolu aktuálních hodnot je třeba jej pozastavit. Následně lze použít ještě software X-tools, přes který je možné sdílení dat v reálném čase. Lze vyhodnotit trend a nahrávat určitá data, ale nejsou zde počítána spektra. Mezi další funkce patří vypnutí systému nebo chybové stavy.

Monitorování probíhá pro dané hodnoty přes dva filtry (horní propust a dolní propust). Tyto filtry jsou nastavitelné v rozsahu, který je v tabulce 1. Měření vRMS se odkazuje na ISO 10816-3, kde je dána rychlost od 120 rpm do 600 rpm pro frekvenci 2 Hz až 1k Hz a rychlost vyšší jak 600 rpm pro frekvence od 10 Hz až 1k Hz. Stejně tak jsou v tabulce 2 uvedené limity pro jednotlivá spektra. Data jsou snímána maximální vzorkovací frekvencí 46 875 Hz. Při nižší frekvenci jsou přenášena data podvzorkována a zároveň podléhají filtraci anti-aliasing filtru.

Tabulka 1: Monitorovací mód, převzato z [24]

Monitoring method	Frequency band	
	High-pass filter (HighpassFilter ...)	Low-pass filter (LowpassFilter ...)
aRMS	0.1 Hz / 2 Hz / 10 Hz / 100 Hz / 1 kHz / 2 kHz (adjustable)	2 Hz / 10 Hz / 100 Hz / 1 kHz / 2 kHz / 5 kHz / 10 kHz / 23 kHz (adjustable)
vRMS ¹	0.1 Hz / 2 Hz / 10 Hz / 100 Hz (adjustable)	2 Hz / 10 Hz / 100 Hz / 1 kHz / 2 kHz (adjustable)
DKW	0.1 Hz / 2 Hz / 10 Hz / 100 Hz / 1 kHz / 2 kHz (adjustable)	2 Hz / 10 Hz / 100 Hz / 1 kHz / 2 kHz / 5 kHz / 10 kHz / 23 kHz (adjustable)

Tabulka 2: Spektra, převzato z [24]

Spectra	Frequency band	Speed range
Velocity	2 Hz to 1 kHz	120...6000 rpm
	10 Hz ... 2 kHz	> 6000 rpm
Acceleration	10 Hz to 23 kHz	> 120 rpm
Envelope curve	2 Hz ... 1 kHz	120... 2400 rpm
	10 Hz ... 2 kHz	2400... 4800 rpm
	10 Hz ... 5 kHz	4800... 12000 rpm
	10 Hz ... 10 kHz	> 12000 rpm

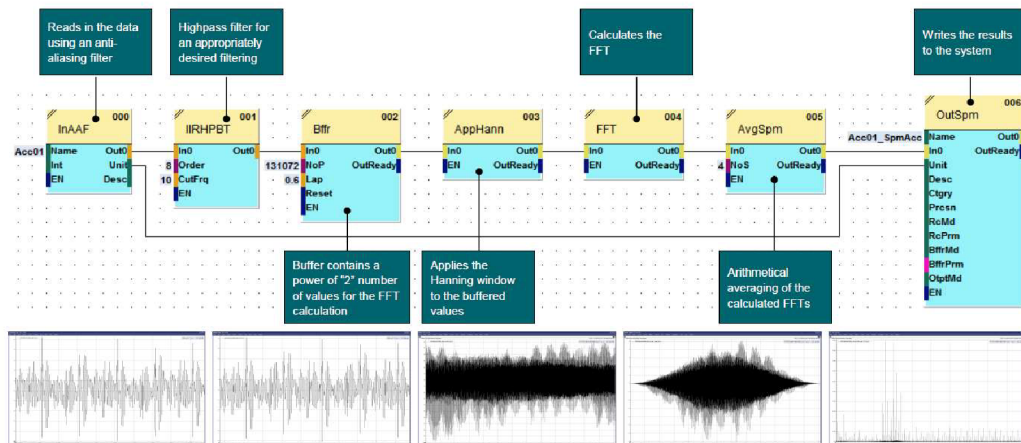
5.3 Software

Společnost Siemens nabízí dvě softwarové možnosti nebo připojení a zpracování dat v jiném softwaru. Mezi vlastní řešení patří Totally Integrated Automation neboli TIA Portál a CMS X-tools. Další možností pro jednoduché úkony je webové rozhraní.

Nejzákladnější funkce nabízí webové rozhraní. Pro možnost používání je potřebné mít počítač připojený pomocí TIA portálu. Následně lze využít vyhodnocení RMS hodnot a DKW v reálném čase při zapnutí aplikace. Dále je možné zde sledovat spektra či trendy. V rámci správného vyhodnocení je možné nastavit specifické poruchové frekvence ložisek, obálka, alarmy či specifikace pro nahrávání dat. Nahrávání dat je možné pustit na různé časové intervaly při sledování aktuálních hodnot. Nahraná data jsou dostupná na uložišti sestavy a přístupná po zadání adresy s přihlašovacími údaji.

Pro rozšířenou práci a offline diagnostiku slouží TIA Portál. Software má širokou základnu využití na různých možnostech společnosti. V rámci této práce je popsána část týkající se PLC a konkrétněji balíčků použitelných pro sledované zadání. Aplikace se dá rozšířit o knihovny vytvořené speciálně pro tuto sestavu jako jsou například SIMATIC STEP 7 nebo SIMATIC WinCC. Pomocí softwaru společně s balíčkem WinCC je vytvořena aplikace na HMI panelu. HMI panel s uživatelským prostředím umožňuje kontrolovat a ovládat zařízení dle naprogramovaných možností, což může zahrnovat například nastavení požadované rychlosti otáčení, kontrolu aktuálních hodnot s jejich vyhodnocením a další. Pro WinCC se jedná o vizualizační část softwaru. Dále je možné využít zmíněného balíčku SIMATIC STEP 7. Pomocí tohoto rozšíření softwaru lze tvořit rozhraní HMI panelu, protože obsahuje základní verzi WinCC. K dalším vlastnostem patří ovládání kontrolérů fyzických i softwarových a jejich programování s tvorbou vlastního modelu a možných simulací. Pro některá nastavení může být program ovládán v reálném čase přímo z TIA portálu místo z panelu [26].

Poslední možností firmy je Condition monitoring systém neboli CMS X-tools. Software je možné propojit s reálným modelem a v tomto případě pomocí daného módu snímat data přímo do softwaru v reálném čase bez nutnosti ukládání po jednotlivých souborech. X-tools je lépe uzpůsoben ke snímání dynamických dat s velkou velikostí. Jeho předností právě zpracování velkých dat z dynamických sestav, a to jak pro analýzu, diagnostiku, vizualizaci, tak pro archivaci. K tvorbě algoritmů slouží grafické prostředí s přednastavenými funkcemi v blocích nebo je možné si některé části vytvořit. V rámci připravených funkcí se volí z velké možnosti parametrů popsanych v manuálu k programu. Tyto funkce poté pracují se souborem dat dříve nahraných nebo je zpracovávají v reálném čase dle daného algoritmu. Výsledek je možné dále prezentovat v reportech, které lze vygenerovat opět přednastavenou funkcí. Při práci online s tímto softwarem je zde část pro tvorbu alarmů. Vytvořený projekt je možné zastřešit uživatelským rozhraním nebo zpracovaná data odesílat na server. Příklad projektu je zobrazen na obrázku 17 [27].



Obrázek 17: Příklad projektu v X-tools, převzato z [27]

6 REÁLNÝ MODEL A SOFTWARE

Experimenty byly realizovány na modelu, který je popsán níže a pro softwarovou část bylo využito webové rozhraní pro sběr dat a následné zpracování bylo vytvořeno v prostředí *Matlab*.

6.1 Popis reálného modelu

Na obrázku 18 je vidět použitý reálný model od firmy Siemens. Pro model bylo použito dvou snímačů zrychlení, ovládacího panelu SIMATIC HMI, řídicího PLC systému SIPLUS CMS 1200 spolu s SIMATIC S7-1200, který je popsán v kapitole 5, a pohonu s měničem SINAMICS V90.



Obrázek 18: Reálný model od firmy Siemens

Pro daný model byly použity IEPE sensory, což jsou piezo-elektrické sensory s integrovanou elektronikou. Sensory je možné použít s kabeláží o maximální délce 30 m. Snímači je napájen napětím 24 V. Konstantní proud je porovnáván s vnitřním rezistorem. Vnitřní krystal vytváří napětí odpovídající zrychlení výchylky vibrací. Snímaná hodnota je modulována a přenášena přes proměnný rezistor. Kabely je veden napájecí proud a měřený signál [24]. Každý použitý sensor je náležitě označen včetně uvedení specifické hodnoty mV/g .

Pro uživatelskou aplikaci byl použit HMI panel, který obsahoval vhodnou aplikaci a dotykový displej. Panel může být použit v různých velikostech s barevným displejem. Uživatelské aplikace jsou tvořeny v TIA portálu s rozšířením WinCC jak bylo zmíněno výše. Panely jsou vybaveny rozhraním pro připojení PLC zařízení, možností připojení PROFINET nebo PROFIBUS. Panel byl použitý díky kompatibilitě se SIMATIC S7-1200 [28].

Poslední část modelu tvořila jednotka SINAMICS V90 zobrazená na obrázku 19. Jednotka je vhodná pro dynamické systémy. Frekvenční měnič lze nastavovat pomocí proměnných parametrů v reálném čase nebo ovládat přes PROFINET jak bylo použito pro reálný model. Pohon byl řešen jako synchronní elektromotor s buzením permanentními magnety. Jednotku je potřeba řídit vhodným kontrolérem [29].



Obrázek 19: SINAMICS V90, převzato z [29]

6.2 Měření na reálném modelu

Měření bylo provedeno s použitím aplikace, která sloužila pouze k zadání rychlosti otáčení a připojení přes webové rozhraní k nahrávání dat. Webové rozhraní bylo dostupné po synchronizaci přes TIA portál. Po zadání adresy, přihlašovacích údajů a nastavení módu měření byly sledovány hodnoty na obrázku 20. Je zde vidět údaj aktuálních hodnot pro ložisko se závadou se senzorem číslo 1, které bylo umístěno na vzdálenější straně od pohonu a pro ložisko (bez poruchy) se senzorem 2. Ložisko se závadou bylo pro účely měření za jiné bez poruchy. Dále je na obrázku vidět rychlost a možnost nahrávání dat. V jiném okně bylo nahrávání zadáno na dobu 30 s. Obrázek 20 je základním zobrazením před samotným spuštěním měření, a proto zde nejsou vidět data měřená v reálném čase s prodlevou potřebnou k jejich výpočtu přímo na PLC sestavě.

Data byla uložena na uložistiště modelu a dostupná přes zadání adresy pro surová data. Z této složky byla dostupná přes FTP server. Server je zajištěn přihlašovacím jménem a heslem, které je potřeba zadat v adrese nebo separátně po vyzvání prohlížeče. Surová data se ukládala ve formátu wav s maximální možnou vzorkovací frekvencí pro oba připojené sensory. Celková data byla měřena ve třech variantách pro případ modelu bez poruchy, s poruchou typu nevyváženost a s poruchou v ložisku. Tyto tři varianty byly dále rozšířeny o měření ve více rychlostech pohonu. Konkrétní použité rychlosti byly 300 RPM, 600 RPM a 900 RPM. Hodnota RPM zde označuje počet otáček za minutu. Pro změnu rychlosti byla použita aplikace na HMI panelu. Po zadání změny

byla nechána časová prodleva na ustálení rychlosti otáčení. Následně bylo spuštěno nahrávání přes webové rozhraní aplikace. Celkově se tedy jednalo o měření pěti souborů pro každou rychlost, což dalo základ pro datový set jednomu stavu reálného modelu. Data byla s definovaným pojmenováním dle názvu reálného modelu, datovou značkou a unikátním číselným označením.

The screenshot shows a web interface titled "Ukazkovy CMS". Under the heading "Actual values", there are three sections:

- Vibration:** A table with columns for "aRMS (m/s²)", "vRMS (mm/s)", "DKW", "aPeak (m/s²)", and "v a e". It contains two rows: "VIB1: Porouchané" and "VIB2: Zdravé". Each row has input fields for the first four columns, all containing "???", and three checkboxes for the last column.
- Rotational speed:** A section with a label "SPEED:" and an input field containing "???" followed by "rpm".
- Record raw data:** A section with a label "Start recording" and a "Start" button.

Obrázek 20: Webové rozhraní aplikace

Model obsahoval dvě ložiska umístěná na koncích hřídele se setrvačником. Ložisko blíže pohonu nebylo měněno a pro všechna měření bylo totožné. V datových souborech bylo pojmenováno jako sensor 2 nebo ve webovém rozhraní jako VIB2: Zdravé. Ložiska pro druhý sensor byla měněna. Ložisko bez poruchy bylo použito od firmy FBJ typ 6004. Tohle ložisko při měření vykazovalo vyšší hlučnost. Ložisko s poruchou vnějšího kroužku bylo použito od firmy FAG typ 6002-C. Přičemž při měření vykazovalo hluk, ale v porovnání s ložiskem bez poruchy nebyl hluk tak výrazný. Tento rozdíl je patrný při spuštění souboru surových dat jako zvukové stopy. Porucha ložiska na vnějším kroužku je vidět na obrázku 21 mezi kuličkami nahoře. Pro obě ložiska byly definovány shodné poruchové frekvence. Tyto poruchové frekvence byly použity z webového rozhraní a přepočítány pro danou rychlost otáčení, která byla zadána na HMI panelu při měření. Pro vadu vnějšího kroužku valivého ložiska byla definována hodnota 3,578 Hz při rychlosti otáčení 60 RPM.



Obrázek 21: Kuličkové ložisko s poruchou

Nevyváženost byla definována jako druhá porucha. Řešena byla přidáním šroubu a podložek na setrvačnick uprostřed reálného modelu. Přidaná váha použitá pro měření dat je zobrazena na obrázku 22. Sestává v konkrétním měřeném případě z jednoho šroubu a dvou podložek. V případě potřeby je setrvačnick opatřen více zavity pro vytvoření různých nevyvážeností s různou velikostí a specifikací.



Obrázek 22: Přidaná nevyváženost pro měření

6.3 Zpracování a vyhodnocení dat v programu Matlab

Následné zpracování surových dat bylo řešeno v prostředí *Matlab*. Pro přehlednost byla vytvořena uživatelská aplikace.

Základní algoritmus

Základní část algoritmu je tvořena částmi pro zavedení surových dat do paměťového prostoru prostředí *Matlab*. Pro další výpočty bylo provedeno rozdělení na výstupy specifické pro každý sensor. Použité dva sensory byly počítány jako separátní matice se stejnou časovou značkou převzatou ze znalosti počtu vzorků a vzorkovací frekvence. Hlavní vyhodnocení bylo tvořeno z dat pro sensor měněného ložiska. V datovém setu se jednalo o sensor číslo 1. Druhý sensor, kde se ložisko během měření neměnilo, nebyl

pro vlastnosti základního algoritmu použít, ale byla vytvořena funkce pro výpočet výsledků tohoto sensoru a jejich následné základní zobrazení pro jasné porovnání s výstupy sensoru 1.

Dále byla externě dodána informace o výběru časového vzorku z celého souboru. Tento krok byl přidán z důvodu velké velikosti surových dat pro záznam celých 30 s. Malá stejně velká okna byla definována jako 5 úseků po 6 s. Tyto úseky byly následně použity v algoritmu jako úsek 1, 2, 3, 4 nebo 5.

Dalším externě dodaným vstupem byla frekvence rychlosti otáčení pohonu, zadaná pomocí rychlosti otáček za minutu jako *RPM*, která byla použita pro měření. Tato rychlost následně ovlivňovala znalosti o chybové frekvenci ložiska a naměřené výsledky.

Pro tvorbu diagnostiky a grafů k ní potřebných byl použit jednoduchý algoritmus pro výpočet RMS hodnoty zrychlení výchylky. Ze zrychlení se dále počítala hodnota *DKW* s pevně nastaveným koeficientem počátečních podmínek rovným 1. Tento koeficient vycházel z doporučení v manuálu Siemens [24]. Vyhodnocení *DKW* nebylo prezentováno v uživatelské aplikaci.

Pro vyhodnocení chyby nevyváženosti byla použita maximální amplituda zrychlení výchylky, která byla následně využita pro další zpracování. K následnému zpracování patřilo vykreslení amplitudy v závislosti na čase. Dále byla z datového setu určena maximální zjištěná amplituda.

Pro vyhodnocení chyb ložiska byl použitý další proces, jehož výstupem byla spektra. Spektra byla vytvořena pomocí FFT algoritmu. Tento algoritmus byl použit z knihoven *Matlab Coder* a *Parallel Computing Toolbox*. FFT algoritmus byl zadaný obecně a softwarová funkce zvolila specifický algoritmus včetně typu okna. Spektrum bylo rovněž zadáno definovanou funkcí pro neznámou dané v časové oblasti. Výstupy byly použity pro vykreslení závislosti amplitudy na frekvenci.

Všechny vypočítané hodnoty byly průběžně ukládány do mezipaměti softwaru, externě ukládány byly pouze grafy nebo hodnoty potřebné pro další zpracování.

Vyhodnocení pomocí neuronové sítě

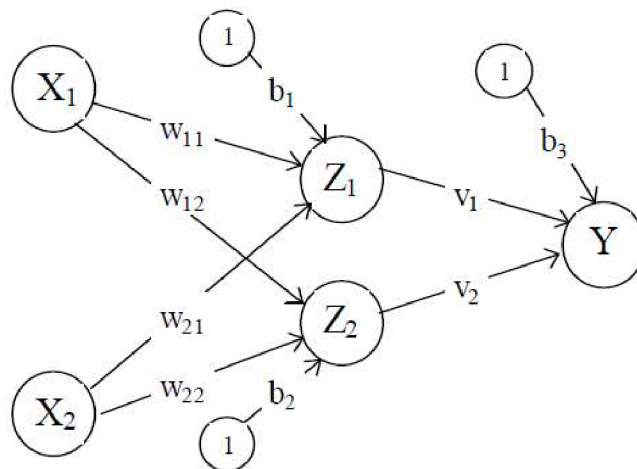
Pro vyhodnocení byla zvolena neuronová síť díky svému častému využití na klasifikační úlohy. Praktická část obsahovala obrazové výstupy, které byly následně použity pro vstupní data pro neuronovou síť. Z důvodu efektivnější optimalizace a velikosti byly použity vytvořené a trénované sítě v prostředí *Matlab*, které jsou dostupné k praktickému použití či jako demonstrativní příklad. Tyto sítě jsou specifikovány jako konvoluční neuronové sítě.

Z důvodu použití neuronové sítě pro klasifikaci problému je zde uveden úvod do problematiky. Zjednodušeně je snaha napodobit chování nervových soustav živých organismů pomocí neuronové sítě, která je naprogramovaná. Je brán ohled na postupné učení, změnu vazeb a tvorbu závěrů. Stejně jako živé organismy jsou i programy závislé na trénovací množině, pomocí které jsou zesíleny nebo oslabeny rozhodovací vazby [30].

Jedním z modelů sloužícím k vysvětlení funkce neuronové sítě slouží perceptron. Při použití perceptronu se jedná o přestup jednotlivých neuronů mezi hladinami. Mezi hladinami dojde k přestupu do vyšší vrstvy při dosažení obvykle prahové hodnoty

v opačném případě poklesne. V programu jsou pro tento princip přiřazovány logické hodnoty. Tyto logické hodnoty jsou použity pro aktivační funkce jako je často uváděná funkce *signum*. Následně je potřebné určit jednotlivé váhy, které ovlivňují spojení mezi vrstvami. Váhy mohou být určeny například dle Hebbova pravidla. Hebbovo pravidlo lze popsat v několika krocích, kdy dochází inicializaci vah a prahových hodnot. Dalším krokem je dodání trénovací množiny, která definuje vstupy a výstupy systému. Následně dochází ke stanovení skutečné odezvy a adaptace na problém společně s úpravou vah ovlivněných faktorem učení a posledním krokem je kontrola dosaženého výsledku s žádaným výsledkem [30].

K dalším modelům patří například *Adaline* či *Madaline*. Model *Adaline*, plným názvem *Adaptive Linear Neuron*, je podobný modelu perceptronu. Obsahuje bipolární aktivaci, regulované váhy a bias, který je definicí vstupní proměnné. Jedná se o další pojetí modelu, které bylo rozšířeno na model *Madaline*. *Madaline* je plným názvem *Many Adaptive Linear Neurons*. Z názvu se jedná o rozšíření základního modelu o více neuronů. V tomto modelu už se předpokládá přítomnost skrytých neuronů, které jsou rovněž průběžně vyhodnocovány a průběžně propojeny v rámci jednotlivých vrstev. Tento model stejně jako perceptron v rámci algoritmu upravuje jednotlivé váhy dle shody či neshody mezi skutečným výstupem a výstupem definovaným trénovací množinou. Pro model se skrytými vrstvami se jedná o postupnou úpravu všech vah mezi jednotlivými vrstvami a biasu [31].

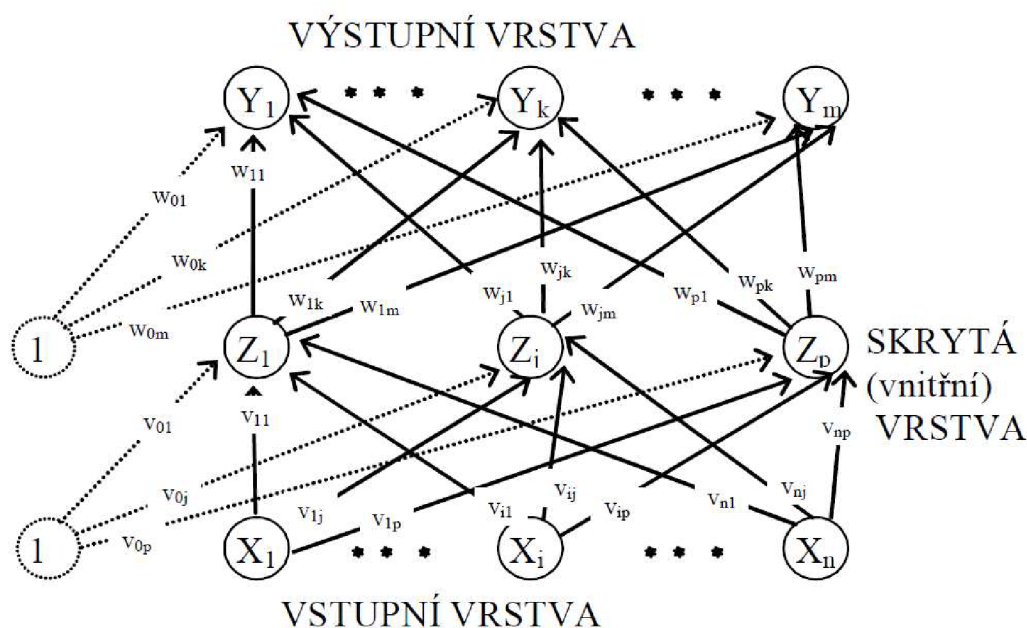


Obrázek 23: Schéma modelu Madaline, převzato z [31]

Zmíněné modely jsou definovány pro jednoduchost. Jejich struktura neumožňuje zpracování a klasifikaci těžkých obrazců. Pro uvedení příkladu jednovrstvé sítě typu perceptron se jedná lineární funkce neschopné řešit matematickou operaci XOR. Problém XOR je možný řešit od sítě s dvěma vrstvami, tato síť, ale není dostatečná pro obtékání oblastí. Na složitější případy je potřebné používat vícevrstvé sítě [31].

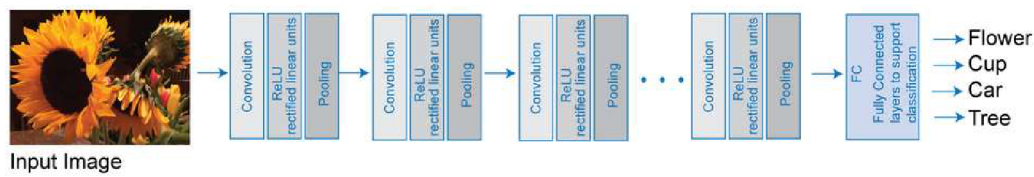
Další možností jsou sítě s pravidlem *Backpropagation*. Jedná se o vícevrstvé sítě s častou aktivační funkcí *signum*. Jedná se o rozložení v minimálně třech vrstvách, kdy

je vždy jedna vrstva vstupní, jedna výstupní a alespoň jedna vrstva skrytá. Neurony jsou mezi jednotlivými vrstvami propojeny, a to všechny neurony v nižší vrstvě se všemi neurony vrstvy vyšší. Tohle propojení může být v praktických příkladech problémem týkající se topologie. Topologie je zde složitá z důvodu omezené znalosti vztahů mezi vstupem a výstupem. Učící algoritmus je za tyto vztahy odpovědný, ale je potřebné konkrétní architekturu upravovat dle složitosti problému a rozsáhlosti trénovací množiny. Nakonec je vše kontrolováno pomocí testovací množiny, kde je zjištěna přesnost dané sítě [31].



Obrázek 24: Schéma sítě s jednou skrytou vrstvou, převzato z [31]

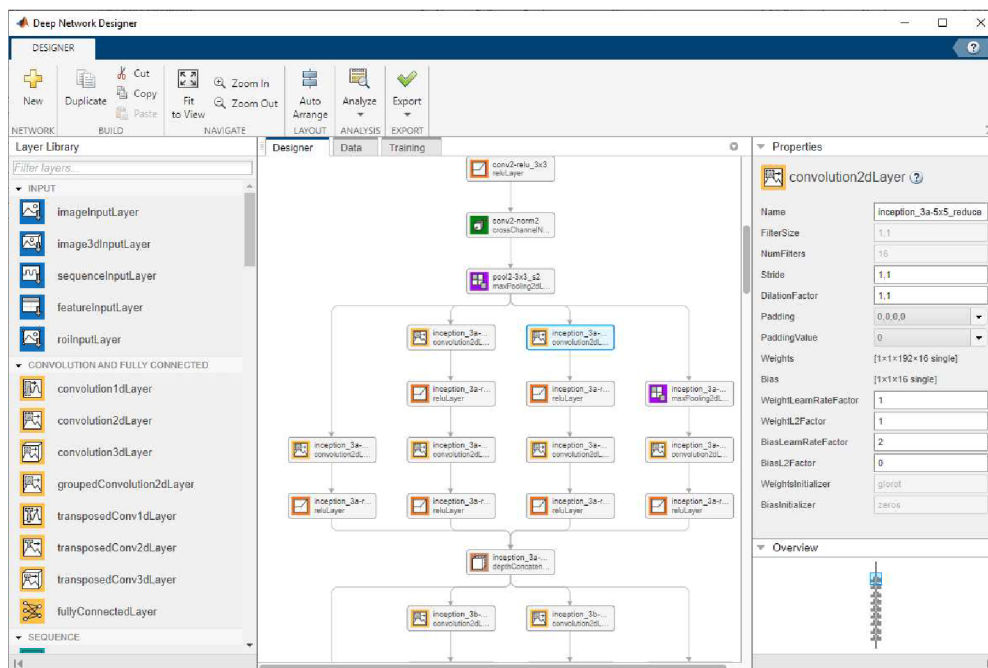
Možných modelů je více. Posledním uvedeným je model konvoluční neuronové sítě z důvodu jejího využití v tomto problému. Tato síť je specifická pro své procesní vrstvy. Celou síť lze tedy brát jako ucelený algoritmus, kdy se vstup rozdělí do menších částí nebo se pouze upravuje obraz samotný pomocí funkčních vrstev zajišťující filtraci obrazu, následně může probíhat konvoluce tohoto obrazu. Po konvoluci následuje další vrstva zajišťující aktivační funkci, kde může být použita pro *Matlab* často zmiňovaná *ReLU*. Následuje vrstva zvaná obvykle jako *pooling*, která je odpovědná za podvzorkování dle specificky zadaného pravidla pro průměrnou nebo maximální hodnotu vyhodnocovaného regionu dat. Tento proces se může v síti obecně opakovat. Následně jsou výstupy všech částí spojeny, aby vytvořily základ pro finální klasifikaci. Klasifikace je tvořena další vrstvou s aktivační funkcí a samotnou klasifikací do jednotlivých tříd pomocí pravděpodobnosti. Jako příklad pravděpodobnostní funkce může být v *Matlabu* využívána funkce *softmax*. Za touto vrstvou už je výstup definovaný třídou a její pravděpodobností [29].



Obrázek 25: Schéma konvoluční neuronové sítě, převzato z [29]

Ze zmíněného popisu vyplývá, že síť je závislá na datovém setu použitým pro trénování a testování praktického problému. Pro reálný model byla podstatná tvorba datového setu z předešlých naměřených a zpracovaných dat. Některá naměřená data neodpovídala svým obsahem pro daný set, neboť byla vyhodnocena jako chybná. Tato chyba se projevovala digitálním šumem. Chyba šla dále zjistit při spuštění zvukového záznamu jako tichá část bez zvukové stopy. Datové sety byly rozřazeny do tříd dle poruchového stavu a zároveň byly vytvořeny dva sety. Jeden set obsahoval tříděná data pro vyhodnocení aRMS a druhý tříděná data pro vyhodnocení spektra. Tyto datové sety byly pro správné použití neuronovou sítí upraveny pomocí balíčku *Image Processing Toolbox*, který nabízí přednastavené funkce pro úpravu obrazového materiálu. Práce zde využila funkcionalitu pro úpravu velikosti vstupních dat sítě.

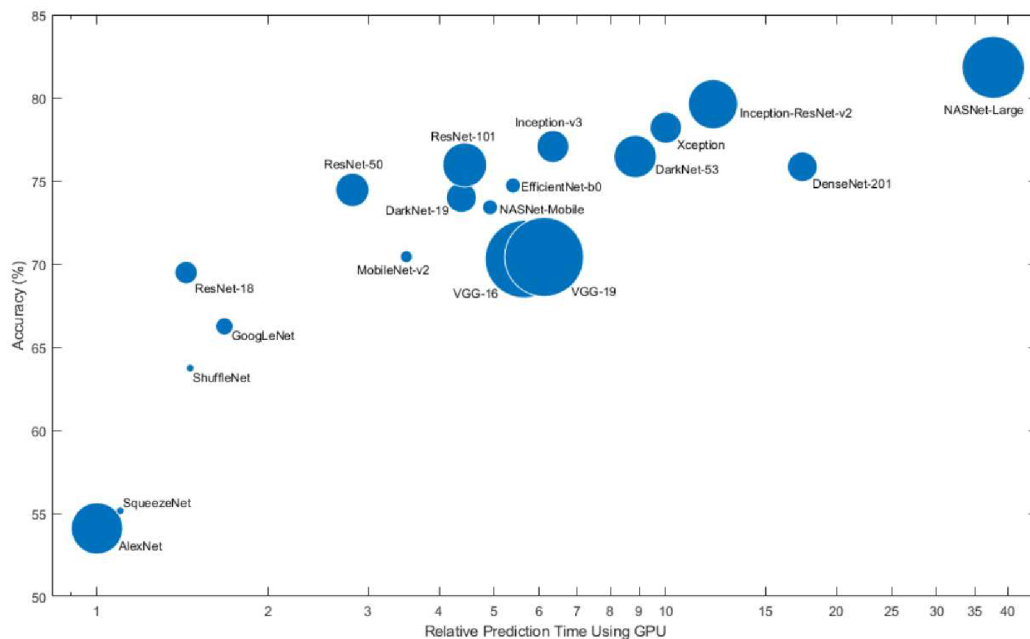
Testovány byly dvě sítě z nabídky *Matlab*. Sítě byly pomocí *Deep Learning toolboxu* spolu s uživatelskou aplikací na úpravu a trénování sítě *Deep Network Designer* přeučeny na dané datové sety [29]. Během přípravy na přeučení byly neuronové sítě upraveny na straně výstupu pro správnou velikost klasifikátoru. Původní použití bylo pro klasifikaci do 1000 tříd různých předmětů z volně dostupného datového setu. Tyto poslední vrstvy byly změněny na 3 klasifikované třídy.



Obrázek 26: Aplikace Deep Network Designer, převzato z [29]

V aplikaci od *Matlabu* je možné upravovat jednotlivé sítě jako možnost tvorby nových po jednotlivých vrstvách v aplikaci nebo pomocí příkazů s definicí počtu neuronů v dané vrstvě. Při tvorbě i úpravě je potřebné klást váhu na strukturu danou jednotlivými vrstvami nebo větvením sítě.

Jak bylo zmíněno u datových setů, tak síť byla použita na dva separátní problémy. Prvním problémem byla obrazová data grafů pro hodnoty aRMS, druhý problém byl odlišný pouze ve zdroji, což byla spektra. Po testování a k prezentování dvou různých trénovaných sítí byla použita pro úkol aRMS jiná síť než pro spektra. Porovnání sítí je prezentováno v grafu pro rychlost a přesnost sítí na obrázku 23.



Obrázek 27: Srovnání předtrénovaných sítí, převzato z [29]

První testovanou sítí byla síť *AlexNet*. Síť byla vybrána pro jednoduchost a rychlé dosažení výsledků. Jedná se o přímou sekvenci funkčních bloků, které tvoří jednotlivé vrstvy, jdoucích za sebou bez větvení či zpětné vazby. Pro tento model byly upraveny 3 poslední vrstvy pro správnou definici testovaných stavů, které byly použity jako třídy, a to stav bez poruchy, porucha typu nevyváženost a porucha ložiska (v konkrétním trénovaném případě pouze chyba vnějšího kroužku). Jiné stavy nebyly testovány pro vstupní data a nemohli být tvořeny další třídy ani datové sety.

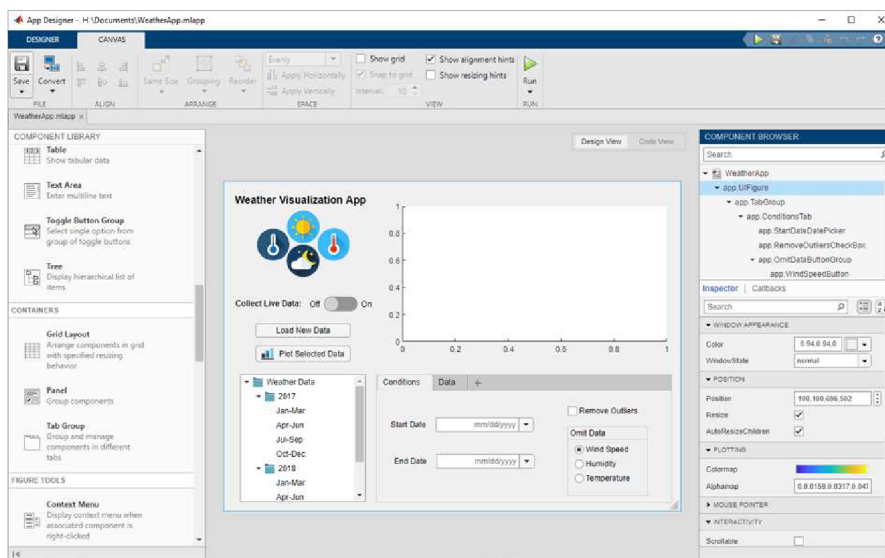
Druhou testovanou byla neuronová síť *GoogLeNet*, která byla vybrána pro svou lepší přesnost, ale větší náročnost na čas společně s jinou velikostí vstupních dat. Síť je rozsáhlejší, více větvená než předchozí zmíněná síť. Upravena byla stejně jako síť *AlexNet*.

AlexNet byla použita pro problematiku spektra a *GoogLeNet* pro rozlišení aRMS. Při zobrazení výsledků nebo při použití jednotlivých částí celkové aplikace je možné měřit čas potřebný ke klasifikaci.

Po natrénování byly uloženy upravené verze neuronových sítí, které byly načteny do skriptu spolu s řešenými obrázky. Obrázky byly po výpočtu dle zadání zmenšeny a nechány na klasifikaci. Při testování byla výstupem skriptu kromě třídy i přesnost s jakou ji neuronová síť určila.

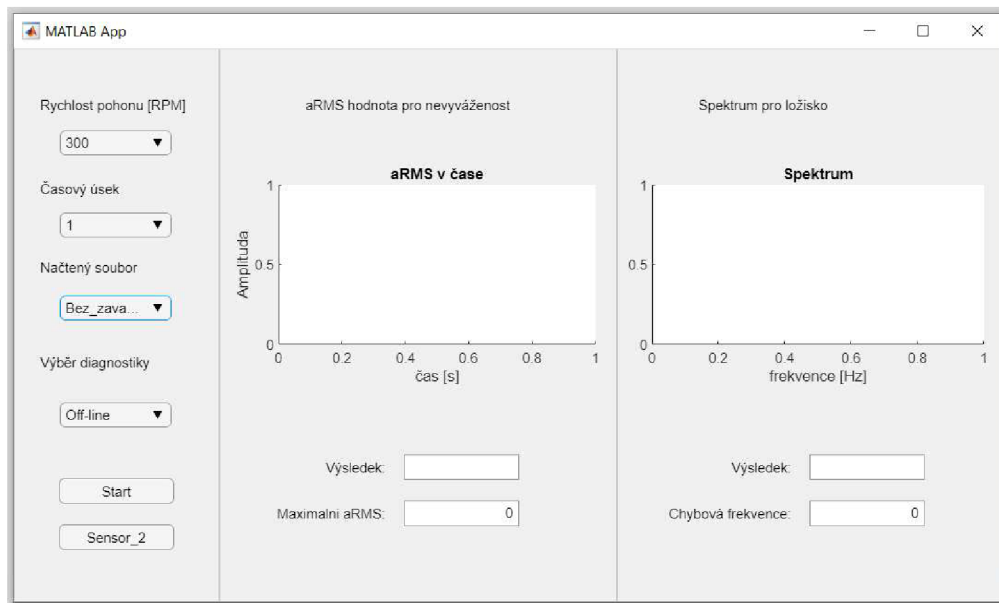
Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bylo vytvořené pomocí *Matlab* aplikace *App designer*. Jedná se o tvorbu GUI neboli uživatelského rozhraní pomocí automaticky generovaného kódu s možností zadávání vstupů uživatelem a následné vykreslování výstupů do grafu nebo jiného formátu.



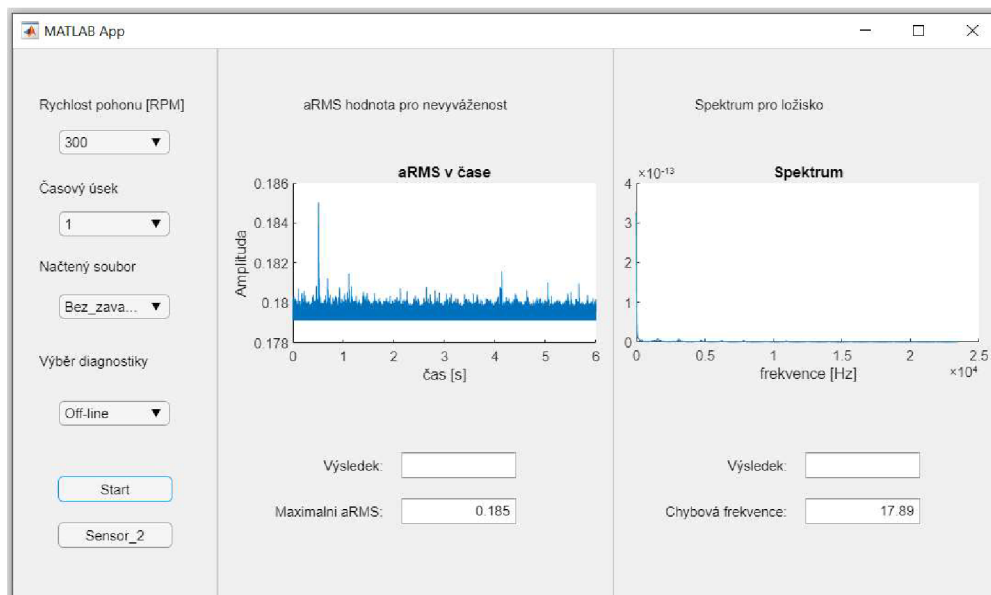
Obrázek 28: Aplikace App Designer, převzato z [29]

Obecné rozložení bylo vytvořeno v rámci 3 panelů. Levý panel byl použit jako interaktivní k zadání potřebných informací ke zpracování diagnostiky. Mezi tyto parametry patří volba rychlosti pohonu ve třech variantách, a to 300, 600 nebo 900 *RPM*, volba zobrazeného časového úseku. Časový úsek byl volen z pěti stejně dlouhých úseků z jednoho celkového souboru naměřeného během testování. Tento časový úsek byl volen pro 3 možné varianty, které lze do aplikace načíst. Tyto varianty byly definovány z dat pro měření, jako stav bez poruchy, porucha ložiska nebo porucha nevyváhy. Pro možnost testování dat offline bez připojení k FTP serveru byla aplikace upravena o načítání dat z definovaného výběru souborů na disku. Posledním parametrem byl výběr diagnostiky. Pro offline diagnostiku byl definován algoritmus se zobrazením výstupů v grafech bez závěru, který zůstal na uživateli. Druhá možnost znamenala celé vyhodnocení včetně závěru, kde byla nalezena chyba. Popsané uživatelské rozhraní je vidět níže na obrázku 29. Dále se v uživatelském rozhraní využila dvě tlačítka. První z nich slouží k diagnostice senzoru 1 dle zadaných specifik. Druhé slouží k diagnostice senzoru číslo 2 a to pouze pro tvorbu a vykreslení *aRMS* hodnot a spektra. Zobrazení vyhodnocení nebylo zahrnuto v uživatelské aplikaci, ale jako nová okna pro grafy.



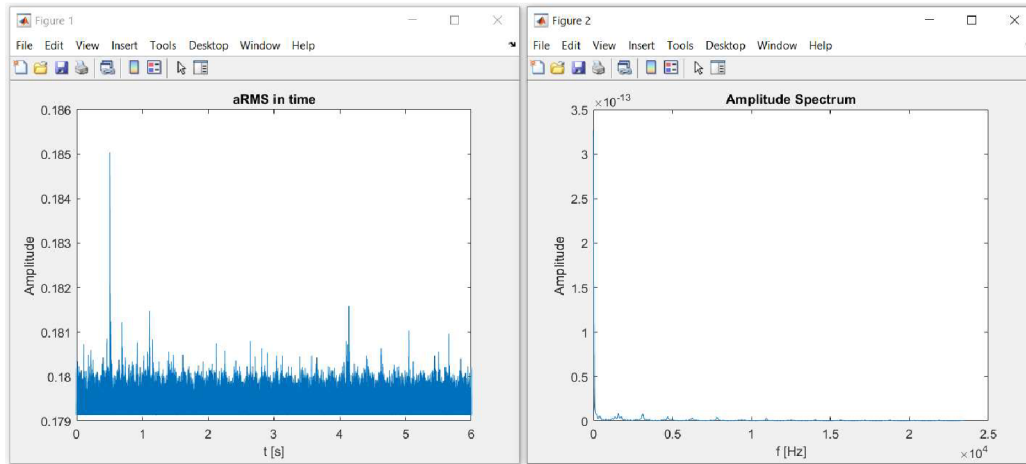
Obrázek 29: Uživatelské rozhraní před výběrem zadání

Na obrázku 30 je vidět výstup pro diagnostiku bez závěru. Kromě grafů je zde zobrazena i maximální hodnota pro aRMS v daném úseku a chybová frekvence dána z rychlosti RMS a koeficientu, který byl stanoven ve webové aplikaci Siemens. Tento krok byl vytvořen k možnosti porovnání s jinou diagnostikou v kratším čase a výpočetní náročností. Grafické zobrazení hodnot v aplikaci je interaktivní. Uživatel může pro grafy využít předvolené funkce *Matlab* na lepší orientaci a zobrazení detailů.



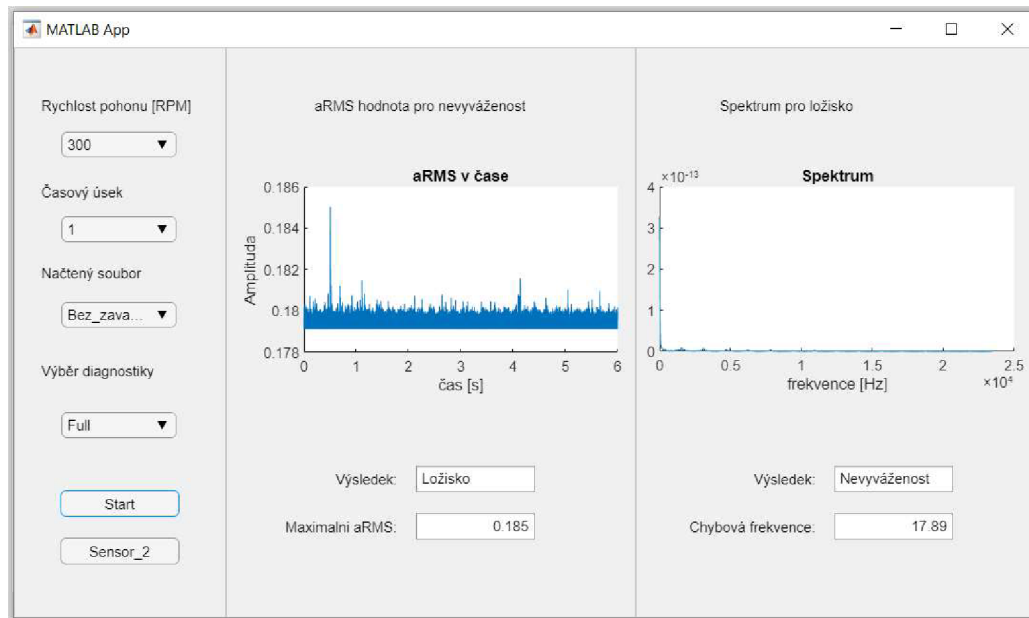
Obrázek 30: Uživatelská aplikace s výběrem Off-line verze

Na obrázku 31 jsou výstupy, které se zobrazí pro sensor 2. Grafy pro druhý sensor jsou rovněž interaktivní a je možné je přes menu okna grafu uložit v různých formátech. Součástí vyhodnocení zůstává i okno uživatelské aplikace, které se nezmění při výpočtu pro sensor 2.



Obrázek 31: Výstup pro sensor 2

Na obrázku 32 je zobrazeno vyhodnocení včetně závěru neuronových sítí. Zde je uvedena pouze třída označující predikovanou závadu systému. Dle zadání v okně uživatelské aplikace je možná kontrola výsledků.



Obrázek 32: Uživatelská aplikace se závěry neuronových sítí

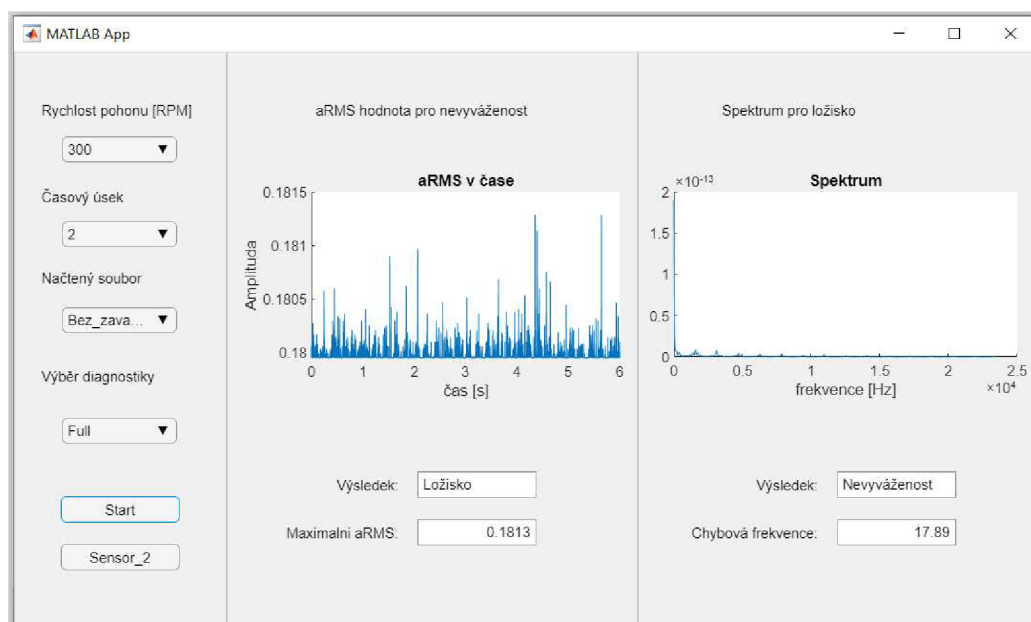
6.4 Testování uživatelské aplikace

Pro testování aplikace byly použity vybrané soubory z celkového naměřeného setu. Jednalo se o předem definované skupiny souborů s vadou danou při měření. Výsledek zhodnocení aplikace se tedy porovnával s reálným nastavením modelu.

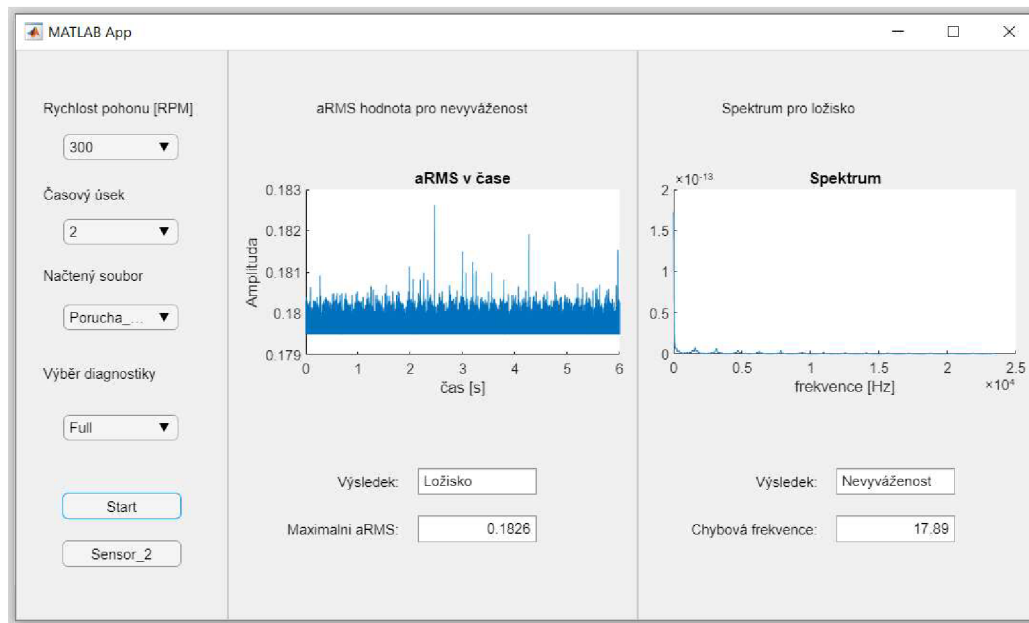
První pokus využíval pro oba problémy síť *AlexNet*. Síť byla trénována a uložena zvlášť pro každý problém. Pro tuto síť bylo dosaženo v obou případech nejlepší přesnosti 34 %. Trvání samotné klasifikace trvalo při měření času pomocí *Matlab* příkazů v rozmezí 6 až 9 sekund. Tento časový údaj může být ovlivněn dostupným výpočetním výkonem použité jednotky.

Pokus pro použití *GoogLeNet* bylo řešeno aRMS, které bylo testováno se stejnými soubory jako předchozí síť. Tato síť dosahovala přesnosti necelých 36 %. Trvání klasifikace bylo v rozmezí 9,5 až 11 sekund.

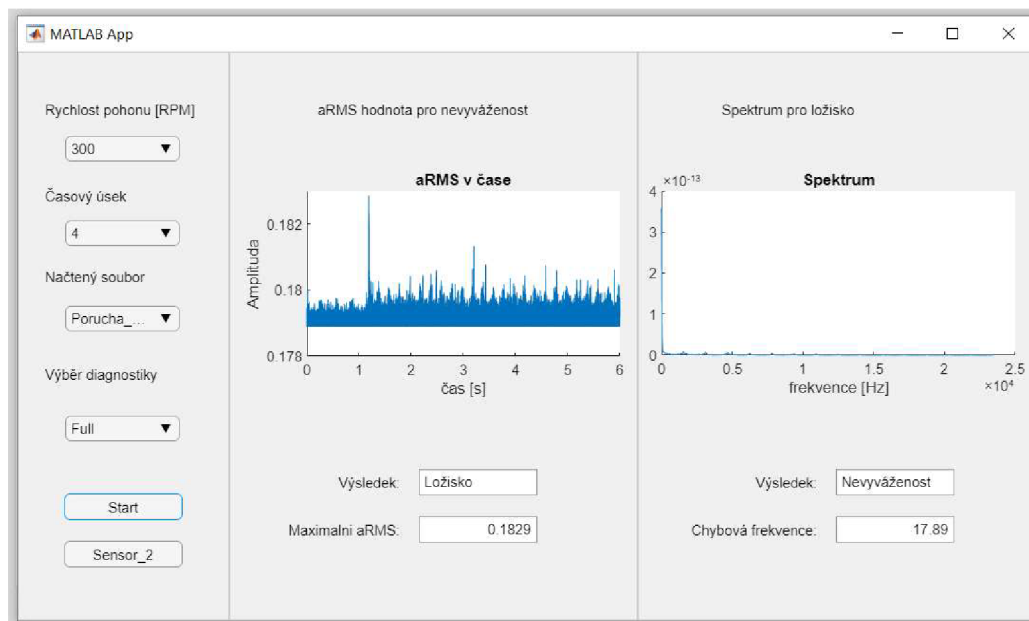
Následně proběhlo testování souborů vad zobrazených na obrázcích níže.



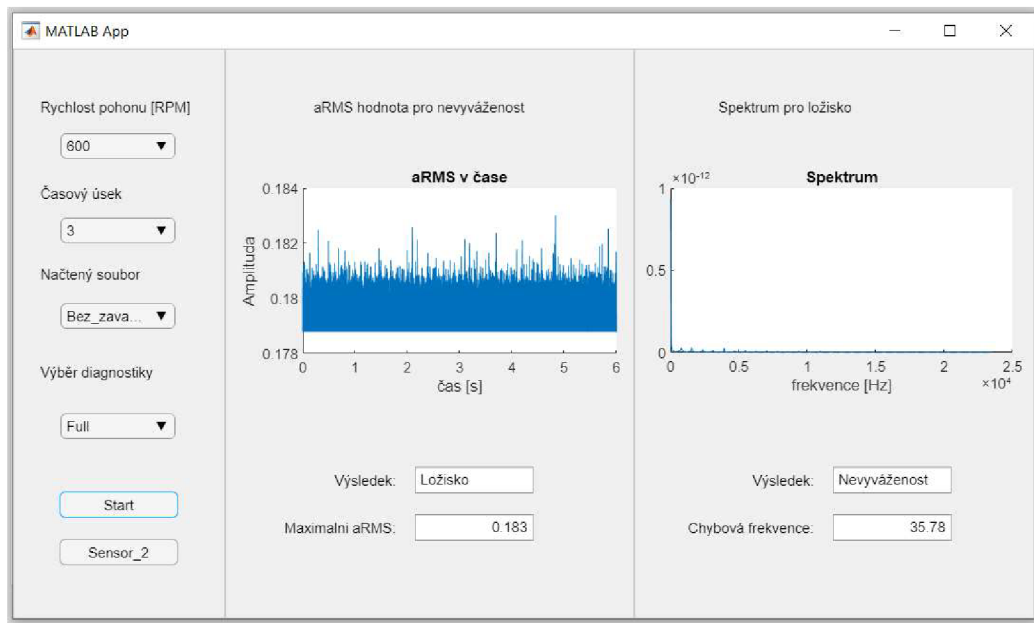
Obrázek 33: Nastavení modelu bez závad s rychlostí 300 RPM



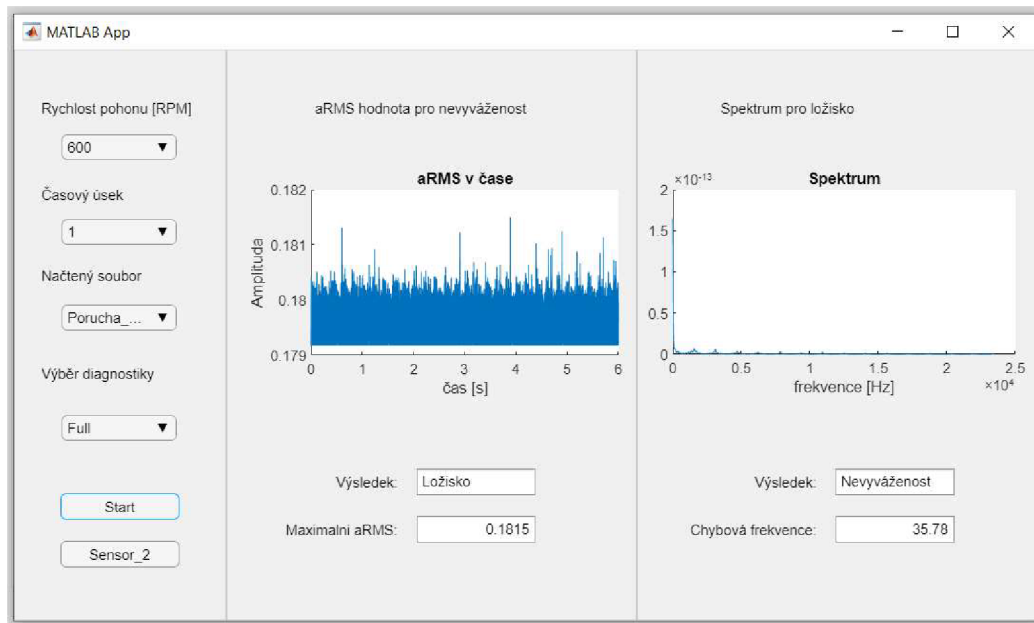
Obrázek 34: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 300 RPM



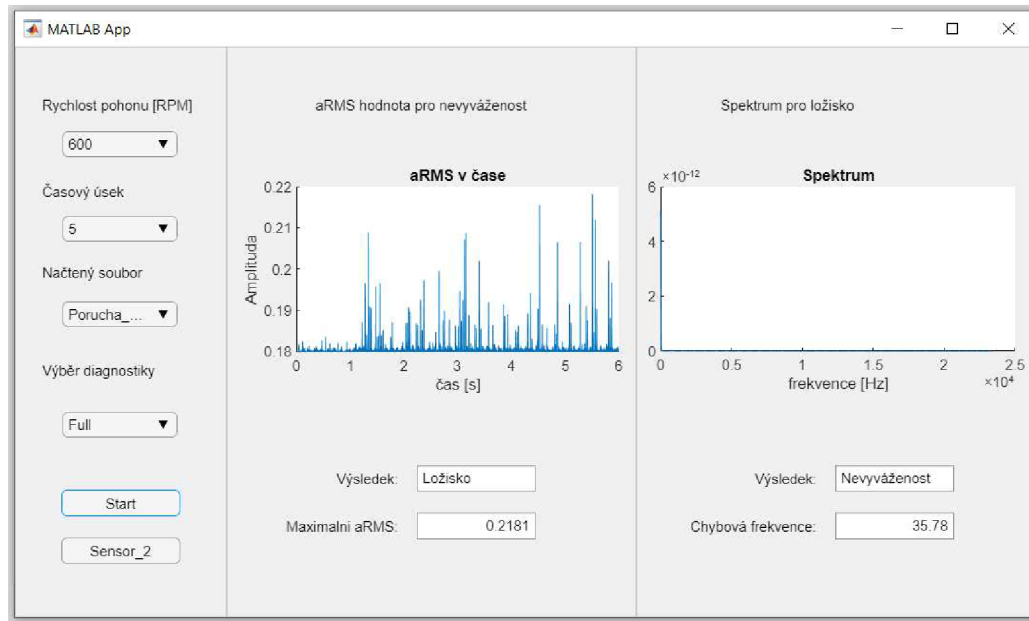
Obrázek 35: Nastavení modelu s poruchou ložiska s rychlostí 300 RPM



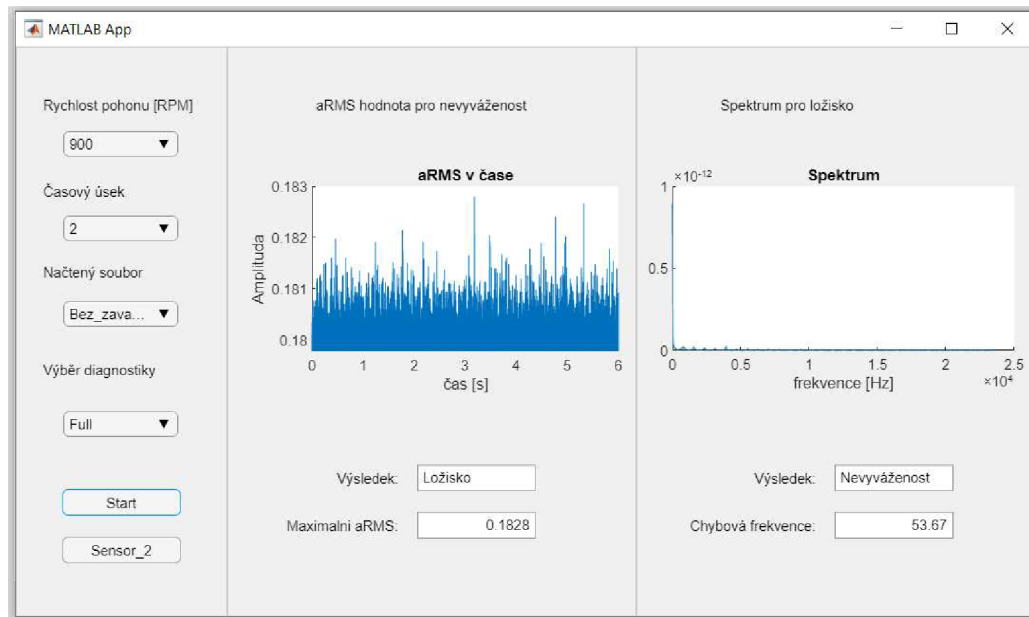
Obrázek 36: Nastavení modelu bez poruchy s rychlostí 600 RPM



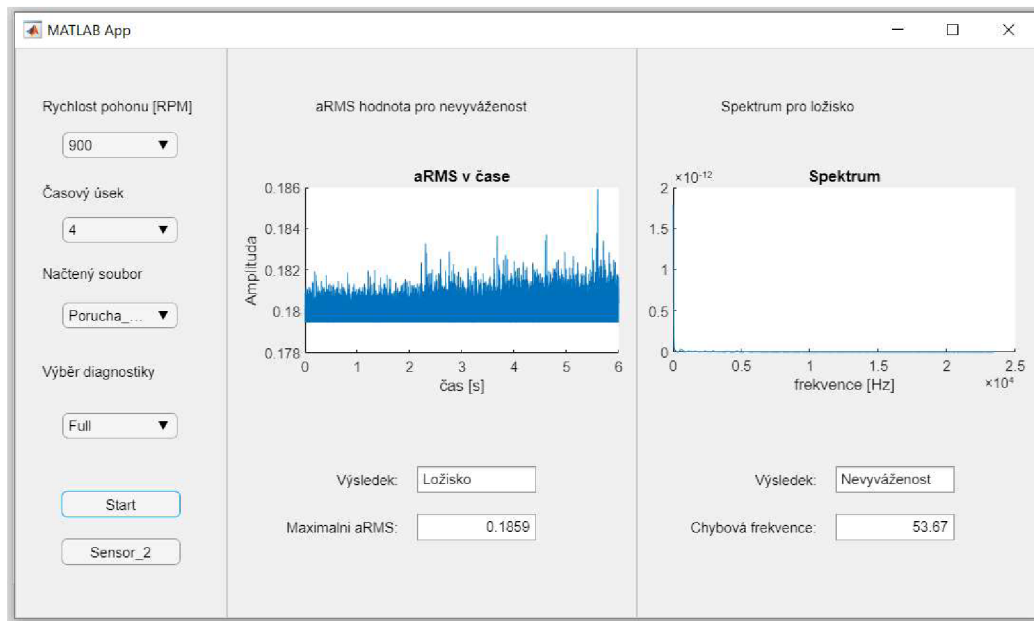
Obrázek 37: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 600 RPM



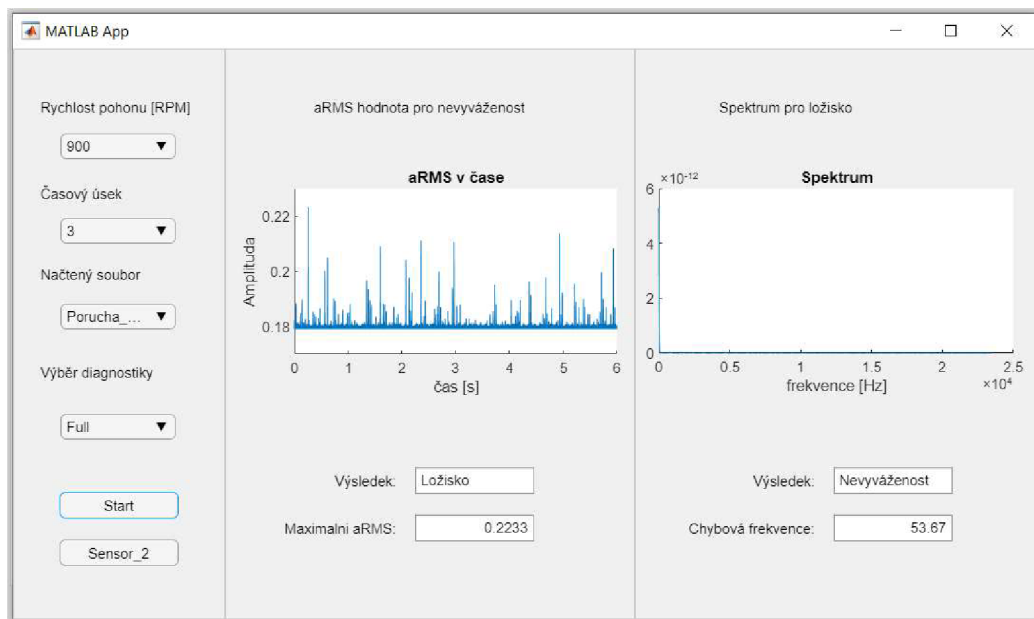
Obrázek 38: Nastavení modelu s poruchou ložiska s rychlostí 600 RPM



Obrázek 39: Nastavení modelu bez poruchy s rychlostí 900 RPM



Obrázek 40: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 900 RPM



Obrázek 41: Nastavení modelu s poruchou ložiska při rychlosti 900 RPM

6.5 Zhodnocení dosažených výsledků

Během testování byly zjištěny nedostatky aplikace závislé na předzpracování trénovací množiny, získaných datech a reálném modelu.

Nedostatky týkající se reálného modelu spočívaly v nedokonalém záznamu nahrávaných dat. U některých souborů došlo k záznamu pouze digitálního šumu, jak bylo

zminěno výše v části měření. Tato data byla vytržena z dalšího zpracování během přípravy datových setů pro neuronové sítě.

Samotné neuronové sítě neprokázaly vysokou přesnost v klasifikaci výsledků do tří tříd. Může se jednat o případ nedostatečného setu obrazového materiálu. Dále zde nebyla použita úprava grafů ze základního algoritmu pomocí ořezu či zvýraznění podstatných částí. Následná úprava grafů by mohla pomoci ve vyšší rozlišitelnosti jednotlivých tříd. V této práci těchto úprav nebylo použito z důvodu podobnosti výstupů pro jednotlivé třídy.

Výstupy základního algoritmu byly pro potřeby trénování pouze zmenšeny na žádanou velikost dle definice použité sítě. Byly proto vytvořeny různé datové sady podle definice neuronové sítě a řešeného problému. V tomto případě se využilo otestování dvou neuronových sítí. Výsledný rozdíl v přesnosti činí 2 %, což při zanedbatelném časovém rozdílu vychází ve prospěch složitější neuronové sítě *GoogLeNet*. V této práci má síť daleko menší přesnost, než které je dosaženo pro původní použití při klasifikaci do 1000 tříd. Tento rozdíl plyne z velikosti a typu trénovací a testovací množiny.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala uvedením teorie potřebné k diagnostice točivých strojů s důrazem na problematiku řešenou s reálným modelem. V rámci teorie byl popsán potřebný rozsah pojmů a zároveň úvod do matematických operací potřebných pro úpravu signálů získaných v čase. Pro diagnostiku byly použity části týkající se vibračního pohybu a zařízení potřebná pro získání těchto dat. Další část popisovala matematické úpravy a jejich výstupy. Výstupy byly popsány a přiřazeny dle specifik k jednotlivým poruchám řešených u točivých strojů. Pro praktickou část byly důležité poruchy vytvořené nevyvážeností měřené sestavy a poruchy ložisek.

Poruchy nevyváženosti byly definovány teoreticky a zároveň byl popsán charakteristický rys potřebný pro nalezení této poruchy v datech. Ložiska byla definována pro více typů k lepší přehlednosti možných výsledků. Pro praktickou část byla hlavní část týkající se valivých ložisek s konkrétní vadou vnějšího kroužku.

Diplomová práce se dále zabývala porovnáním jednotlivých řešení nabízených na trhu. Tyto výsledky byly porovnány pro online diagnostiku s popisem hlavních funkcí daného řešení zahrnujících využívaný hardware i software. Mezi porovnávanými možnostmi byla pro praktickou část této práce vybrána monitorovací sestava společnosti Siemens. Produkty od firmy Siemens byly popsány v samostatné kapitole z důvodu větší obsáhlosti a přehlednosti.

Sestava byla zapůjčena jako reálný model. Model byl složen ze snímačů zrychlení, ovládacího panelu SIMATIC HMI, pohonu s měničem SINAMICS V90, řídicího PLC systému SIPLUS CMS 1200 popsaného v samostatné kapitole. Dále reálný model využíval dvě valivá ložiska, hřídel a setrvačnick. Valivá ložiska bylo možné měnit a pro práci byla naměřena dvě různá ložiska, která v jednom případě specifikovala chování bez závad a ve druhém závadu vnějšího kroužku. Ložisko umístění na straně pohonu nebylo měněno. Setrvačnick sloužil k tvorbě nevyváženosti na modelu. Data s nevyvážeností byla zaznamenána pouze v kombinaci se správným ložiskem.

Získání dat bylo možné za použití ovládacího panelu pro nastavení požadované rychlosti otáčení a webového rozhraní modelu. V rozhraní bylo možné použít nahrávání dat po definovaném časovém úseku zadaném v rozhraní se vzorkovací frekvencí danou PLC zařízením. Data byla v jednom souboru snímána pro oba senzory. Data ze sensorů byla pro přehlednost pojmenována jako sensor 1 a sensor 2. Sensor 1 zaznamenával zrychlení výchylky vibrací nad ložiskem, které bylo možné měnit a sensor 2 obsahoval stejný typ dat pro druhé ložisko, které zůstávalo pro všechna měření stejné.

Data byla naměřena pro 3 stavy systému ve více zadaných otáčkách a větším množstvím. Datové soubory byly zpracovávány v softwaru *Matlab*. V softwaru *Matlab* byl vytvořen algoritmus pro zpracování dat do grafů spektra a výpočet specifických hodnot jako je a_{RMS} a DKW . Zároveň byly data použity pro tvorbu datových setů pro následné zpracování neuronovou sítí.

Základní data pro oba sensory byla v algoritmu řešena separátně. Výstupy byly graficky znázorněny v závislosti na čase nebo frekvenci. Následně byly grafy uloženy v potřebném formátu a tříděny dle specifikace měření do skupin pro tvorbu setů. Sety byly základem pro definici jednotlivých tříd.

Pro vyhodnocení bez zásahu uživatele byly použity konvoluční neuronové sítě. Vstupem těchto sítí byl obrázek s danou velikostí a výstupem klasifikace do třídy. Dalším možným výstupem je přesnost řešení. Pro praktickou část byly ke srovnání použity dvě konvoluční neuronové sítě, které jsou vytvořené a dostupné pro využití v prostředí Matlab. Sítě bylo potřebné upravit na definovaný výstup do 3 tříd. Následně se sítě trénovaly na vytvořených setech z měření.

Pro vyhodnocení aRMS hodnot v čase byla použita větší síť *GoogLeNet*. Tato síť vykazovala vyšší výpočetní náročnost a lepší schopnost naučení se na danou problematiku. Pro vyhodnocení spektra byla použita síť *AlexNet*. Síť je svou strukturou jednodušší než předchozí a je méně náročná na čas zpracování výsledků. Nedosahuje však takové přesnosti.

Algoritmy a trénované neuronové sítě byly zahrnuty do uživatelské aplikace, která umožňuje zadání specifického výpočtu. V prezentované verzi nebyl počítač spojen s FTP serverem a soubory je tedy možné vybrat dle měřené poruchy. K další specifické možnosti patří určení vyhodnocovaného časového úseku, určení rychlosti otáčení při měření, stanovení vyhodnocení s výstupem nebo bez výstupu neuronových sítí a v posledním případě možnost grafického zobrazení pro druhý sensor pro stejný soubor, rychlost a časový úsek. Druhý sensor nebyl vstupem pro neuronové sítě.

Při tvorbě a následném trénování neuronových sítí byla nalezena podobnost výstupů pro jednotlivé třídy, která způsobovala menší přesnost sítí. Datové sety nebyly dostatečně rozsáhlé a různorodé pro obrazový vstup sítí. Nižší odlišnost spolu s projevem hluku při měření mohla vést k horším výsledkům a menší možnosti správného učení sítí. Dalším výstupem při zhodnocení bylo nalezení datových souborů s chybným záznamem hodnot signálů pro měřené sensory. Tyto chybné soubory zmenšily množství dat v setech.

V praktické části této práce bylo využito klasifikace pomocí neuronových sítí pro vibrační signály. Pro tyto časové signály použité jako obrazový materiál nebyly neuronové sítě zhodnoceny jako vhodné z důvodů malého rozsahu datového setu a podobnosti mezi jednotlivými stavy. Podobnost mezi stavy tvořila špatnou rozlišitelnost ovlivňující učící proces.

V další práci by bylo možnou úpravou přidání algoritmu, který by kontroloval správnost měřených dat a k dalšímu vyhodnocení používal pouze soubory bez těchto závad. V praktické části se jednalo o data vyplněná digitálním šumem bez vlastních hodnot sensorů.

Další možnou úpravou by byla změna vstupu neuronových sítí na datové soubory specifikované v čase nebo změna vstupních obrázků pomocí přidání dalších úprav pro lepší zvýraznění hledaných atributů a jejich normalizaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAMMER, Miloš. *Význam technické diagnostiky, sensoriky a měření - základní pojmy a terminologie* [přednáška]. Brno: VUT v Brně, 29. 10. 2021.
- [2] HAMMER, Miloš. *Technická diagnostika, současné trendy v technické diagnostiky* [přednáška]. Brno: VUT v Brně, 5. 11. 2021.
- [3] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [4] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [5] TOMEH, Elias. *Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-174-0.
- [6] *Slovo úvodem, význam a cíle* [online]. ATD ČR, z.s., 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.atdcr.cz/web/structure/47.html>
- [7] *A3716 – on-line monitorovací systém* [online]. Adash, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/online-merici-systemy/a3716>
- [8] *A3800 – on-line monitorovací systém* [online]. Adash, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/online-merici-systemy/a3800>
- [9] *A3900* [online]. Adash, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/online-merici-systemy/a3900-II>
- [10] *SKF Axios* [online]. SKF [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems/wireless/axios>
- [11] *SKF Enlight Collect IMx-1* [online]. SKF [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems/wireless/enlight-collect-imx-1>
- [12] *Software* [online]. SKF [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/software>
- [13] *Multilog on-line systems IMx-8 and IMx-16Plus* [online]. SKF [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems/on-line-monitoring/imx>
- [14] *Fluke 3563 Analysis Vibration Sensor* [online]. Fluke Deutschland GmbH, 2020 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.pruftechnik.com/com/Products-and-Services/Condition-Monitoring-Systems/Online-Condition-Monitoring/Online-Condition-Monitoring-Systems/Fluke-3563-Analysis-Vibration-Sensors/>
- [15] *VIBGUARD IIoT* [online]. Fluke Deutschland GmbH, 2020 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.pruftechnik.com/com/Products-and-Services/Condition-Monitoring-Systems/Online-Condition-Monitoring/Online-Condition-Monitoring-Systems/VIBGUARD-IIoT/>

- [16] *VIBGUARD compact* [online]. Fluke Deutschland GmbH, 2020 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.pruftechnik.com/com/Products-and-Services/Condition-Monitoring-Systems/Online-Condition-Monitoring/Online-Condition-Monitoring-Systems/VIBGUARD-compact/>
- [17] *On-line vibrodiagnostika* [online]. clickmedia [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://www.lamikappa.cz/on-line-vibrodiagnostika/>
- [18] *Monitorování stavu - online monitorováním technického stavu prostřednictvím průmyslové sběrnice* [online]. ifm electronic gmbh, 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/shared/productnews/2017/sps/online-monitorovanim-technickeho-stavu-prost%C5%99ednictvim-pr%C5%AFmyslove-sb%C4%9Bnice>
- [19] *Vibrodiagnostika – přenosné analyzátory* [online]. Trilobite Technologies, s.r.o., 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.profess.cz/cs/mms/produkty/vibrodiagnostika/prenosne-analyzatory>
- [20] *Vibrodiagnostika – online systémy* [online]. Trilobite Technologies, s.r.o., 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.profess.cz/cs/mms/produkty/vibrodiagnostika/online-systemy>
- [21] *Systémy – střežení vibrací a posuvů Emerson* [online]. Trilobite Technologies, s.r.o., 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.profess.cz/cs/mms/produkty/systemy/strezeni-vibraci-a-posuvu-emerson>
- [22] *ABB smart sensor* [online]. ABB, 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://new.abb.com/motors-generators/cs/servis-motoru/pokrocile-sluzby/abb-smart-sensor>
- [23] *PLC Automation* [online]. ABB, 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/plc>
- [24] *Manual SIMATIC SIPLUS CMS1200 SM1281 Condition Monitoring* [firemní materiál]. Firma Siemens, s.r.o. Praha.
- [25] KRŮSTEK, Radim. *Vibrodiagnostika točivých strojů* [firemní materiál]. Firma Siemens, s.r.o. Praha.
- [26] *Totally Integrated Automation Portal – Always ready for tomorrow* [online]. Siemens, 2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- [27] *MindConnect Edge Analytics CMS X-Tools* [firemní materiál]. Firma Siemens, s.r.o. Praha.
- [28] *Panely SIMATIC HMI Basic* [online]. Siemens, 2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/products/automation/simatic-hmi/panels/basic-panels.html>
- [29] *Matlab Help* [online]. MathWroks, Inc. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help>

- [30] DURÁNÍKOVÁ, Andrea. *Sledování pohybu objektů pomocí pohyblivé kamery*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132910>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Králík.
- [31] VOLNÁ, Eva. *Neuronové sítě 1* [online]. Ostrava, 2008. Dostupné z: https://web.osu.cz/~Volna/Neuronove_site_skripta.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Schéma kvality produktu.....	17
Obrázek 2: Schéma spolehlivosti.....	18
Obrázek 3: Model Lineární soustavy s jedním stupněm volnosti.....	23
Obrázek 4: Rozdělení měřených veličin.....	24
Obrázek 5: Závislost materiálu pro sondy.....	25
Obrázek 6: Typy akcelerometrů.....	27
Obrázek 7: Schéma rozdělení signálu.....	28
Obrázek 8: Příklad FFT.....	30
Obrázek 9: Příklad spektra.....	33
Obrázek 10: Typy nevyváženosti.....	35
Obrázek 11: Mezní otáčky v závislosti na Sommerfeldově čísle.....	36
Obrázek 12: Vzorce pro poruchové frekvence.....	38
Obrázek 13: Schéma fungování Fluke 3563.....	41
Obrázek 14: Konfigurace.....	45
Obrázek 15: SM 1281 – struktura.....	46
Obrázek 16: Siplus CMS – úrovně analýzy.....	46
Obrázek 17: Příklad projektu v X-tools.....	49
Obrázek 18: Reálný model od firmy Siemens.....	51
Obrázek 19: SINAMICS V90.....	52
Obrázek 20: Webové rozhraní aplikace.....	53
Obrázek 21: Kuličkové ložisko s poruchou.....	54
Obrázek 22: Přidaná nevyváženost pro měření.....	54
Obrázek 23: Schéma modelu Madaline.....	56
Obrázek 24: Schéma sítě s jednou skrytou vrstvou.....	57
Obrázek 25: Schéma konvoluční neuronové sítě.....	58
Obrázek 26: Aplikace Deep Network Designer.....	58
Obrázek 27: Srovnání předtrénovaných sítí.....	59
Obrázek 28: Aplikace App Designer.....	60
Obrázek 29: Uživatelské rozhraní před výběrem zadání.....	61
Obrázek 30: Uživatelská aplikace s výběrem Off-line verze.....	61
Obrázek 31: Výstup pro sensor 2.....	62
Obrázek 32: Uživatelská aplikace se závěry neuronových sítí.....	62
Obrázek 33: Nastavení modelu bez závad s rychlostí 300 RPM.....	63
Obrázek 34: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 300 RPM.....	64
Obrázek 35: Nastavení modelu s poruchou ložiska s rychlostí 300 RPM.....	64
Obrázek 36: Nastavení modelu bez poruchy s rychlostí 600 RPM.....	65
Obrázek 37: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 600 RPM.....	65
Obrázek 38: Nastavení modelu s poruchou ložiska s rychlostí 600 RPM.....	66
Obrázek 39: Nastavení modelu bez poruchy s rychlostí 900 RPM.....	66

Obrázek 40: Nastavení modelu s poruchou nevyváhy s rychlostí 900 RPM	67
Obrázek 41: Nastavení modelu s poruchou ložiska při rychlosti 900 RPM	67
Tabulka 1: Monitorovací mód	47
Tabulka 2: Spektra	47

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy:

PŘÍLOHA 1: Přehled hlavních částí programu