

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

**Metody a prostředky technické diagnostiky pro zjišťování poruch
rotačních strojů**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

Autor: Ivo Šafařík

Anotace

V této bakalářské práci je zpracována problematika zjišťování poruch rotačních strojů. V první části jsou uvedeny základní metody a principy technické diagnostiky. Druhá část je věnována systému monitorování typických rotačních strojů s důrazem na vibrační diagnostiku včetně metodiky provádění měření, použití měřicí techniky a zpracování naměřených dat. Ve třetí části je uveden příklad měření a jeho vyhodnocení na rotačním stroji v provozu Jaderné elektrárny Temelín.

Abstract

In this bachelor work are described problems in recognition disturbances of rotating machines. In the first part are stated basic method and principles of a technical diagnostic. The second part is dedicated to presentation a typical rotating machinery monitoring system with accent on vibration diagnostics inclusive philosophy about taking measurement, using measuring techniques and processing measured data. In the third part is stated measuring example and its evaluation on rotating machine in Nuclear power plant Temelin.

Prohlašuji že předloženou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedené (citované) literatury.

Datum, podpis:

Touto formou děkuji p. doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

OBSAH

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE	7
2 POPIS SPECIFICKÝCH VIBRAČNÍCH DIAGNOSTICKÝCH METOD.....	7
2.1 Technická diagnostika – cíle a základní pojmy.....	7
2.2 Fyzikálně-technická část měření vibrací.....	9
2.2.1 Úvod.....	9
2.2.2 Periodické harmonické netlumené vibrace	9
2.2.3 Výhybka, rychlost, zrychlení, energie harmonických vibrací.....	11
2.2.4 Vlastní tlumené vibrace.....	12
2.2.5 Pohybová rovnice vlastních tlumených vibrací.....	12
2.3 Typy a příčiny vibrací.....	13
2.3.1 Typy měření vibrací	13
2.3.2 Dynamické vlastnosti strojů a jejich vliv na vibrace.....	14
2.3.3 Příčiny vibrací rotačních strojů.....	17
2.4 Vibrační signály užívané v diagnostice rotačních strojů	17
2.4.1 Analýza signálu v časové oblasti.....	17
2.4.2 Zobrazení signálu ve frekvenční oblasti.....	19
2.4.3 Určení fáze vibrací.....	19
2.5 Specifické vibrační diagnostické metody.....	21
2.5.1 Měření celkových hodnot vibrací.....	21
2.5.2 Měření časových průběhů vibrací.....	22
2.5.3 Měření a analýza frekvenčních spekter	25
2.5.4 Příklady typických vad rotačních strojů a jejich projevy ve frekvenčních spektrech.....	28
2.5.5 Metody pro určení stavu valivých ložisek.....	31
2.5.6 Analýza výhybky a orbity hřídele.....	33
3 POPIS MĚŘÍCÍCH DIAGNOSTICKÝCH SYSTÉMŮ ON-LINE, OFF-LINE.....	35
3.1 Typy měřících diagnostických systémů	35
3.2 Projektování diagnostických systémů	36
3.3 Popis měřícího diagnostického systému on-line.....	36
3.3.1 Příklad on-line měřícího diagnostického systému	37
3.3.2 HW části on-line diagnostického systému	39
3.3.2.1 Snímače diagnostických veličin.....	39
3.3.2.2 Komponenty pro zpracování a vyhodnocení diagnostických veličin.....	43
3.3.2.3 Vyhodnocovací program	45

3.4 Popis měřicího diagnostického systému off-line.....	46
3.4.1 Snímače zrychlení.....	46
3.4.1.1 Snímače zrychlení typu ICP®	47
3.4.2 Měřicí přístroje diagnostických systémů off-line.....	48
3.4.2.1 Jednoduché měřicí přístroje pro měření vibrací.....	48
3.4.2.2 Měřicí přístroje pro záznam a analýzu naměřených dat.....	48
3.4.2.3 Analogové frekvenční analyzátory.....	48
3.4.2.4 FFT analyzátory s využitím rychlé Fourierovy transformace.....	50
3.4.3 Programové vybavení pro analýzu vibrací	55
4 PRAKTICKÁ UKÁZKA APLIKACE DIAGNOSTICKÉHO POSTUPU PŘI SBĚRU, ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT NA KONKRÉTNÍM OBJEKTU.....	55
4.1 Popis měřeného objektu	55
4.2 Příprava měření	56
4.2.1 Volba a příprava měřicích míst	56
4.2.2 Měřicí přístroje, snímač a vyhodnocovací program.....	57
4.2.3 Volba měřených veličin.....	58
4.3 Provedení měření a zpracování dat	59
4.4 Vyhodnocení dat.....	59
4.4.1 Vyhodnocení na základě limitních hodnot.....	60
4.4.2 Vyhodnocení frekvenčních spekter.....	60
4.4.3 Vyhodnocení časových záznamů.....	63
4.4.4 Vyhodnocení stavu ložisek	64
4.4.5 Protokol z vyhodnocení kontroly vibrací.....	65
5 Závěr.....	68
6 Seznam použitých zkratk.....	68
Použitá literatura.....	69

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Technická diagnostika je v současné době významným nástrojem pro objektivní zjišťování technického stavu strojů. Přispívá ke zvýšení celkové účinnosti strojů, snížení nákladů na údržbu, omezení náhlých výpadků produkce. V průmyslových oborech jako jsou elektroenergetika, teplárenství, chemický průmysl nebo distribuce plynu nachází velké uplatnění bezdemontážní diagnostika, která umožňuje za provozu rozpoznávat poruchy a také plnit funkci zabezpečovacího systému. Součástí bezdemontážní diagnostiky je vibrační diagnostika rotačních strojů.

Hlavním cílem bakalářské práce je vysvětlení základů diagnostiky vibrací rotačních strojů, popis možných příčin jejich poruch a popis diagnostických systémů pro měření vibrací. Na příkladu reálného rotačního stroje z provozu elektrárny je uveden postup při měření, analýze a vyhodnocení vibrací včetně vystavení protokolu. Práce přináší informace o reálných diagnostických systémech, které jsou používány v průmyslové praxi.

2 POPIS SPECIFICKÝCH VIBRAČNÍCH DIAGNOSTICKÝCH METOD

2.1 Technická diagnostika – cíle a základní pojmy

Název diagnostika vychází z řeckého slova diagnosis (rozeznávání, určení). Diagnostika je oborem zabývající se metodami a prostředky zjišťování stavu objektů. Cílem technické diagnostiky je objektivní poznání technického stavu diagnostikovaného objektu a zajištění jeho schopnosti vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek. Technickou diagnostikou se zejména rozumí diagnostika bezdemontážní a nedestruktivní [1].

Základní cíle technické diagnostiky jsou [1]:

- Zjistit změnu funkčnosti provozního stavu stroje.
- Zjistit místo výskytu změny provozního stavu (lokalizace poruchy).
- Zjistit příčinu poruchy.
- Předpovědět dobu provozuschopnosti (prognóza stavu).
- Doporučit zásah údržby.
- Provést kontrolu úspěšnosti zásahu údržby.
- Zajistit zpětnou vazbu - kontrola demontovaných dílů pro potvrzení úspěšnosti diagnózy, záznam do informačního systému (paměť údržby).

Přínosy technické diagnostiky jsou především v oblasti technickoekonomické. Technická diagnostika je součástí programů údržby a efektivního využívání technologických zařízení. Výhody, které tyto programy přináší lze shrnout do následujícího seznamu [1]:

Zvýšení	Produktivita Lepší využívání zdrojů Spolehlivost Prodloužená životnost strojů
Snížení	Celkové náklady na údržbu Neplánované odstávky Opotřebení strojních částí
Prodloužení	Střední doba mezi poruchami Intervaly plánované údržby

Jak bylo výše uvedeno, dělí se diagnostika na bezdemontážní a nedestruktivní [1]. Mezi bezdemontážní patří zejména vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, akustická diagnostika, elektrodiagnostika apod. Mezi nedestruktivní patří zejména defektoskopie. Předmětem této práce je vibrační diagnostika jako základní typ pro zjišťování poruch a hodnocení stavu rotačních strojů.

Při aplikaci metod technické diagnostiky se užívá názvosloví a definice. Mezi základní pojmy podle [1] patří:

Diagnostický systém - je tvořen diagnostickými prostředky, diagnostikovaným objektem a obsluhou. Cílem jeho činnosti je určení technického stavu diagnostikovaného objektu a to jeho okamžitého stavu – diagnózy, budoucího stavu – prognózy a stavu v minulosti – geneze.

Diagnostické prostředky - soubor technických zařízení či systémů, metod a pracovních postupů umožňujících provádět analýzu a vyhodnocování technického stavu diagnostikovaného objektu.

Diagnostikovaný objekt - objekt aplikace technické diagnostiky.

Diagnostikovatelnost - vlastnost objektu vyjadřující způsobilost k použití diagnostických prostředků.

Technický stav objektu - stav objektu určující jeho schopnost vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek jeho užívání. Technický stav je určen hodnotami diagnostických veličin.

Diagnostická veličina - veličina, která je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho části.

Diagnóza - určení okamžitého technického stavu diagnostikovaného objektu za daných podmínek.

Diagnóza vede k řešení dvou základních úloh:

- Detekce poruchy, tj. identifikace poruchy objektu nebo jeho části. Rozlišujeme poruchový a bezporuchový stav z hlediska použitelnosti objektu.
- Lokalizace poruchy, tj. určení místa poruchy objektu.

2.2 Fyzikálně-technická část měření vibrací

2.2.1 Úvod

Vibrace jsou kmitavý pohyb pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy. Tento pohyb může být periodický, neperiodický nebo náhodný. Těleso, v němž k vibracím dochází, se nazývá kmitavá soustava.

S vibracemi se setkáváme někdy jako s jevem nechtěným, jindy jako s jevem užitečným. Vždy se řeší dva rozdílné problémy:

1. Jak omezit mechanické vibrace strojů, aby byl zajištěn jejich bezporuchový provoz, zvýšena jejich životnost a sníženo jejich působení na okolí.
2. Jak naopak vybudit mechanické vibrace, aby plnily některé užitečné funkce, např. u vibračních podávačů, sbíječek, beranidel a u zařízení pro zkoušení dynamických vlastností a dynamické únavy různých objektů.

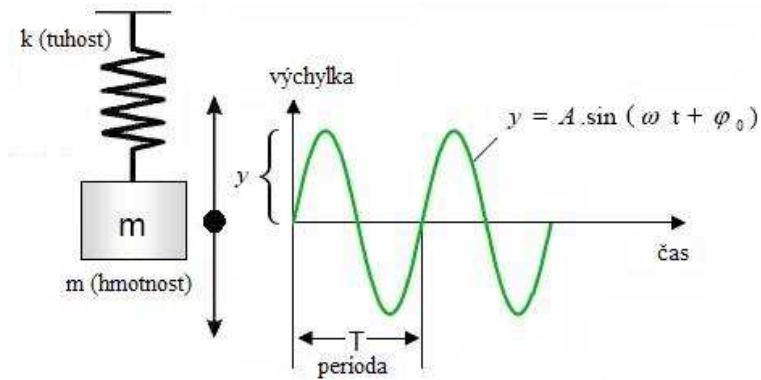
Z hlediska měřicí techniky a analýzy je důležité, jak vibrace změřit a popsat technicky účelným způsobem. Z toho důvodu je nutné vybrat potřebné fyzikální jednotky a charakteristické parametry.

Na základě výše uvedeného lze uvést:

- Mechanické vibrace jsou indikátorem stavu stroje
- Mechanické vibrace upozorňují na dynamické namáhání stroje, základů a okolí
- Mechanické vibrace poskytují podklady pro diagnostiku strojů

2.2.2 Periodické harmonické netlumené vibrace

Nejjednodušší formu kmitavé soustavy představuje netlumený harmonický oscilátor. Pokud je systém uveden do pohybu, bude stále vykonávat tento pohyb ve tvaru křivky harmonické funkce (sinus) s konstantní frekvencí a amplitudou. Tento pohyb lze dobře popsat pomocí harmonického pohybu hmotného bodu zavěšeného na pružině, viz obr. 2.2.2.1 převzatý a upravený z [2].



Obr. 2.2.2.1 Netlumený harmonický oscilátor (systém hmotné těleso-pružina)

Na základě druhého Newtonova zákona lze vypočítat sílu pružiny působící na hmotný bod podle vztahu

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

nebo v diferenciálním tvaru

$$F = m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (2.2)$$

kde:

F je síla;

m je hmotnost;

a je zrychlení;

y je okamžitá výchylka;

t je čas.

Z pohybové diferenciální rovnice pro netlumený harmonický kmitavý pohyb harmonického oscilátoru

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + k \cdot y = 0 \quad (2.3)$$

kde k je tuhost pružiny, lze určit okamžitou výchylku na základě vztahu

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.4)$$

Z průběhu harmonického pohybu můžeme pro účely vibrační diagnostiky určit některé důležité veličiny, kde:

y je okamžitá výchylka;

A amplituda (největší výchylka z rovnovážné polohy);

T perioda [s];

f frekvence [Hz];

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

φ_0 počáteční fáze [°];

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ úhlová frekvence netlumených kmitů.}$$

Nejjednodušší periodické kmity, kterým jsou harmonické kmity, lze jednoznačně určit veličinami amplituda, frekvence a fázový úhel.

Amplituda

- je maximální hodnota harmonických kmitů. Je mírou velikosti a lze ji použít k posouzení stavu stroje.

Frekvence

- udává, jak často se kmity opakují za časovou periodu jedné sekundy. Jednotkou je Hz (počet cyklů za sekundu). V diagnostice rotačních strojů představuje frekvence vibrací velmi důležitou informaci, protože určité příčiny vibrací se projevují na pevných frekvencích nebo na frekvencích v určitém poměru k počtu otáček rotujících částí stroje. Otáčky strojů se vyjadřují v počtu otáček za minutu, ale frekvence generované stroji se měří v jednotkách Hz.

Fázový úhel (fáze)

- popisuje počáteční polohu kmitajícího bodu v čase $t=0$. V diagnostice rotačních strojů se informace o fázovém úhlu využívá pro snímání síly nevyváženosti a určení polohy hřídele.

2.2.3 Výchylka, rychlost, zrychlení, energie harmonických kmitů

Okamžitou polohu tělesa v čase popisuje jeho výchylka z rovnovážné polohy podle vztahu (2.4). Protože se výchylka v čase mění, má hmotný bod i svoji okamžitou rychlost a zrychlení. Kmity lze tedy popsat pomocí těchto tří veličin. Výchylka, rychlost a zrychlení jsou u harmonických kmitů společně vázány matematickými vztahy: derivacemi a integrály [3].

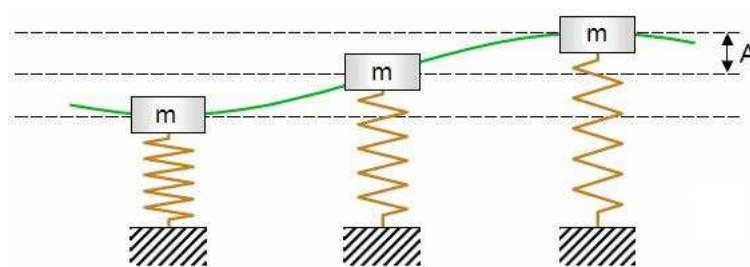
Derivací polohy podle času určíme rychlost ze vztahu

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2.6)$$

Derivací rychlosti podle času určíme zrychlení ze vztahu

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.7)$$

Při mechanickém kmitání se v čase neustále mění hodnoty určujících veličin kmitání (výchylky, rychlosti, zrychlení) a dochází při tom k přeměně kinetické a potenciální energie – viz obr. 2.2.3.1 převzatý a upravený podle [2]. Na základě toho můžeme říci, že mechanické kmitání je dynamický děj.



Obr. 2.2.3.1 Přeměna kinetické a potenciální energie u netlumeného harmonického oscilátoru

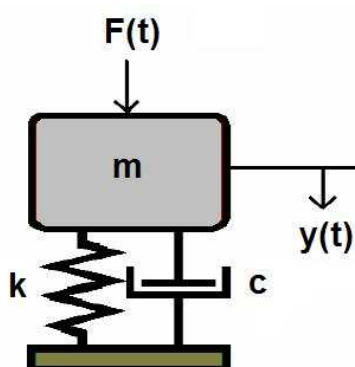
Celková mechanická energie je podle vztahu (2.8) závislá na hmotnosti m , amplitudě A a úhlové frekvenci ω . Současně ze vztahu vyplývá, že tato energie není funkcí času tj. v čase se zachovává.

$$E_{celková} = \frac{1}{2} m \cdot A^2 \cdot \omega^2 \quad (2.8)$$

2.2.4 Vlastní tlumené kmitání

V průmyslu se rotačních stroje chovají jako tlumené mechanické soustavy. Tyto mechanické systémy představuje systém hmota-pružina-tlumič, který má tři základní vlastnosti: tuhost, setrvačnost a tlumení. Průběh tlumených kmitů systému závisí na odporových silách. Energie se vlivem těchto sil mění převážně v teplo. Takové kmity již nesplňují podmínku periodičnosti a jejich amplituda v čase klesá. Systém lze popsat jako harmonický oscilátor s tlumeným kmitavým pohybem.

2.2.5 Pohybová rovnice vlastních tlumených kmitů



Obr. 2.2.5.1 Systém hmota-pružina-tlumič

Dynamické chování systému hmota-pružina-tlumič, viz obr. 2.2.5.1 převzatý a upravený podle [3], je vyjádřeno pohybovou rovnicí tlumených kmitů [3]

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2b \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (2.9)$$

kde:

b je koeficient útlumu [s^{-1}];

$$b = \frac{r}{2m} \quad (2.10)$$

ω_0 úhlová frekvence netlumených kmitů;

r součinitel odporu prostředí [$kg \cdot s^{-1}$];

y okamžitá výchylka [m];

m hmotnost [kg].

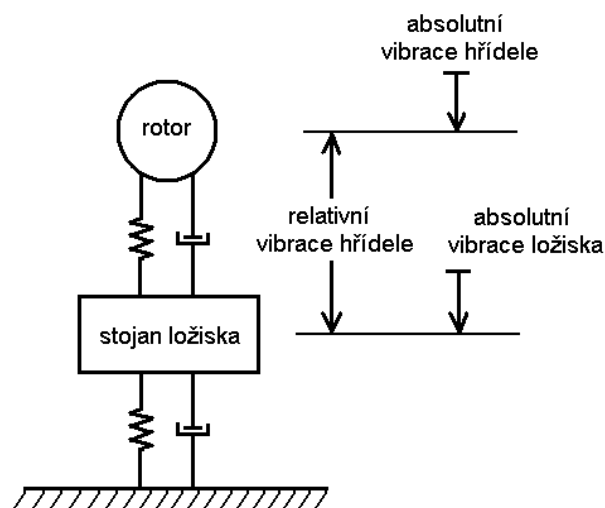
2.3 Typy a příčiny vibrací

Cílem měření vibrací je detekovat zvýšení jejich úrovně pomocí měřících diagnostických systémů. Otázkou je, které vibrace mají být měřeny, aby byl tento cíl splněn.

2.3.1 Typy měření vibrací

Obecně existují tři typy měření, které mohou být použity pro monitorování stavu vibrací rotačních strojů [1]:

- Relativní pohyb hřídele – měření relativního pohybu mezi rotorem a stacionárními ložisky nebo ložiskovými skříněmi. Pohyb je vyhodnocován vůči zvolenému reálnému bodu např. pohyb hřídele rotoru ve vztahu k ložiskové pánvi resp. stojanu ložiska. V praxi se relativní vibrace zjišťují u strojů, jejichž rotory mají kluzná uložení.
- Absolutní vibrační pohyb hřídele – měření absolutního vibračního pohybu rotujících částí. Je vztažen k pevnému bodu v prostoru.
- Absolutní vibrace ložiska – měření absolutního vibračního pohybu ve vztahu k pevnému referenčnímu bodu v prostoru. V praxi je uvažují vibrace projevující se na povrchu strojů, zejména na ložiscích nebo v jejich blízkosti. Například nevyvážek na rotoru vybudí vibrace, které se přes ložiska přenáší na skříň stroje. Tyto vibrace lze měřit pomocí absolutních snímačů vibrací umístěných na skříni stroje.

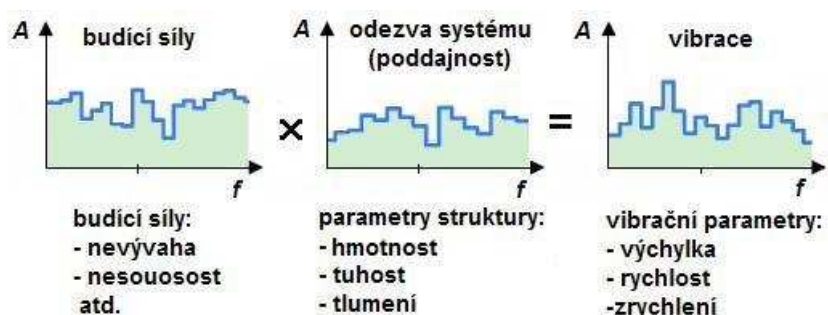


Obr. 2.3.1.1 Typy měření vibrací u rotačních strojů

Každý z uvedených typů měření na obr. 2.3.1.1, převzatém a upraveném podle [4], se používá v průmyslu u mnoha typů strojů a lze pomocí nich odhalovat příčiny nadměrných vibrací. Ke správné aplikaci typu měření je důležité uvážit jak příčiny vibrací a pravděpodobných závad, tak dynamické vlastnosti a konstrukci stroje.

2.3.2 Dynamické vlastnosti strojů a jejich vliv na vibrace

Jak velké vibrace mohou být měřeny na rotoru a jak velké na ložiskovém domku rotačního stroje závisí na jeho dynamických vlastnostech a konstrukci. Rotační stroj je jako mechanická struktura s určitou tuhostí, hmotností a tlumícími vlastnostmi vystaven za provozu působení budících sil, například od nevyváhy rotoru nebo nesymetrie na spojce.



Obr. 2.3.2.1 Vibrace jako výsledek budících sil a poddajnosti stroje

Každý rotační stroj má dynamické vlastnosti, které rozhodují o jeho vibrační odezvě, viz obr. 2.3.2.1 převzatý a upravený podle [2]. Nejvýznamnější odezvou jsou systémové rezonance. Hmotnost, tuhost a tlumení různých komponent rotačního stroje rozhodují o systémové rezonanci, která je indikována křivkami zesílení neboli rezonančními křivkami.

Vlastní frekvence mechanické soustavy je určena vztahem

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.11)$$

kde:

k je tuhost soustavy [m];

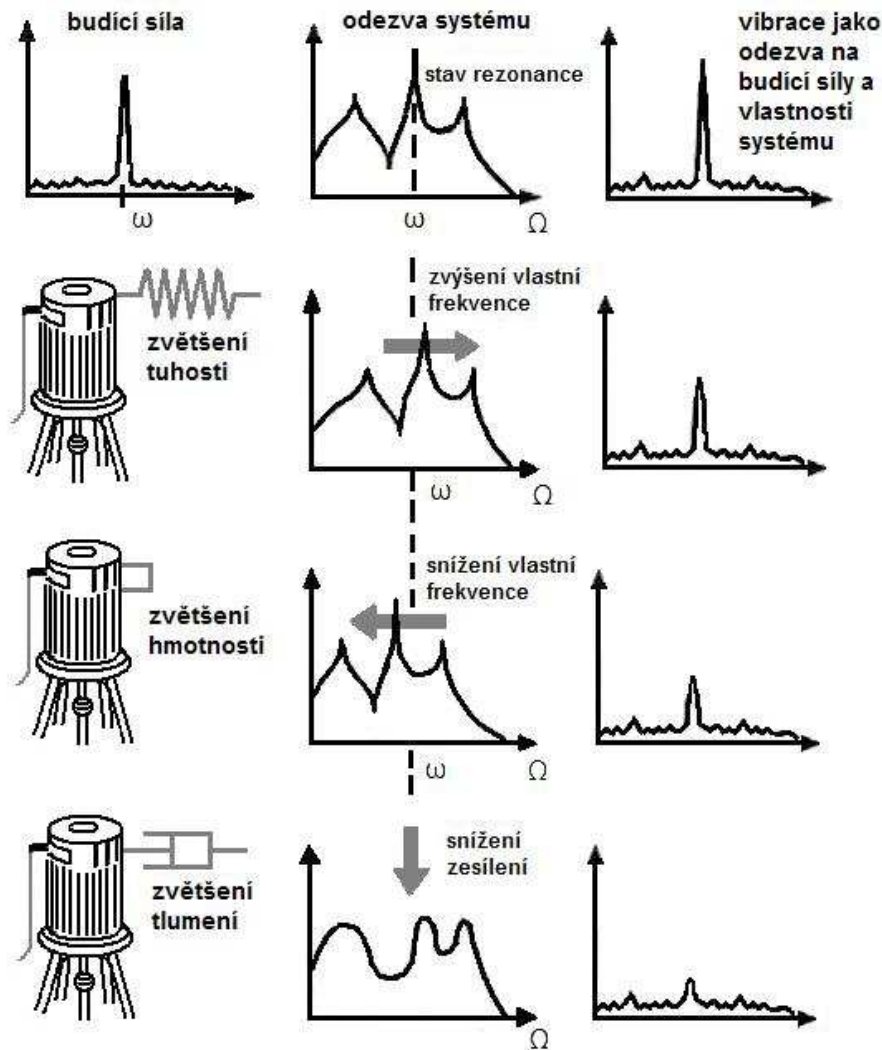
m hmotnost stroje [kg].

Rezonance mohou být příčinou mechanického zesílení sil provázejících normální stav stroje a tedy i nepřijatelné vibrační odezvy. V takovém případě musí být navržena vhodná řešení ke snížení vibrací. Realizace se provádí úpravami konstrukce za účelem přesunu a tlumení rezonancí.

Dynamické vlastnosti rotačního stroje můžeme ovlivnit třemi způsoby, viz obr. 2.3.2.2 převzatý a upravený podle [5]:

- 1) Změnou-zvýšením tuhosti dosáhneme zvýšení vlastní frekvence. Pro takové přeladění vlastních frekvencí nad hodnoty vlastních frekvencí se využívá především dodatečných vzpěr a příček umístěných k vibrujícím částem stroje.
- 2) Změnou-zvětšením hmotnosti dosáhneme snížení vlastní frekvence (soustava se zatíží např. přidáním hmoty v rovině horního ložiska elektromotoru u soustrojí pohon-čerpadlo s vertikální orientací osy hřídelí)
- 3) Zvýšení systémového tlumení je účinným prostředkem pro snížení zesílení, aniž se významně ovlivní vlastní frekvence. U tohoto způsobu se využívá vlastností materiálů přeměňovat část mechanické energie vlivem vnitřních ztrát v teplo. Takovými materiály jsou obvykle plasty, které lze z důvodu jejich mechanických vlastností kombinovat s kovy (mají vnitřní útlum nižší). Změny tlumení lze dosáhnout také použitím různých pružných vložek především z pryže a také pružným uložením strojů, tak aby mechanická soustava základ-pružiny-stroj (hmota) pracovala v nadrezonanční oblasti.

Rovněž změnou konstrukce dosáhneme změnu charakteristiky odezvy (např. soustava se spojí s jinou soustavou).



Obr. 2.3.2.2 Dynamické charakteristiky systému

Při měření vibrací rotačních strojů se můžeme setkat s jejich rezonančním chováním. Reálný rotační stroj představuje v podstatě nelineární mechanickou soustavu. Klasifikace nelineárních soustav při návrhu stroje je obtížná. Stroje jsou závislé na velkém počtu provozních parametrů, výrazný je také vliv montáže a seřízení. Metody výpočtu nelineárních soustav jsou značně složité a vyžadují odpovídající programové vybavení.

Z výše uvedených důvodů má určení rezonanční oblasti měřením velký význam. U velmi důležitých rotačních strojů (turbíny, velká čerpadla a ventilátory) je určení rezonančních oblastí prováděno ve zkušebnách nebo na místě montáže při zkušebním provozu. U ostatních rotačních strojů se určení rezonančních oblastí provádí v případě výskytu problémových vibrací při provozu. Mezi metody určení rezonančních oblastí patří rozběhové a doběhové charakteristiky provozních vibrací, na odstaveném rotačním stroji se provádí tzv. rázové testy. Pro návrhy řešení vedoucích k dynamickému vyladění systému pracujícího v rezonanci se používá metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu.

2.3.3 Příčiny vibrací rotačních strojů

Provoz rotačních strojů je doprovázen vibracemi, které jsou odezvou na působení vnitřních a vnějších dynamických sil. U rotačních strojů vyšetřujeme příčiny vibrací, které způsobují síly vznikající při pohybu jednotlivých strojních součástí. Každý rotační stroj má za provozu určitou hladinu vibrací. Správným konstrukčním řešením, přesnou výrobou a montáží lze dosáhnout pouze určité minimální - základní hladiny vibrací, která je ekonomicky výhodná z hlediska výrobních a montážních nákladů a plně vyhovující z hlediska provozování a údržby stroje.

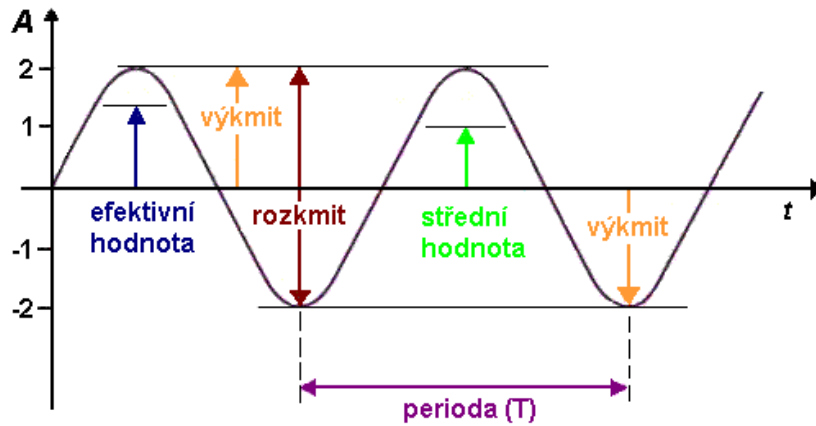
Změny v dynamickém chování rotačních strojů, které jsou příčinami jejich zvýšených vibrací, mohou být způsobeny [6]:

- budícími silami od výrobních nepřesností a vůlí vzájemně se pohybujících součástí
- silami rotující nevyvážené hmoty, například změnou budící síly nevyváhy otáčejícího se rotoru čerpadla nebo turbíny
- změnami ustavení, například nesymetrií hřídelí vznikající za provozu z důvodu nerovnoměrného prohřátí spojených komponent
- opotřebením nebo poškozením kluzných nebo valivých ložisek, například rázy způsobenými valivými tělesy při jejich průchodu přes trhliny v dráze ložiska
- závadami ozubených převodů, řemenových převodů a spojek
- narušením proudění kapaliny v hydraulických strojích, například náhodně buzené vibrace dané kavitačním chováním čerpadla
- silami buzenými elektrickými stroji, například nesymetrií vzduchové mezery mezi rotorem a státorem v indukčních motorech
- provozními přechodovými ději

2.4 Vibrační signály užívané v diagnostice rotačních strojů

2.4.1 Analýza signálu v časové oblasti

Amplitudy vibrací, které určují přímo škodlivost vibrací působících na rotační stroje, je možné hodnotit několika způsoby. Za tím účelem lze použít časový průběh signálu vibrací, který zobrazuje závislost amplitudy na čase.



Obr. 2.4.1.1 Hodnoty amplitudy harmonického pohybu

Z časového průběhu harmonického pohybu lze určit hodnoty [6]:

- rozkmit (označovaný také dvojitá amplituda, hodnota špička-špička)
 - je vzdálenost mezi krajními polohami, kterými projde hmotný bod během svého pohybu kolem rovnovážné osy. Popisuje maximální výchylku kmitu v kladném a záporném směru. Používá se tam, kde je z hlediska maximálně přípustného namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka vibrací např. u kluzně uložených rotorů s lopatkami.
- výkmit (označovaný také amplituda, vrcholová hodnota, hodnota nula-špička)
 - popisuje maximální výchylku kmitu ve vztahu k nulové poloze. Je důležitá tím, že popisuje amplitudy krátkodobých jevů, mechanických rázů apod. Tato hodnota pouze indikuje přítomnost špičky, neobráží časový průběh ani frekvenční složení hodnocených vibrací.
- efektivní hodnota
 - je nejdůležitější hodnotou z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud vibrací, protože jedinou hodnotou odráží časový průběh a má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy měřítkem škodlivosti vibrací. V praxi se při hodnocení vibrací rotačních strojů používá často efektivní hodnota rychlosti vibrací, která je definována vztahem

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.12)$$

kde:

$v(t)$ je časově závislá rychlost vibrací [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$];

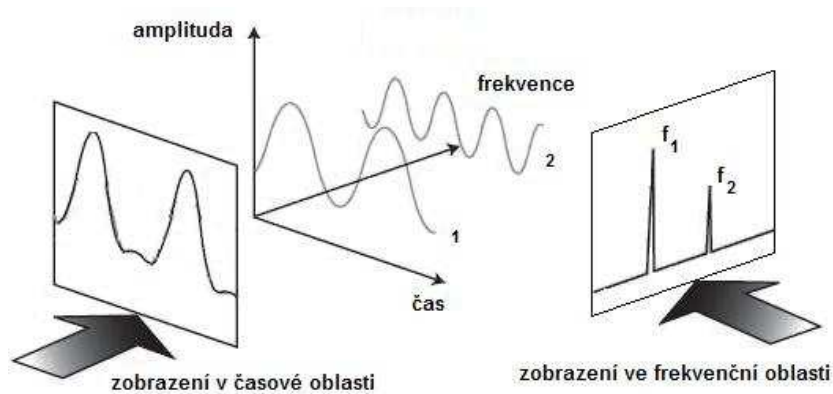
v_{ef} odpovídající efektivní hodnota rychlosti [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$];

T doba vzorkování [s], která je delší než jedna perioda jakékoliv hlavní frekvenční složky, z nichž se $v(t)$ skládá.

- střední hodnota
 - odráží časový průběh hodnocených vibrací. V praxi se k hodnocení vibrací rotačních strojů používá zřídka, protože nemá přímý vztah k určení stavu jejich komponent.

2.4.2 Zobrazení signálu ve frekvenční oblasti

Před více než sto lety dokázal Jean Baptiste Fourier, že každý časový rozvoj (průběh) signálu, který existuje v reálném světě, může být vytvořen součtem jednotlivých harmonických vln. Na obrázku je uveden časový rozvoj signálu složený ze dvou harmonických (sinusových) vln. Opačným způsobem můžeme z obou vln složit původní časový rozvoj signálu. Na obr. 2.4.2.1, převzatém a upraveném podle [7], je pohled na rovinu určenou osami amplitudy a frekvence. Nazýváme ji frekvenční oblast. Každá sinusová vlna se zde zobrazí jako vertikální čára. Její výška reprezentuje amplitudu a její poloha frekvenci. Zobrazení ve frekvenční oblasti nazýváme spektrum. Z hlediska zobrazení dává časový rozvoj informaci o tom, kdy se daný jev stal a frekvenční spektrum dává informaci, jak často se jev objevuje v signálu [6].



Obr. 2.4.2.1 Zobrazení signálu vibrací v časové a frekvenční oblasti

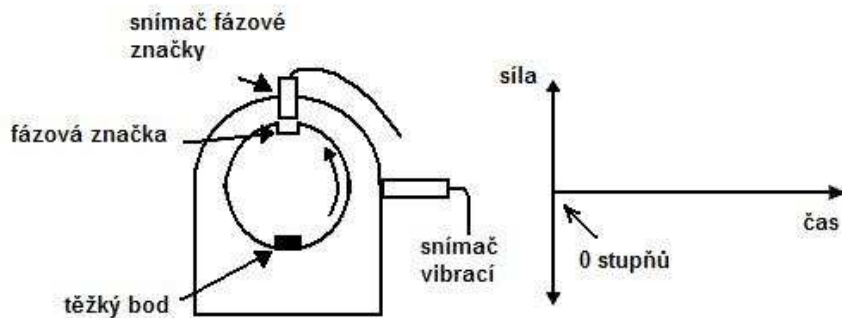
2.4.3 Určení fáze vibrací

Ke snímání síly nevyváženosti je používán snímač vibrací (např. akcelerometr) a snímač fázové značky (otáčkoměr) pro určení polohy hřídele. Značka je umístěna ve formě drážky na hřídeli. Snímač fázové značky generuje jeden puls ve chvíli, kdy značka míjí místo, kde je umístěn snímač fázové značky. Tímto pulsem se spouští sběr dat vibrací.

Definice fáze – fázový úhel je úhel ve stupních, o který se hřídel pootočí z bodu zahájení sběru dat až k bodu, ve kterém snímač vibrací naměří maximální kladnou sílu [8]. Například, fázový úhel je roven 90° v případě, kdy snímač změří maximální kladnou sílu v místě posunutém o 90° od místa spuštění dat snímače fázové značky (viz obr. 2.4.3.2 převzatý a upravený podle [8]).

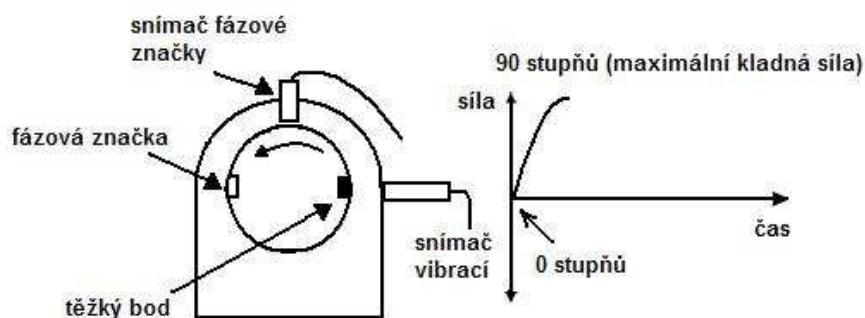
Těžký bod (těžké místo) – je místo na hřídeli s nejvyšším zrychlením.

Na obr. 2.4.3.1, převzatém a upraveném podle [8], je zachycen okamžik, kdy značka na hřídeli míjí pozici snímače fázové značky a spouští se sběr dat. V tomto bodě je síla rovna nule.



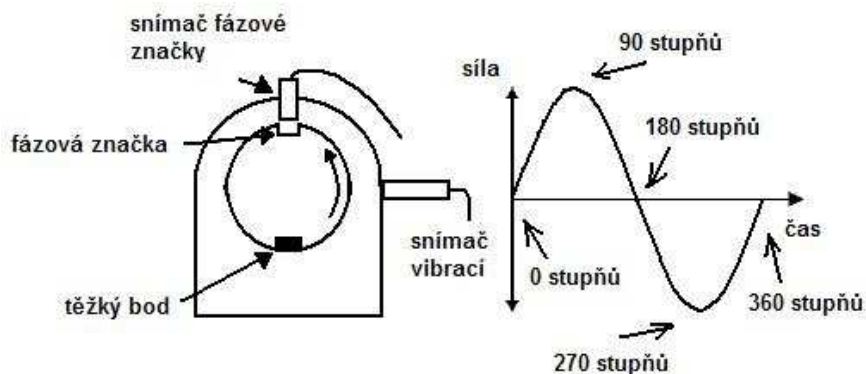
Obr. 2.4.3.1 Měření fáze - zobrazení ukazuje zahájení sběru dat (síla je rovna nule)

Na obr. 2.4.3.2, převzatém a upraveném podle [8], je zachycen okamžik, kdy se těžký bod posunul o 90° směrem ke snímači vibrací. V tomto bodě síly vyvolané nevyvážeností způsobí, že snímač naměří největší kladnou hodnotu.



Obr. 2.4.3.2 Měření fáze - zobrazení ukazuje posun těžkého bodu o 90 stupňů (je naměřena největší kladná síla)

Na obr. 2.4.3.3, převzatém a upraveném podle [8], je zachycen okamžik, kdy se těžký bod posunul o 360° a dokončil tak celou otáčku. V tomto bodě je síla opět rovna nule.



Obr. 2.4.3.3 Měření fáze - zobrazení ukazuje posun těžkého bodu o celou otáčku (360 stupňů) (měřená síla je opět nulová)

Závěr: Během otáčky hřídele o 360° zaznamená snímač vibrací největší kladnou hodnotu při posunutí těžkého bodu o 90° z výchozí polohy tj. z pozice, kdy byl spuštěn sběr dat při průchodu fázové značky v bodě umístění snímače fázové značky. Fázový úhel je tedy 90° .

Fáze vibrací se používá jako metoda analýzy vibrací, kdy je možné v různých místech stroje vyhodnotit fázový posun a tak definovat problém stroje .

2.5 Specifické vibrační diagnostické metody

Specifické vibrační diagnostické metody jsou nástrojem diagnostika pro provádění hodnocení stavu rotačních strojů.

2.5.1 Měření celkových hodnot vibrací

Metoda měření celkových (širokopásmových) hodnot vibrací se používá pro určení referenčního stavu rotačního stroje. Samotná znalost naměřených hodnot však ještě nedovoluje posoudit stav stroje. Teprve porovnání výsledků měření s určitými měřítky pro hodnocení umožní kvalifikované posouzení.

Metody posuzování lze rozdělit podle normy ČSN ISO 10373-1 [9] na:

Porovnání naměřených hodnot s mezními hodnotami z norem a předpisů (např. normy nebo provozní předpisy výrobce stroje)

- Posouzení na základě zkušeností a dat, která byla získána u podobných strojů
- Posouzení časového průběhu měřených hodnot (trend)

Běžná měření celkových hodnot vibrací se provádí na různých měřicích místech strojů nejlépe ve třech navzájem kolmých směrech měření. Porovnáním naměřených hodnot s kritériem nebo v trendu se získá informace o stavu stroje.

Z pohledu terminologie rozlišujeme [9]:

Velikost vibrací - představuje výsledek měření na stanoveném měřicím místě v daném směru.

Mohutnost vibrací – je nejvyšší hodnota velikosti celkových (širokopásmových) vibrací naměřená při dohodnutém uložení stroje a provozních podmínkách. Pro většinu rotačních strojů tato hodnota charakterizuje stav stroje z hlediska vibrací.

Při vyhodnocení celkových hodnot vibrací musí být zahrnuty tyto tři faktory [9]:

- okamžitá velikost vibrací
- jakákoli významná změna vibrací
- rychlost změny vibrací

Praktické provedení měření celkových hodnot vibrací rotačního stroje zahrnuje [9]:

- Na základě znalosti konstrukce stroje a jeho provozních parametrů se stanoví očekávané budící frekvence, které za provozu stroje charakterizují jeho stav.
- Na základě znalosti budících frekvencí se určí frekvenční rozsah měření a měřená veličina. U většiny rotačních strojů s širokým rozsahem otáček (obvykle od 600 do 12000 [min⁻¹]) je

pro zjištění závažnosti vibrací vhodné použití měření rychlosti vibrací. U strojů s nízkými provozními otáčkami, kdy je dominantní budící síla převážně jen na otáčkové frekvenci, se používá měření výchylky vibrací. Naopak u vysokootáčkových strojů nebo tam, kde stroj generuje vibrace na vyšších frekvencích, se použije měření zrychlení vibrací.

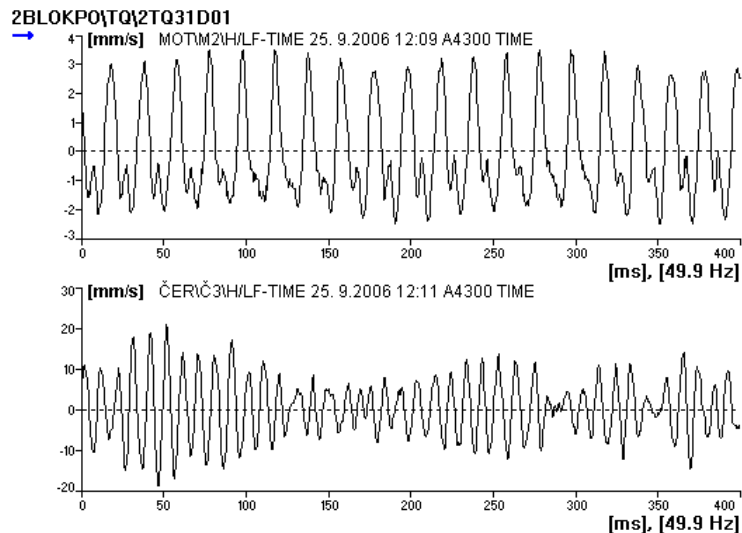
- Pokud je vhodné sledovat konkrétní budící frekvence vibrací, stanoví se frekvenční rozsah jen okolo těchto frekvencí.
- Provede se měření a vyhodnocení podle norem, předpisů a v trendu.

2.5.2 Měření časových průběhů vibrací

Časový rozvoj signálu je vyjádřením amplitudy v závislosti na čase. V časovém rozvoji signálu jsou obsaženy informace o amplitudě, frekvenci a fázi, které mohou být podkladem pro další zpracování a zobrazení ve frekvenční oblasti.

Z obecného pohledu je časový rozvoj signálu záznamem události, která se stala a tím představuje reálný pohled na vibrační chování stroje. Zobrazení časového průběhu se liší podle typu signálu. U jednoduchých signálů, mezi které patří harmonické signály, lze provést vyhodnocení stavu na základě časového průběhu. Komplikace nastávají, pokud je signál složitý. Rotační stroje generují za provozu právě takové signály. Například soustrojí elektromotor-převodovka-čerpadlo generuje velké množství signálů, které jsou ovlivňovány působením vnějších sil a také se ovlivňují vzájemně. To všechno lze rozeznat ze signálu v časové oblasti, který na první pohled vypadá jako nepřehledné zobrazení čar s různými amplitudami a frekvencemi. Účelem analýzy časového průběhu z takového signálu je popsat chování stroje a detekovat příčiny jeho problémů. Mnoho problémů je možné často rozpoznat jen analýzou v časové oblasti. Patří mezi ně například [6]:

- Poškozené zuby ozubených kol v převodovkách,
- Poškozené části valivých ložisek,
- Problémy z příčin záznějových vibrací,
- Problémy strojů s vratným pohybem (pístové kompresory, dieselmotory).



Obr 2.5.2.1 Příklad zobrazení signálu rychlosti vibrací v časové oblasti. Horní záznam je pro elektromotor s nesymetrií rotoru a dolní záznam pro čerpadlo se záznějovou vibrací

Praktické provedení měření časových průběhů vibrací rotačního stroje zahrnuje [6]:

- Nastavení měřícího přístroje (FFT analyzátoru) je nutné vykonat s ohledem na následné vyhodnocení a provedení frekvenční analýzy. Konstrukce, provozní parametry a otáčky stroje umožňují určit předpokládané budící frekvence, které je nutné zaznamenat pro vyhodnocení jeho stavu.

Příklad výpočtu převzatý a upravený podle [6]:

Uvažované budící frekvence jsou v oblasti do 1000 Hz a proto je nutné nastavit frekvenčním rozsah do 1000 Hz tj. $f_{max} = 1000$ Hz.

Jaká bude délka časového signálu vibrací, který vstupuje do analyzátoru? Výpočet délky záznamu je proveden podle vztahů (2.13) a (2.14). Protože FFT analyzátor používá rozlišení v pevných sadách počtu čar, je nutné provést jeho volbu. V příkladu je uvedeno 6400 čar.

$$T = \frac{1}{f} \cdot \text{počet čar} = \text{délka záznamu [s]} \quad (2.13)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad \text{frekvenční rozlišení [Hz]} \quad (2.14)$$

Samotný výpočet potom vypadá takto:

$$T = \frac{1}{1000} \cdot 6400 = 6,4 \text{ s}$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6,4} = 0,156 \text{ Hz}$$

Délka záznamu pro zvolené nastavení FFT analyzátoru bude 6,4 s a rozlišení ve frekvenčním spektru bude 0,156 Hz.

Z uvedeného příkladu lze odvodit, že pro větší frekvenční rozlišení je délka záznamu větší a pro menší frekvenční rozlišení je délka záznamu menší.

Další možností jak nastavit délku časového signálu vibrací je požadavek měřit s frekvenčním rozlišením $\Delta f = 0,156$ Hz. Důvodem může být požadavek na zobrazení dvou velmi blízkých frekvencí. Výpočet délky záznamu je v tomto případě proveden podle vztahu

$$T = \frac{1}{f} [\text{s}] \quad (2.15)$$

$$T = \frac{1}{0,156} = 6,4 \text{ s}$$

Na základě předchozího příkladu lze uvést, že na délku časového signálu má vliv pouze frekvenčním rozlišením Δf .

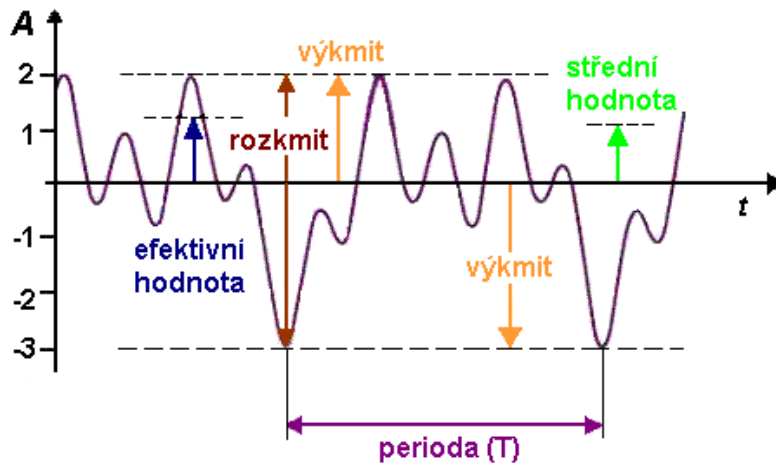
- Proveďte se měření a uložení časového záznamu do paměti analyzátoru. Vyhodnocení lze provést přímo na displeji analyzátoru nebo v aplikačním programu na počítači. Sleduje se zejména velikost amplitudy signálu a její stabilita v čase, periodičita signálu, výskyt modulačních složek, u rázových dějů jejich frekvence opakování a při znalosti otáček stroje také průběh signálu za jednu otáčku hřídele.

Důležitá poznámka pro měření a vyhodnocení časového průběhu vibrací:

Při používání měřících přístrojů vibrací různých výrobců lze podle [10] v některých případech při měření hodnot amplitud získat ze stejného časového průběhu výsledky, které jsou rozdílné. Důvodem je použití odlišného zpracování hodnot jednotlivými přístroji.

Vysvětlení lze provést pomocí obr. 2.4.1.1 a obr. 2.5.2.2 převzatých a upravených podle [10]. Obrázky ukazují dva typy časových průběhů: sinusový (harmonický) signál (obr. 2.4.1.1) a komplexní signál složený z mnoha sinusovek o různé frekvenci a fázi (obr. 2.5.2.2).

Zatímco hodnoty rozkmitu jsou z obrázků zřejmé, tak hodnoty výkmitu vyžadují vysvětlení. Pro výpočet hodnoty výkmitu se použije přístrojem změřená hodnota rozkmitu a ta se vydělí dvěma. U čistě sinusového signálu jsou hodnoty kladného a záporného výkmitu stejné. Ovšem u složeného signálu je časový průběh v kladné a záporné polorovině nesymetrický, tzn. že hodnoty kladného a záporného výkmitu se neshodují. Někteří výrobci u svých přístrojů definují hodnotu výkmitu jako větší z obou maxim v kladné a záporné polorovině. Při pohledu na oba obrázky tedy můžeme dostat dvě hodnoty výkmitu a to 3 při použití většího maxima a 2,5 při použití hodnoty rozkmitu dělené dvěma. Výsledkem je 20% neshoda mezi oběma hodnotami. Problémem není chyba ve výpočtu, jen jiný způsob vyhodnocení hodnoty výkmitu. U sinusového průběhu k neshodě ve výsledku nedojde. U složených signálů, které jsou při provozu rotačních strojů téměř výlučně měřeny, se ovšem objeví. Uvedeným neshodám lze předejít pouze měřením filtrované hodnoty na jedné frekvenci např. na základní harmonické otáčkové frekvenci.



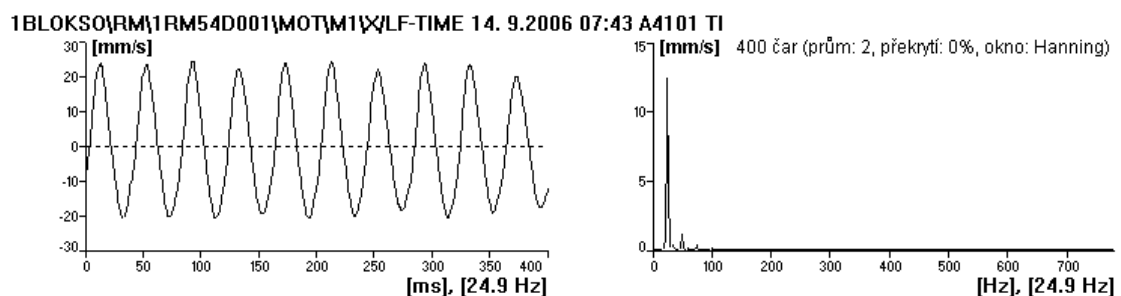
Obr 2.5.2.2 Hodnoty amplitudy neharmonického pohybu

2.5.3 Měření a analýza frekvenčních spekter

Nejvhodnější metodou pro sledování a analýzu vibračních signálů je metoda frekvenční analýzy. V případě, že má rotační stroj problém, je frekvenční analýza užitečným nástrojem pro poskytnutí informací o lokalizaci závady, určení příčiny a predikci zhoršování stavu.

Frekvenční spektrum časového signálu je zobrazení v souřadnicích amplituda-frekvence. Z hlediska přenášené energie jsou časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné a znamenají jen jiný pohled na stejný vibrační signál. Většina strojů a zařízení obsahuje rotační součásti nebo součásti s periodickým pracovním cyklem, jejichž pohyb lze nahradit pomocí frekvenčního rozkladu na jednotlivé sinusové signály s příslušnou amplitudou a vzájemnou fází. Vzhledem k tomu, že každé takové harmonické funkci přísluší i konkrétní zdroj buzení, je analýza frekvenčního spektra významným nástrojem vibrační diagnostiky.

Jestliže v časovém průběhu nějakému ději odpovídá periodický sled impulsů, ve frekvenčním spektru se tento děj projeví amplitudou na frekvenci odpovídající těmto pulsům, případně na jejich násobcích. Periodický sled impulsů je tedy převeden na jednu dobře identifikovatelnou hodnotu.



Obr. 2.5.3.1 Zobrazení časového průběhu (vlevo) periodického signálu vibrací na elektromotoru a odpovídajícího frekvenčního spektra (vpravo)

Transformace časového signálu na frekvenční spektrum může být realizována [3]:

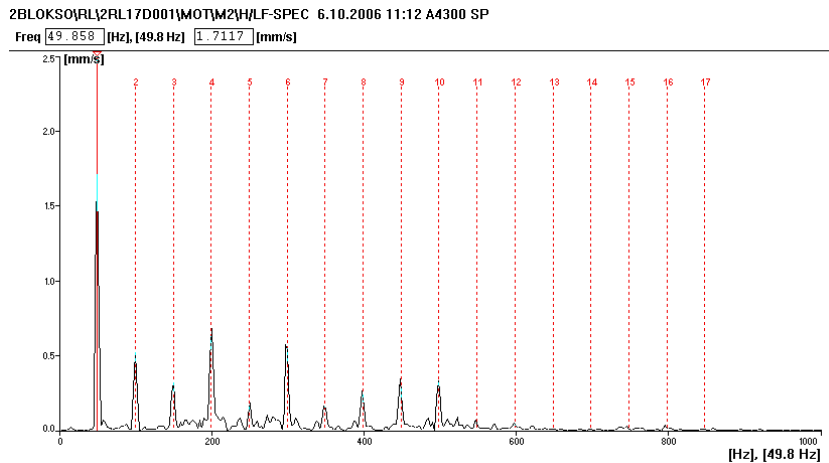
- Pomocí filtrů typu pásmové propusti nebo pásmovými filtry s laditelnou střední frekvencí. Tento způsob využívá analogové obvody se schopností postupného vyhodnocení požadovaného frekvenčního spektra.
- Rychlou Fourierovou transformací tzv. FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransformation), kdy je ze vzorku časového průběhu vibrací vypočítáno matematickým algoritmem frekvenční spektrum.

Praktické provedení měření frekvenčních spekter vibrací rotačního stroje zahrnuje tyto kroky:

- Shromáždění potřebných informací
Před provedením měření musí být k dispozici informace o všech částech stroje, které mohou být příčinou vibrací.
Mezi tyto informace zejména patří [6]:
 - u čerpadel a ventilátorů počty lopatek oběžných kol,
 - u valivých ložisek jejich konstrukční parametry pro určení vadových frekvencí,
 - u ozubených převodů počty zubů a otáčky každého kola,
 - u řemenových převodů délky řemeny, průměry řemenic a otáčky hřídelí,
 - u elektromotorů počty drážek rotoru a statoru,
 - provozní otáčky stroje,
 - způsob montáže a uložení stroje,
 - vlastní frekvence stroje.
- Nastavení měřicího přístroje (FFT analyzátoru) s ohledem na informace o konstrukci, provozních parametrech a otáčkách stroje.
- Provedení měření a uložení frekvenčního spektra do paměti analyzátoru. Vyhodnocení lze provést přímo na displeji analyzátoru nebo v aplikačním programu na počítači. Ve spektru se sleduje výskyt frekvencí a jejich amplitud.

Analýza frekvenčního spektra

Původ vibrací strojů je v silách, které vznikají při jejich provozu. Z toho je zřejmé, že každá frekvenční špička je odrazem těchto sil nebo jejich kombinace. Frekvenční spektra umožňují analyzovat vibrační amplitudy různých složek frekvenčního spektra. Sleduje se zejména výskyt očekávaných frekvencí, které charakterizují typ vady stroje a velikost amplitud na těchto frekvencích, která určuje závažnost vady. V některých případech jsou ve frekvenčním spektru přítomny jiné než očekávané frekvence. Ty je nutné analyzovat s velkou opatrností a pokud možno v kombinaci s jinými metodami a testy, protože mohou být odrazem strukturálních problémů stroje nebo vady měřicího řetězce.



Obr. 2.5.3.2 Příklad zobrazení frekvenčního spektra rotačního stroje s označením významných frekvencí

Kroky analýzy frekvenčního spektra vibrací rotačního stroje [6]:

- Analýza spektra obvykle začíná vyloučením budících frekvencí, které ve spektru nejsou přítomné. Všechny ostatní frekvence, které jsou ve spektru přítomny, jsou podrobeny analýze.
- V závislosti na provozních otáčkách stroje se identifikují harmonické frekvence otáček. Tyto frekvence se označují pomocí indexů 1x, 2x, 3x atd. nebo $1x f_{ot}$ atd.

Příklad:

Provozní otáčky indukčního elektromotoru n_s jsou $3000 \cdot \text{min}^{-1}$ a počet pólových dvojic $p = 1$. Jaká je základní harmonická frekvence otáček stroje? Pro výpočet využijeme vztah pro výpočet synchronních otáček [6]:

$$f_{ot} = \frac{p \cdot n_s}{60} [\text{Hz}] \quad (2.16)$$

$$f_{ot} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Pro elektromotor s otáčkami $3000 \cdot \text{min}^{-1}$ se základní otáčková frekvence $1x$ rovná 50 Hz.

Podle typu stroje se identifikují ostatní charakteristické frekvence jako jsou například:

- u čerpadel a ventilátorů frekvence průchodu lopatek oběžných kol se určí jako součin počtu lopatek a frekvence otáček stroje
- u ozubených převodů se určí zubové frekvence jako součin počtu zubů každého kola a frekvence jeho otáček
- u řemenových převodů se určí charakteristické frekvence na základě vzorců s využitím parametrů délky řemeny, průměrů řemenic a otáček hřídelí a frekvence otáček stroje
- u valivých ložisek se určí vadové frekvence na základě vzorců s využitím konstrukčních parametrů daného typu ložiska a frekvence otáček stroje

- u elektromotoru se určí tzv. drážkové frekvence rotoru a statoru jako součin počtu drážek a frekvence otáček stroje.

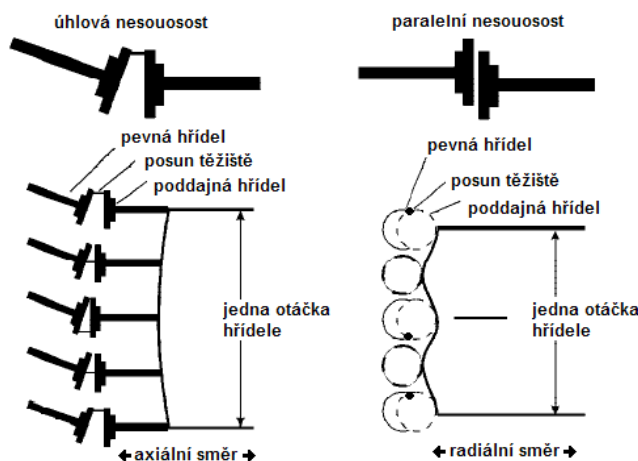
- Ve spektru se mohou objevit harmonické násobky frekvencí jednotlivých komponent stroje. V takovém případě je pravděpodobnost problému takové komponenty větší. Proto je nutné provést vyhledání těchto frekvencí.
- Pokud jsou ve spektru přítomny frekvence nesynchronní s otáčkami stroje a nepatří mezi frekvence komponent stroje, může se jednat o vibrace šířené z vedlejších strojů nebo to mohou být vlastní frekvence stroje či připojených částí (potrubí, základy apod.). Je nutné analyzovat původ těchto frekvencí.
- V případě, že se jedná o první měření stroje, slouží naměřená spektra jako výchozí pro sledování trendu. Pokud je měření opakované, vyhodnotí se amplitudy na významných frekvencích v trendu. Je nutné upozornit, že snížení amplitudy může být doprovázeno zhoršením stavu stroje v případě, že se změnila fáze vibrací. Z toho vyplývá důležitost měření fáze vibrací.

2.5.4 Příklady typických vad rotačních strojů a jejich projevy ve frekvenčních spektrech.

Nesouosost

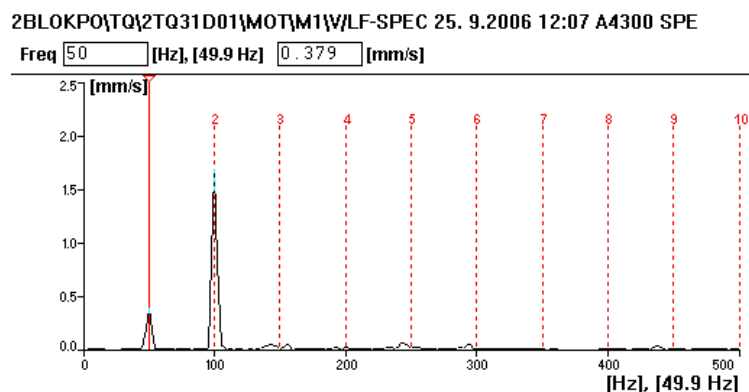
Nesouosost hřídelí [6] je velmi častý problém rotačních strojů. Stav nesouososti nastane tehdy, když hřídele, spojky nebo ložiska nejsou vyrovnány do osy. Existují dva problémy nesouososti – úhlová a paralelní, nebo jejich kombinace.

Při úhlové nesouososti vzniká v hřídeli ohybová síla. Při paralelní nesouososti jsou hřídele vzájemně posunuté. Příčiny lze najít v tepelné roztažnosti (stroje jsou vyrovnávány za studena a po prohřevu se projeví tepelná roztažnost a tím nadměrná nesouosost), silách přenášených od potrubí a podpor, nerovných základech a také ve špatné montáži. Na obr. 2.5.4.1, převzatém a upraveném podle [8], je zobrazeno chování hřídelí při nesouososti.



Obr. 2.5.4.1 Pohyb hřídelí při vadě nesouososti na spojení rotačního stroje

Problém nesouososti se ve frekvenčním spektru projevuje na základní otáčkové frekvenci $1x$ a na jejím druhém harmonickém násobku $2x$ [6].



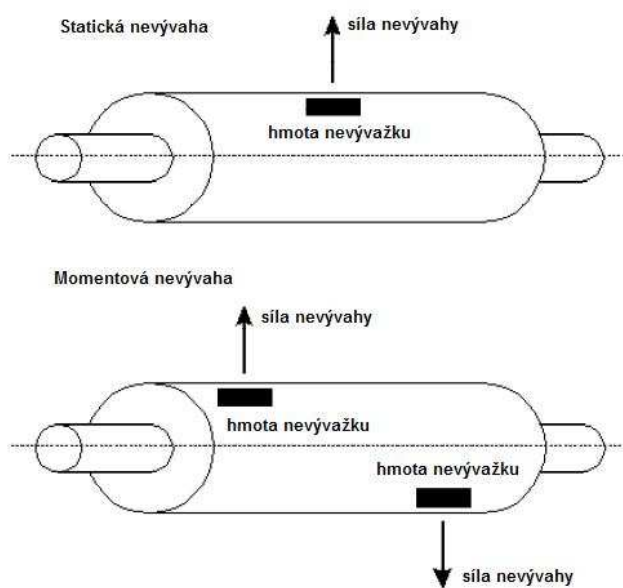
Obr. 2.5.4.1 Příklad frekvenčního spektra stroje s příznakem vady nesouososti

Nevývaha

Nevývaha [6] je téměř stejně častý problém rotačních strojů jako nesouosost. Stav nevyváhy nastane tehdy, když střední osa setrvačnosti hřídele není totožná s její geometrickou osou. Existují tři druhy nevyváhy - statická, momentová a dynamická (kombinace statické a momentové).

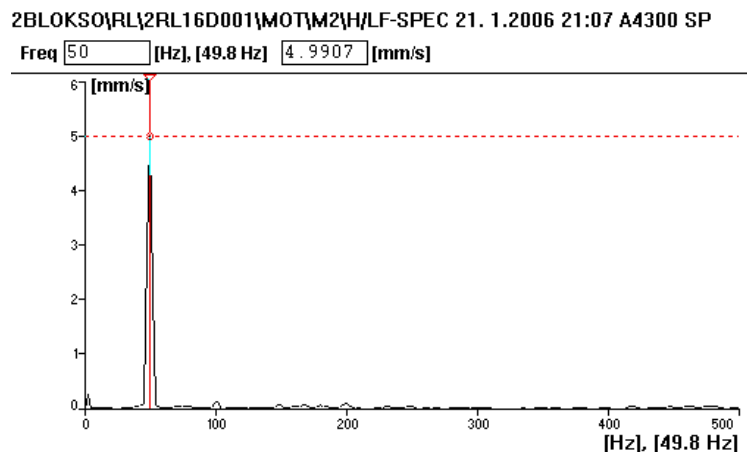
U statické nevyváhy působí jedna síla od hmoty nevyvážku. U dynamické nevyváhy dochází k působení dvou stejných hmot umístěných proti sobě o úhel 180° . Při otáčení hřídele posunují tyto síly rotor na obou koncích hřídele v opačném směru. Následkem toho rotor vykazuje házivost.

Příčiny nevyváhy jsou ve výrobních nepřesnostech, nestejném rozložení nánosů na lopatkách a rotorech nebo také po výměně jedné poloviny spojky a neprovedení vyvážení na vyvažovacím stroji. Na obr. 2.5.4.2, převzatém a upraveném podle [8], je zobrazeno rozložení hmoty nevyvážku na rotoru stroje.



Obr. 2.5.4.2 Rozložení hmot nevyváhy na rotoru rotačního stroje

Problém nevývahy se ve frekvenčním spektru projevuje na základní otáčkové frekvenci 1x jejíž amplituda je ve všech radiálních směrech stejná [6]. Má sinusový průběh a objevuje se jednou za otáčku hřídele. Spektrum neobsahuje další frekvence, pokud nejsou vibrace příliš silné nebo není současně na stroji další problém. Amplituda roste, pokud se otáčky blíží prvním kritickým otáčkám stroje.



Obr. 2.5.4.3 Příklad frekvenčního spektra stroje s příznakem vady nevývahy

Mechanické uvolnění

Mechanické uvolnění [6] se obecně projevuje jako sled vysokých amplitud na harmonických násobcích otáčkové frekvence nebo harmonických násobcích poloviny otáčkové frekvence.

Příčiny mechanického uvolnění jsou [6].:

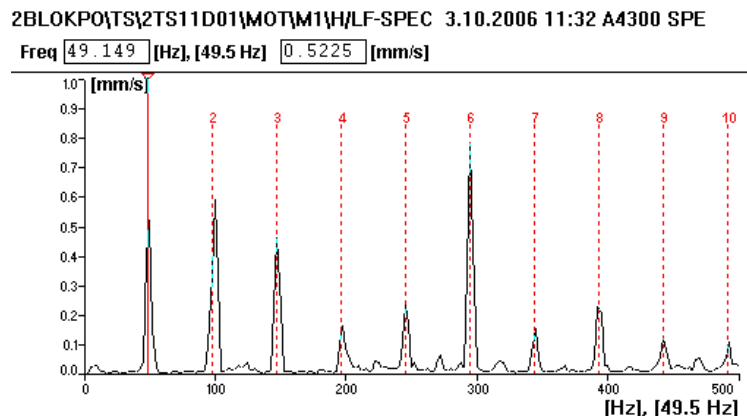
Problém uvolnění stroje od základu,

Problém uvolnění určité komponenty stroje,

Problém vady ložiska, která vede k opotřebení jeho elementů nebo uvolnění jeho uložení.

Mechanické uvolnění se ve frekvenčním spektru projevuje jako typická nevývaha, jen účinky jsou výraznější. Uvolnění některé komponenty stroje, např. lopatky kola ventilátoru, může být zjištěno změnou amplitudy na otáčkové frekvenci a/nebo změnou hodnoty fáze na této frekvenci.

Pro diagnostikování mechanického uvolnění se využívá měření frekvenčních spekter a fáze vibrací.



Obr. 2.5.4.4 Příklad frekvenčního spektra stroje s příznakem vady mechanického uvolnění

2.5.5 Metody pro určení stavu valivých ložisek

Vady ložisek rotačních strojů se objeví většinou z příčin [6]:

- Nesprávné montáže,
- Nedostatečného mazání nebo znečištění maziva,
- Přetížení v důsledku problémů rotačního stroje jako jsou nevyvaha, nesousost, mechanické uvolnění, provoz stroje mimo pracovní charakteristiku apod.,
- Opotřebení z důvodu vyčerpané životnosti,
- Z uvedených příčin vyplývá, že vada ložiska vzniká téměř výhradně v důsledku jiných problémů rotačního stroje.

Životnost ložiska podle [11] závisí na třech faktorech:

- únava povrchových ploch ložiska,
- nedostatečné mazání,
- nečistoty v ložisku, případně nesprávná manipulace nebo montáž.

Vývoj vady ložisek má počátek v únavě materiálu, následuje vznik smykového napětí a v důsledku toho trhliny v drahách ložiska. Průchodem valivých těles přes tyto trhliny dochází k uvolňování drobných částic a tím k jejich poškození drolením. Dalším typ poškození ložiska vzniká působením nadměrného dynamického zatížení nebo špatným mazáním. Vady ložisek se projevují zvýšenými vibracemi a hlukem. Úkolem vibrační diagnostiky je zachytit příznaky poškození ložisek dříve, než dojde k jejich úplnému zničení.

K zachycení vad ložisek využívá vibrační diagnostika metody jako jsou měření celkových (širokopásmových) hodnot vibrací, frekvenční analýza a metody detekce rázů a impulsů. Všechny metody vychází z poznatku, že vibrace vyvolané frekvencemi rázů se při odvalování těles v drahách poškozeného ložiska projevují na frekvencích těchto rázů včetně jejich harmonických a také na rezonančních frekvencích.

Měření širokopásmových hodnot vibrací valivých ložisek

V průmyslu se používá velké množství typů valivých ložisek, které pracují při různých provozních otáčkách. Z toho důvodu je obtížné určit předem metodu, která by univerzálně vyhodnocovala stav ložisek v každé konkrétní aplikaci. Výrobci přístrojů pro měření vibrací používají metody pracující na principu měření zrychlení vibrací v různých pásmech vysokých frekvencí. Pásma zahrnují frekvence od několika kHz až po stovky kHz. V těchto pásmech se obvykle snímá efektivní a špičková hodnota měřeného signálu a porovnává se trend a jejich vzájemný poměr. Vychází se z teorie, kdy poškozené ložisko generuje řadu impulsů zachytitelných rostoucí špičkovou hodnotou a kdy rozvinutá vada zvyšuje energii signálu a tím měřenou efektivní hodnotu. Vždy je nutné posuzovat konkrétní uložení ložiska a provoz stroje individuálně a důsledně

vyhodnocovat trendy od uvedení stroje do provozu. Častý provozní jev, kterým je přetížení ložiska, se v celkových hodnotách vibrací může projevit stejně jako poškozené ložisko. Diagnostik tak může doporučit výměnu zdánlivě poškozeného ložiska. Následně se při údržbě zjistí, že ložisko je v pořádku a neúspěch diagnostiky je zaručen včetně zbytečně vynaložených nákladů na demontáž a montáž stroje. K omezení nesprávného stanovení diagnózy je vhodné používat současné více metod pro detekci stavu ložisek, které dovolují oddělit jejich vady od jiných vlivů včetně přetížení vznikajícího hlavně nesprávným provozováním strojů. V případě použití více diagnostických metod hovoříme u multiparametrickém monitorování stavu [8].

Obálková analýza

Metoda obálkové analýzy [6] (anglicky envelope analysis) umožňuje detekovat opakující se rázy vznikající ve valivém ložisku. Principem je odfiltrování nízkofrekvenčních složek nesouvisejících s opakujícími se rázy z vysokofrekvenčního signálu. V časovém průběhu obálky rychlosti nebo zrychlení jsou pak zobrazeny periody rázů a ve frekvenčním spektru obálky budící frekvence rázů. Budící frekvence rázů, také nazývané poruchové frekvence, lze u valivých ložisek vypočítat na základě empirických vztahů [6] pro jednotlivé komponenty ložiska. Potřebné parametry ložisek pro výpočet je možné získat od výrobce nebo jsou obsaženy ve vyhodnocovacích programech dodávaných s měřicími přístroji pro diagnostiku.

Poruchová frekvence vnějšího kroužku

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot f_{ot} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \alpha\right) \quad (2.17)$$

Poruchová frekvence vnitřního kroužku

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot f_{ot} \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \alpha\right) \quad (2.18)$$

Poruchová frekvence valivého elementu

$$BSF = \frac{n}{2} \cdot f_{ot} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha\right] \quad (2.19)$$

Poruchová frekvence klece

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot f_{ot} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \alpha\right) \quad (2.20)$$

kde:

BPFO je poruchová frekvence vnějšího kroužku (**B**earing **P**ass **F**requency **O**uter);

BPFI poruchová frekvence vnitřního kroužku (**B**earing **P**ass **F**requency **I**nnner);

BSF poruchová frekvence valivého elementu (**B**all **S**pin **F**requency);

FTF poruchová frekvence klece (**F**undamental **T**rain **F**requency);

n počet valivých elementů;

BD	průměr valivého elementu (B all D iameter);
PD	roztečný průměr ložiska (P itch D iameter);
f_{ot}	otáčková frekvence;
α	stykový úhel.

2.5.6 Analýza výchylky a orbity hřídele

V kapitole 2.3.1 bylo uvedeno, že měření relativního pohybu hřídele je jeden ze tří základních typů měření vibrací. V analýze výchylky a orbity hřídele se využívá měřeného signálu relativního pohybu hřídele rotoru ve vztahu k ložiskové pánvi a to z jednoho nebo dvou snímačů. Měření relativních vibrací hřídelí je lepší pro posouzení technického stavu stroje než měření na nerotujících částech (stator, vnější části ložiskových domků). Lze kontrolovat radiální vůle v ložiscích nebo mezi rotorem a statorem, relativní posuvy hřídele v axiálním směru a tím chránit stroje před zvýšeným kinetickým namáháním při ustáleném chodu a přechodových dějích (např. přechod přes kritické otáčky). Na druhou stranu má toto měření vyšší nároky na instalaci snímačů a provozní spolehlivost měřících tras zařazených často do zabezpečovacích systémů. Používá se zejména u velkých rotačních strojů jako jsou turbosoustrojí nebo velká čerpadla a elektromotory s kluznými ložisky v rámci on-line diagnostických systémů.

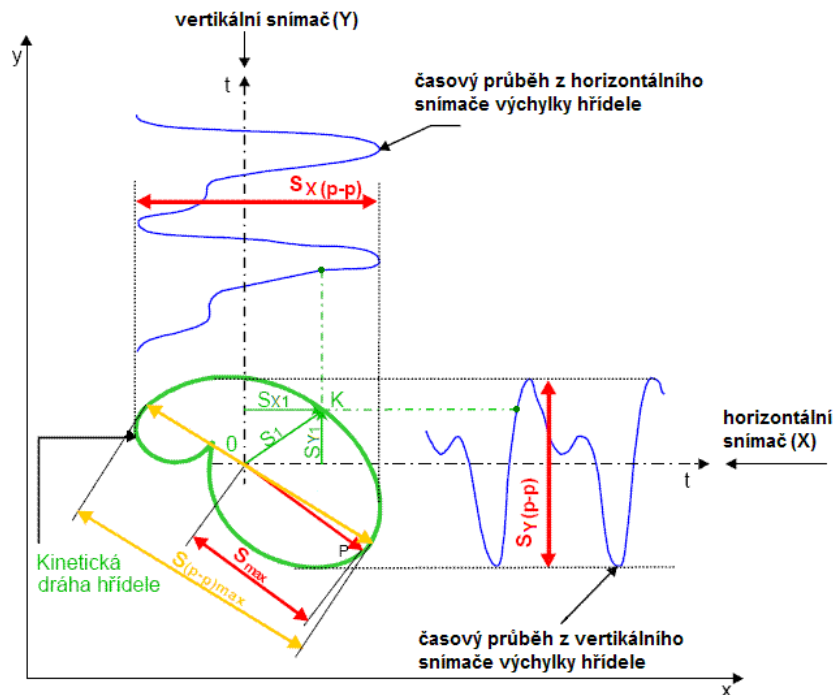
Analýza výchylky hřídele

Pro analýzu výchylky hřídele se využívá měření hodnoty S_{max} , která představuje maximální hodnotu výchylky hřídele a hodnoty S_{p-p} , která představuje výchylku špička-špička ve směru měření. Při vyhodnocení se využívá časové změny kinetické dráhy hřídele v ložisku, která se mění v závislosti na působení sil na rotor. Měření se provádí bezdotykově pomocí snímačů výchylky pracujících na principu vířivých proudů (anglicky eddy current snímače). Analýza výchylky relativních vibrací se nejlépe uplatňuje u strojů s pružnými nebo relativně lehkými rotory.

Na obr. 2.5.6.1, převzatém a upraveném podle [12], jsou označeny měřené veličiny výchylky relativních vibrací hřídele kde:

S_{max} je maximální hodnota výchylky hřídele v měřené rovině [μm];

$S_{x(p-p)}$, $S_{y(p-p)}$ rozkmit výchylky (dráhy vibrací) ve směru x resp. y. Označuje se také jako dvojitá amplituda nebo hodnota špička-špička.



Obr. 2.5.6.1 Příklad kineze dráhy hřídele a příslušných výchylek ve dvou navzájem kolmých směrech v radiální rovině

Vyhodnocení relativní výchylky vibrací hřídelí lze provádět ze dvou hledisek:

- Relativní vibrace nesmí překročit stanovené hodnoty dané většinou předpisem výrobce nebo odkazem na normu.
- Změna relativních vibrací, vztažená na výchozí úroveň, nesmí překročit určitou mez.

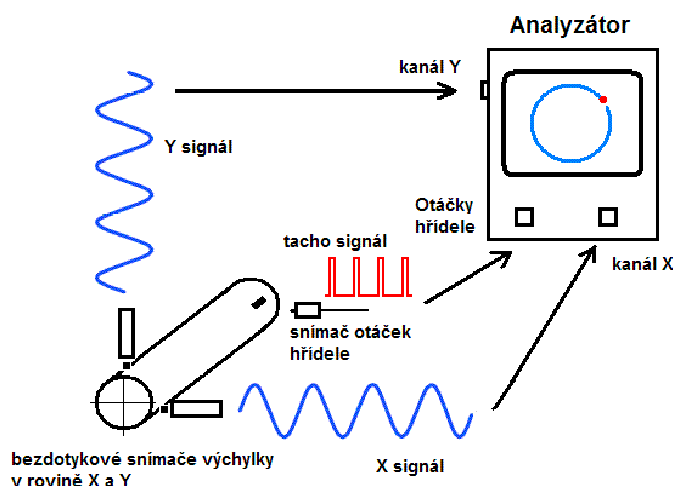
Analýza orbitu hřídele

Orbit je název pro zobrazení pohybu středu hřídele v kartézských souřadnicích za jednu či více otáček kolem statické polohy hřídele [12]. Zobrazení orbitu je ekvivalentní k Lissajousovým obrazcům, viz obr. 2.5.6.2, převzatý a upravený podle [12]. V obou případech se jedná o zobrazení dvou signálů, jejichž frekvence jsou v poměru celých čísel (např. 1:1, 1:2). V diagnostice rotačních strojů jsou těmito frekvencemi harmonické násobky otáčkové frekvence stroje. Orbit je výsledkem měření v časové oblasti prostřednictvím dvou navzájem kolmých snímačů výchylky umístěných v radiální rovině. Snímače pracují na principu vířivých proudů (eddy current snímače) a na výstupu dávají modulovaný proudový signál, který nese informaci o poloze (stejnoseměrná složka) a vibracích (střídavá složka) hřídele v ložisku a také o relativní fázi vibrací mezi dvěma místy na stroji. Současné provádění měření otáček hřídele poskytuje synchronizační impuls jednou za otáčku pro vyhodnocení pohybu hřídele vůči směru otáčení.

Vyhodnocení orbitu

Aplikace analýzy orbitu jsou při detekci problémů hřídelí (např. excentricita, trhliny), závad kluzných ložisek a ucpávek, tloušťky olejového filmu apod.

Z tvaru orbitu lze usuzovat na směr působení radiálních sil v ložisku. Například při problému narůstající nesouososti se základní kruhový tvar s převažujícím vlivem sil nevyváhy mění vlivem působení sil od nesouososti na tvar eliptický. Pokud velikost sil nesouososti roste, orbit se dále zplošťuje a může dokonce nabýt tvaru připomínající číslo osm.



Obr. 2.5.6.2 Zobrazení pohybu středu hřídele kolem jeho statické polohy během otáčení tzv. orbitu.

3 POPIS MĚŘÍCÍCH DIAGNOSTICKÝCH SYSTÉMŮ ON-LINE, OFF-LINE

3.1 Typy měřících diagnostických systémů

Měřící diagnostické systémy se dělí na tři základní skupiny [9]:

- Trvale instalované nazývané on-line,
- Přenosné (mobilní) nazývané off-line,
- Kombinace on-line a off-line systémů nazývané semipermanentní (semi on-line).

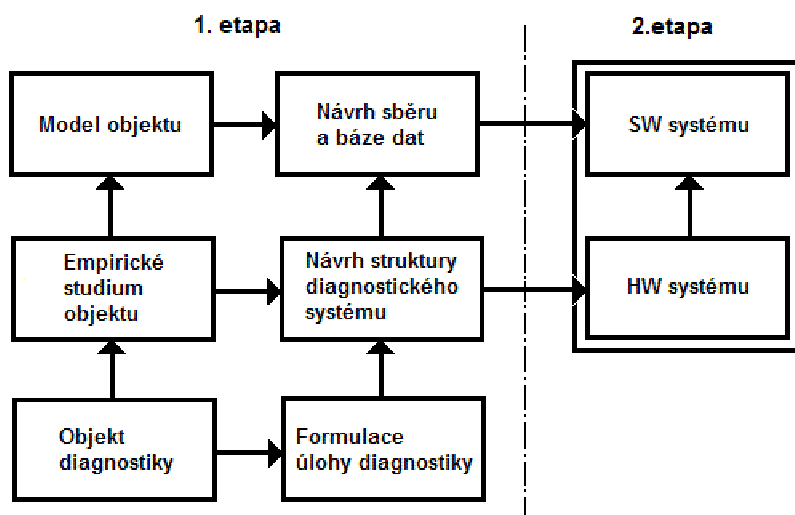
On-line měřící diagnostické systémy jsou takové, které používají trvale instalované snímače, obvody pro úpravu signálu a zařízení pro zpracování, analýzu a uložení dat. Data mohou být sbírána kontinuálně nebo periodicky. Řízení měřícího systému a vyhodnocení dat provádí řídicí a aplikační programy na řídicím a vyhodnocovacím počítači. On-line systémy obvykle plní také funkci zabezpečení provozu stroje. Uplatnění nachází u nejdůležitějších, nejdražších a nezálohovaných strojů. Je to neúčinnější, ale zároveň nejdražší způsob monitorování vibrací.

Off-line měřicí diagnostické systémy jsou takové, které používají přenosné měřicí přístroje a snímače. Signály jsou snímány periodicky a zpracovány přenosným měřicím přístrojem včetně uložení do paměti. Analýza a vyhodnocení se provádí přímo v měřicím přístroji nebo v aplikačním programu na počítači. Off-line systémy se používají u méně významných strojů a také jako doplněk on-line monitorování. Off-line systémy neplní funkci zabezpečení provozu stroje. Naopak velmi dobře se uplatňují při provozním vyvažování strojů a zjišťování dynamických vlastností strojů.

Semipermanentní měřicí diagnostické systémy jsou takové, které využívají kombinace on-line a off-line systému. Snímače jsou obvykle trvale nainstalovány a ostatní obvody a přístroje pro sběr a zpracování signálů jsou připojovány periodicky.

3.2 Projektování diagnostických systémů

Rozhodování o výběru a aplikaci diagnostického systému se musí opírat o dokonalou znalost diagnostikovaného objektu a požadované činnosti, které má systém plnit. Obě položky jsou podkladem pro návrh struktury i projektu diagnostického systému podle postupového plánu na obr. 3.2.1 převzatého podle [1]. V 1.etapě řešení se vychází ze studia diagnostikovaného objektu a formulace úlohy diagnostiky, z nichž vyplývá návrh struktury systému. V další fázi je vypracován model objektu a návrh sběru a báze dat. Na základě ukončené 1.etapy je vypracován v 2.etapě vlastní projekt diagnostického systému s členěním na HW prostředky (snímače, přenosové trasy, jednotky zpracování dat, paměti) a SW vybavení (programy řízení, vyhodnocení a servisu diagnostiky).



Obr. 3.2.1 Postupový plán řešení diagnostického systému

3.3 Popis měřicího diagnostického systému on-line

Obecný popis měřicího diagnostického systému on-line a faktory pro jeho výběr a aplikaci byly uvedeny v kapitolách 3.1 a 3.2. Návrh a realizace konkrétního on-line systému vychází jak

z požadavků a doporučení norem [9], tak i ze zkušeností s provozem a konzultací s výrobcí měřeného rotačního stroje. Normy doporučují použití obvyklých metod hodnocení stavu a prvků systému a nevyklučují nasazení nově vyvíjených metod a technických řešení sběru, analýzy, zobrazení měřených dat.

3.3.1 Příklad on-line měřicího diagnostického systému

V této kapitole je na obecném příkladu typického turbosoustrojí uveden popis on-line měřicího diagnostického systému. Popis lze provést s využitím postupového plánu řešení diagnostického systému uvedeného v kapitole 3.2.

1. etapa projektu diagnostického systému:

Diagnostikovaný objekt

Diagnostikovaným objektem je turbosoustrojí. Tento horizontální rotační stroj sestává z jednotlivých komponent, kterými jsou natáčedlo, vysoko a středotlaká část turbíny, nízkotlaká část turbíny, generátor, budič.

Formulace úlohy diagnostiky

Úlohou diagnostiky turbosoustrojí je trvale monitorovat vibrace skříňe a hřídele včetně polohy rotoru v ložiscích, sledovat relativní posuvy rotoru a axiální polohu hřídele, posuv skříňe a sledovat otáčky.

Empirické studium objektu

Patří sem definování modelu objektu na základě studia průvodní technické dokumentace, jeho strukturování na komponenty, ložiskové uzly, spojky, určení provozních režimů a možných poruch. Výsledkem studia objektu je stanovení výběru diagnostických signálů a měřících míst.

Model objektu

Model objektu turbosoustrojí je sestavený na základě jeho studia a zadání diagnostikované úlohy. Na obr. 3.3.1.1, převzatém a upraveném podle [13], jsou schematicky uvedena umístění snímačů diagnostického systému a diagnostické veličiny.

Projekt programového vybavení systému (SW) zachycuje tvorbu a dokumentaci programů (programy řízení, vyhodnocení a servisu diagnostiky).

3.3.2 HW části on-line diagnostického systému

On-line systém lze sestavit z částí [3]:

a) Část systému pro snímání a úpravu signálu

Do části systému pro snímání a úpravu signálu patří snímače absolutních a relativních vibrací, snímače roztažnosti skříně, snímače relativního posunutí, snímače axiální polohy, snímače excentricity, snímače otáček, předzesilovače, kabely, propojovací skříně a napájení systému.

b) Část systému pro zpracování a vyhodnocení diagnostických veličin

Patří sem moduly na digitalizaci vstupních signálů a vyhodnocení časových průběhů, frekvenčních spekter a fází vibrací. Tyto moduly jsou propojeny s řídicím počítačem s vyhodnocovacím a komunikačním programovým vybavením. Komunikace probíhá prostřednictvím sběrnic (např. LAN). Řídicí program aktivuje měřící systém podle stanoveného zadání, provádí konfiguraci a testování měřících kanálů. Dále je systém vybaven skříněmi s napájecími a ochrannými moduly.

3.3.2.1 Snímače diagnostických veličin

Monitorování polohy rotoru a statoru

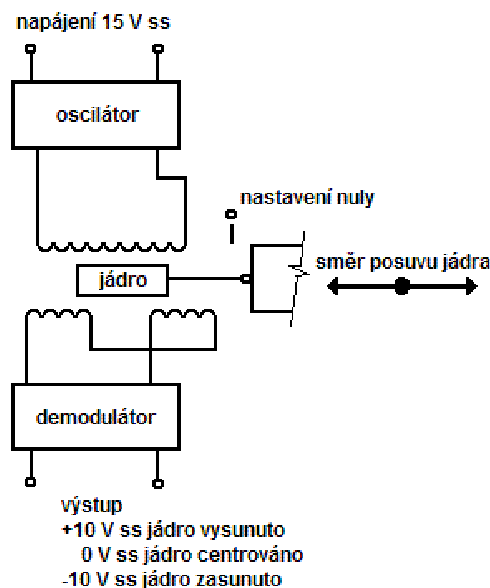
Výrobci turbín konstruují s ohledem na maximální účinnost tyto stroje z velmi malými vnitřními vůlemi. Při najíždění nebo odstavení turbíny se vlivem teplotní roztažnosti tyto vůle mění. Správná volba a instalování snímačů relativního posuvu může poskytnout informace o přesné poloze rotujícího hřídele v ložiskové skříně. Používají se bezdotykové snímače pracující na principu vířivých proudů pro měření vůle axiálního ložiska. Aby bylo zajištěno monitorování pro účely zabezpečení stroje, jsou prováděna ještě další měření roztažnosti skříně a relativního posunu skříně a rotoru.

Posuv skříně

Turbínové skříně jsou často připevněny k základům v oblasti výstupního hrdla. Turbína a generátor se teplotně roztahují od tohoto bodu připevnění. Roztažnost je umožněna v axiálním směru prostřednictvím axiálního ložiska. Pro měření roztažnosti se používají snímače namontované na základu turbíny a pracující na principu lineárního diferenciálního transformátoru LVDT (anglicky **L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer) uvedeného na obr. 3.3.2.1.1, který je převzatý a upravený podle [13].

Snímač LVDT je elektromechanické zařízení, které dává na výstupu ss napětí, úměrné poloze pohyblivého jádra v tělese cívky. Posunutí jádra, sledujícího pohyb skříně turbíny, ze střední polohy způsobí elektromagnetickou nevyváhu v sekundárních cívkách a vznik výstupního

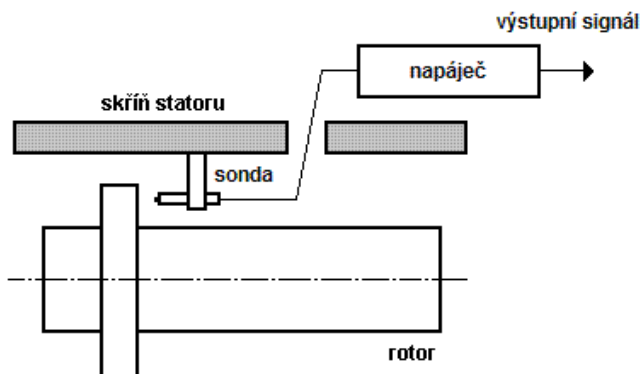
nenulového napětí. Toto napětí je úměrné velikosti posunu jádra a podle jeho směru je kladné nebo záporné.



Obr. 3.3.2.1.1 Schéma činnosti lineárního diferenciálního transformátoru

Relativní posuv

Rotor turbíny je uchycen v axiálním ložisku, které při působení roztažnosti pohybuje spolu s předním ložiskovým stojanem. Pro zabránění axiálního kontaktu lopatek kola se skříň je důležité, aby roztažnost rotoru a skříňe statoru narůstala stejnou rychlostí. Pro měření relativního posuvu se používají bezdotykové sondy upevněné na skříni, které měří vzdálenost vůči rotoru, jak je uvedeno na obr. 3.3.2.1.2 převzatém a upraveném podle [13]. Tím je zajištěno měření rozdílu mezi rotorem a skříňí při jejich roztahování. Bezdotyková sonda, pracující na principu vířivých proudů, je namontována rovnoběžně s hřídelí a měří vzdálenost k ploše, která je k hřídeli kolmá. Změna axiální polohy rotoru vůči skříni turbíny je vyjádřena přímo stejnosměrnou složkou signálu.



Obr.3.3.2.1.2 Schéma činnosti sondy relativního posuvu

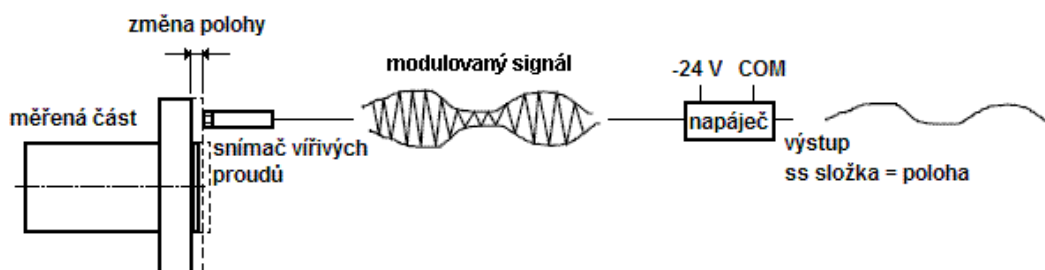
Axiální poloha hřídele

Axiální vůle v axiálním ložisku turbíny je normálně velmi malá. Provoz v mezích této axiální vůle se předpokládá a je normální. Problém nastává v případě poruchy axiálního ložiska, která se

může plně rozvinout v čase několika desítek sekund. Z toho důvodu je nutné nastavit zabezpečovací systém turbíny tak, aby dokázal zachránit část kompozice ložiska a tím zamezit axiálnímu kontaktu s rozváděcími koly. Tyto požadavky plní sonda axiální polohy hřídele uvedená na obr. 3.3.2.1.3 převzatého a upraveného podle [13]. Pro dokonalou funkci zabezpečení a zamezení falešných alarmů nebo v případě výpadku jedné sondy se používá řešení s dvěma sondami s rozhodovací logikou v monitoru polohy.

Sondy axiální polohy hřídele jsou elektromagnetická zařízení která pracují na principu vířivých proudů. Jejich činnost spočívá v převodu velikosti mezery mezi vodivou komponentou a snímačem na stejnosměrné napětí. Sonda využívá k provozu napáječe se kterým je propojena kabelem. Sondu tvoří jednovrstvá cívka uzavřená v odolném pouzdru se závitem. Napáječ tvoří oscilátor/demodulátor, který dodává vysokofrekvenční signál (cca 1,5 MHz) pro cívku a na výstupu dává demodulované stejnosměrné napětí, úměrné vzdálenosti tj. velikosti polohy.

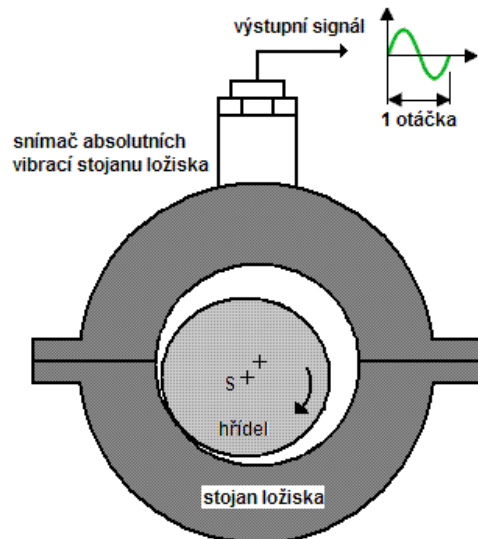
Vysokofrekvenční signál z napáječe budí cívku a vytváří magnetické pole na hrotu sondy. Vířivé proudy, indukované v měřené komponentě, odebírají energii budícímu signálu a zmenšují jeho amplitudu tím více, čím je blíže měřená komponenta k sondě. Výstupní stejnosměrné napětí z demodulátoru je úměrné amplitudě budícího signálu. Systém musí být cejchován s ohledem na elektrickou vodivost měřené komponenty tak, aby se mohla nastavit správná citlivost a lineární rozsah.



Obr. 3.3.2.1.3 Schéma činnosti jedné sondy pro statické měření polohy

Absolutní vibrace statoru

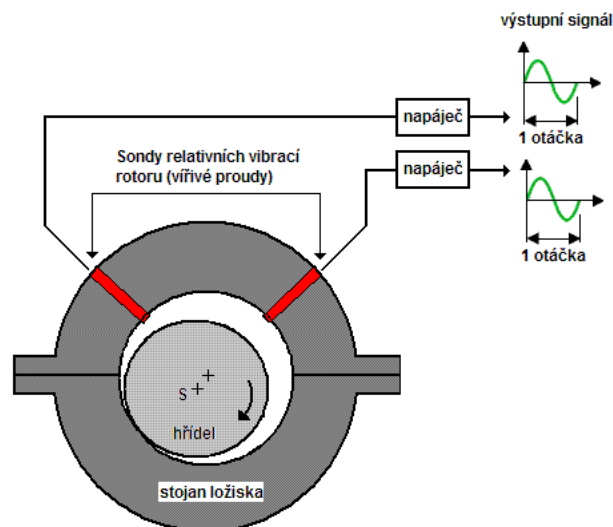
Měří se vibrace konstrukce (strukturní vibrace) nebo ložiskových stojanů jako odezva na budící síly. Tato odezva je ovlivňována dynamickými vlastnostmi systému hřídele a jeho skříně a jejími změnami v závislosti na parametrech stroje. Výstup z tohoto měření se nepoužívá pro zabezpečení a tím odstavení turbíny, ale je využitelný v diagnostickování stavu (frekvenční spektrum a trendy). Pro měření se používá snímač rychlosti nebo zrychlení uvedený na obr. 3.3.2.1.1, který je převzatý a upravený podle [13].



Obr.3.3.2.1.4 Snímač absolutních vibrací pro měření pohybu víka stojanu ložiska

Relativní vibrace rotoru

Bezkontaktní sondy, které pracují na principu vířivých proudů, lze využít pro měření vibrací rotoru vyjádřených jeho relativním pohybem v ložisku. Na rozdíl od relativního posuvu se při tomto měření hřídel pohybuje relativně vůči sondě a vířivé proudy, indukované v měřeném místě na hřídeli, budou měnit amplitudu v signálu se stejnou frekvencí, jakou má pohyb hřídele. Na výstupu z napáječe je stejnosměrný signál, který se mění úměrně s hodnotou rozkmitu výchylky a se stejnou frekvencí, jakou má pohyb hřídele. Sondy se montují do stojanu ložiska v místě upravené plochy na hřídeli. Obvyklé je provedení s dvěma sondami posunutými proto sobě o úhel 90°, jak je uvedeno na obr. 3.3.2.1.5 převzatého a upraveného podle [13]. Toto řešení umožňuje plně využít schopnosti on-line diagnostického systému. Výstupní signály z obou sond lze vyhodnotit pomocí Lissajousových obrazců jako orbit a tím popsat pohyb osy hřídele v ložisku. Střední hodnota napětí obou sond dává informaci o fyzické poloze hřídele v ložisku.

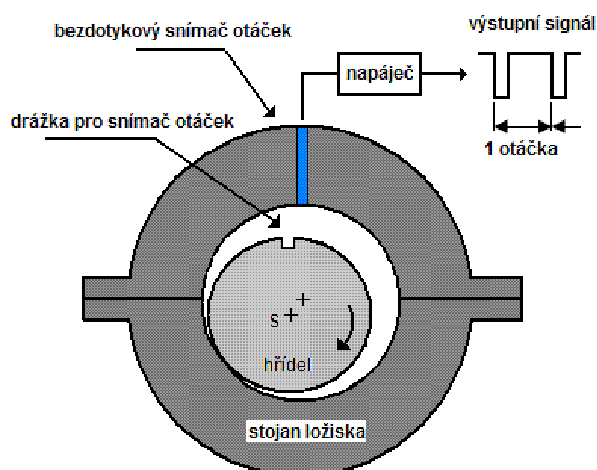


Obr.3.3.2.1.5 Snímače na principu vířivých proudů pro měření relativních vibrací rotoru

Snímač otáček

Přesné měření otáček turbosoustrojí je velmi důležité pro monitorování stavu při najíždění a doběhu a také při sledování provozu na natáčedle při chladnutí nebo ohřevu. Synchronní měření otáček a vibrací umožňuje identifikovat kritické otáčky a zjišťovat závady, které mají vazbu na otáčky (analýza na harmonických frekvencích, filtrování vibrací nesynchronních s otáčkami, využití při vyvažování). Měřicí modul pro monitorování otáček hřídele detekuje jeden puls nebo řadu pulsů za každou otáčku a zobrazuje tyto otáčky v jednotkách ot.min^{-1} nebo Hz. Signál otáček se získává z bezdotykového snímače (anglicky nazývaný keyphasor), který sleduje jeden nebo několik drážek či výčnělků na hřídeli, které nazýváme značkou. Značka musí být dostatečně zahlubená nebo vystouplá, aby dávala jediný puls odpovídající napětí alespoň 5 V. Při nastavení systému je nutné zajistit referenční nulovou hodnotu značky pro možnost jejího použití pro měření fáze vibrací. Snímač otáček je uveden na obr. 3.3.2.1.6 převzatém a upraveném podle [13].

Snímání otáček může být prováděno také pomocí optické sondy, která sleduje změnu odrazivosti povrchu hřídele. Značku v takovém případě tvoří nalepená páska s odrazivou plochou.



Obr.3.3.2.1.6 Generování signálu od drážky pro snímač otáček

3.3.2.2 Komponenty pro zpracování a vyhodnocení diagnostických veličin

Signály diagnostických veličin je nutné ze snímačů přivést ke zpracování a vyhodnocení. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují systémy, které jsou navrhovány jako modulární a tím umožňují sestavit optimální konfiguraci pro požadovanou aplikaci. V následujícím seznamu je uveden návrh takové konfigurace [14] pro příklad turbosoustrojí z kapitoly 3.3.1.

Základní modul

Modul zajišťuje měřicí a vyhodnocovací funkce a také komunikaci mezi jednotlivými moduly systému. Z hlediska měření je základní modul autonomní a umožňuje zpracovávat vstupní vibrační signály. Mezi základní vlastnosti a použití modulu patří možnost kontinuálního porovnávání naměřených hodnot s nastavenými limity pro různé procesní stavy stroje. Například při rozběhu

turbíny lze pro oblast přechodu přes kritické otáčky nastavit limitní hodnoty na vyšší úrovni. Pro tyto účely je systém vybaven binárními vstupy, které využívají signály z informačních systémů řízení provozu. Pokud se na vstupu objeví napětí určité úrovně, začne systém pracovat s určenými limitními hodnotami. Naměřené hodnoty lze využít rovněž pro další zpracování pomocí proudových smyček (4÷20) mA. Měření lze provádět postupně nebo kontinuálně. Vnitřní program kontroluje, zda funkce modulu pracují správně a v případě vady (např. detekce přerušení kabelu ke snímači) hlásí stav poruchy.

Rozšiřující modul měřících kanálů včetně přepínače

Modul plní funkci programovatelného přepínače vstupních měřících kanálů a umožňuje rozšířit základní modul o další kanály. Základní modul provádí řízení a měření a může obsloužit až 8 rozšiřujících modulů. Celkem lze zpracovávat až 64 měřících kanálů.

Měřicí cyklus probíhá neustále na všech aktivních měřících kanálech včetně přenosu a archivace naměřených hodnot.

Komunikační modul

Tento modul je vždy součástí on-line systému. Umožňuje komunikaci s externím počítačem pro potřeby nastavení systému pomocí řídicího programu přes komunikační rozhraní např. RS-232. Modul také přenáší naměřená data do nadřazených systémů a umožňuje připojení externí off-line analyzátor pro další analýzy vibračních signálů. Přenos na větší vzdálenosti probíhá pomocí převodníků např. RS-232 – proudová smyčka 20 mA nebo síť LAN.

Napájecí modul

Modul slouží k napájení systému stabilizovaným napětím např. 5 V. Jsou-li v sestavě systému použity výstupní proudové smyčky 4-20 mA, je nutné k jejich napájení použít jiný napájecí zdroj. Pokud budou tyto smyčky napájeny přímo ze sestavy on-line systému, musí být zaveden zdroj s napětím z řady 12, 15, 18 nebo 24 V_{ss}. Toto napětí lze využít k napájení výstupních relé nebo binárních vstupů modulu.

Paměť

Modul slouží k ukládání naměřených dat do interní paměti nebo na přenosnou paměťovou kartu. Ukládání dat pracuje na principu zápisu až do naplnění kapacity paměti a poté jejího cyklického přepisování nebo ukládání na základě definovaného algoritmu. Algoritmus je navržen tak, aby při stabilitě naměřených dat prováděl jejich ředění a ukládání probíhalo jen v definovaných intervalech. Naopak při náhlé změně měřené veličiny ukládá veškerá data a to i z časového úseku před výskytem změny. K tomu je využívána další paměť pro dočasné ukládání dat.

Modul relé

Modul je vybaven signalizačními relé pro dva stavy Varování a Nebezpečí, která po sepnutí signalizují překročení předem nastavených limitních hodnot. Pro každý měřicí kanál lze uživatelsky nastavit vlastní limitní hodnoty.

Modul proudových smyček

Modul obsahuje proudové smyčky (4÷20) mA pro výstup měřených statistických hodnot. Pomocí řídicího programu lze nastavit individuálně každou proudovou smyčku a její převodní parametry.

Modul měření otáček

Modul umožňuje připojit snímače otáček do sestavy on-line systému. V případě turbosoustrojí postačuje použít jeden snímač otáček. Pomocí řídicího programu lze provést nastavení parametrů snímače (např. počet pulsů za otáčku) a jeho přiřazení k měřicímu kanálu.

Modul převodníků

Modul obsahuje:

- galvanicky oddělený převodník sériového rozhraní RS-232 – proudová smyčka 20 mA pro připojení sestavy on-line systému ke vzdálenému počítači. Toto připojení umožňuje nastavování sestavy pomocí programu ze vzdáleného počítače a přenos naměřených dat po sériové lince.
- převodník RS-232 – LAN pro připojení sestavy on-line systému ke vzdálenému počítači. Toto připojení umožňuje nastavování sestavy pomocí programu ze vzdáleného počítače a přenos naměřených dat po síti LAN.

3.3.2.3 Vyhodnocovací program

Vyhodnocovací program on-line diagnostického systému musí zpracovat a vyhodnotit signály měřené snímači v HW části systému. Data mohou být analyzována a prezentována v mnoha formátech, které se vytvářejí v době sejmutí referenčních dat. Tyto formáty zahrnují podle [9] sledování trendů širokopásmových hodnot, analýzu frekvenčních spekter, trendování spektrálních dat pro diskrétní frekvence, sledování spektrálních dat v omezených frekvenčních pásmech nebo úzkopásmových frekvenčních dat, analýzu kaskád spekter, Bodeovy grafy, Nyquistovy grafy, vektorovou analýzu, analýzu orbit hřídele.

Programy on-line systémů jsou vybaveny také volbou redukce dat tj. na základě výskytu významných změn umožňují provést uložení dat s nastavitelnou redukcí. Účelem je uchovat historická data v omezeném množství a přesto při překročení zvolené úrovně mít uložen dostatečně dlouhý úsek dat pro pozdější analýzu. Další možností programu je schopnost analyzovat naměřená data na základě expertních pravidel. Výsledkem jsou diagnózy příčin vibrací stanovené s určitou mírou pravděpodobnosti.

3.4 Popis měřicího diagnostického systému off-line

Off-line měřicí diagnostické systémy se podle konstrukce a použití dělí na:

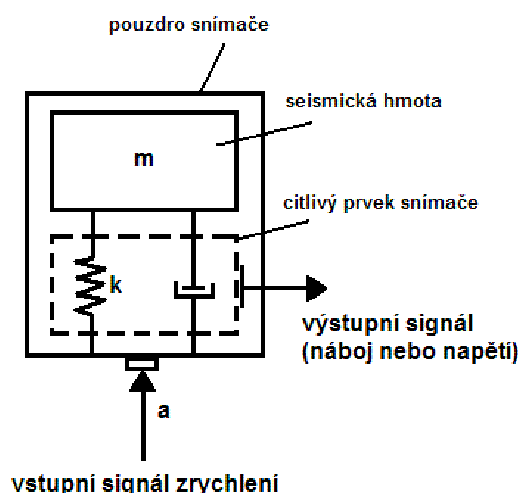
- Měřicí přístroje jednoúčelové pro měření jedné veličiny vibrací se zobrazením naměřené hodnoty na displeji.
- Měřicí přístroje pro záznam a analýzu naměřených dat.

V obou případech se systém skládá ze dvou základních částí: ze snímače vibrací, který přeměňuje vibrace na elektrický signál a z měřicího přístroje, který signál ze snímače zpracovává a vyhodnocuje. Jako snímače vibrací se používají převážně snímače zrychlení (tzv. akcelerometry) nebo snímače rychlosti. Měřicí přístroje se dělí na jednoúčelové vibrometry se schopností měřit a zobrazit jednu veličinu a na složité přístroje typu měřících magnetofonů a frekvenčních analyzátorů.

3.4.1 Snímače zrychlení

Snímače zrychlení (akcelerometry) jsou nepoužívanější snímače v diagnostice rotačních strojů pro měření absolutních vibrací. Měří vibrace konstrukcí (strukturní vibrace) nebo ložiskových stojanů jako odezvu na síly, které budí samotný stroj nebo jeho okolí např. připojená potrubí a základy.

Princip činnosti snímačů zrychlení spočívá v převodu zrychlení a na sílu F prostřednictvím tělesa o hmotnosti m působícího ve snímači jako citlivý prvek. Přitom dochází k mechanickému napětí (deformaci) prvku a změně jeho elektrických vlastností. Největší význam v technické praxi mají piezoelektrické snímače, kde citlivým prvkem je monokrystal křemíku nebo v levnějším provedení polarizovaný keramický materiál. Schéma piezoelektrického snímače vibrací, uvedeném na obr. 3.4.1.1 převzatém a upraveném podle [8], kde je zobrazena zatěžující hmota m , citlivý prvek (piezokrystal) a přítlačná pružina s tuhostí k .



Obr. 3.4.1.1 Principiální schéma snímače zrychlení (akcelerometru)

Piezoelektrický snímač zrychlení se vyznačuje velmi dobrou linearitou v širokém rozsahu měřené veličiny, širokým frekvenčním rozsahem, vysokým dynamickým rozsahem, nízkou hmotností a robustní konstrukcí. Důležitým parametrem snímačů je citlivost. Ta může být nábojová nebo napěťová. Nábojová citlivost se vyjadřuje v jednotkách elektrického náboje na jednotku zrychlení pC/m.s^{-2} a napěťová citlivost se vyjadřuje v jednotkách napětí na jednotku zrychlení mV/m.s^{-2} .

3.4.1.1 Snímače zrychlení typu ICP®

Snímače zrychlení typu ICP® jsou akcelerometry s vestavěným zesilovačem. Pro zajištění kompatibility připojení k přístrojům různých výrobců využívají tyto akcelerometry technologii ICP® (Integrated Circuit Piezoelectric je technologie firmy PCB Piezotronics, Inc.), [15]. Snímače pracují tak, že přeměňují výstupní náboj piezokrystalu o vysoké impedanci na signál napětí s nízkou impedancí, který může být přenášen na dlouhé vzdálenosti. Vestavěný obvod je napájen zdrojem konstantního proudu, jehož parametry jsou technologií ICP® definovány velikostí konstantního proudu (musí být v rozsahu 2÷20 mA) a hodnotou stejnosměrného napájecího napětí (musí být mezi 18-30 V). Zdroj může být součástí přístroje nebo samostatnou částí. V současnosti jsou ve většině průmyslových aplikací preferovány právě akcelerometry typu ICP®. Použití akcelerometrů s nábojovým výstupem může ovšem být v některých aplikacích výhodnější. Následující tabulka č.1 ukazuje výhody a nevýhody obou typů snímačů.

Tabulka č.1 - výhody a nevýhody snímačů ICP® kompatibilních a s nábojovým výstupem

	Snímače ICP® kompatibilní	Snímače s nábojovým výstupem
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> • Stálá citlivost bez ohledu na délku a jakost kabelu • Výstup o nízké impedanci může být přenášen dlouhými kabely a to i v drsném prostředí • Nižší náklady na úpravu signálu a kabely • Funkce samostestování • Odolnost proti nepříznivým provozním podmínkám jako je nečistota a vlhkost 	<ul style="list-style-type: none"> • Nevyžaduje napájecí zdroj – ideální pro zařízení napájené bateriemi • Zanedbatelný šum, vysoké rozlišení • Široký dynamický rozsah • Vyšší provozní teploty • Menší rozměry
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • Vyžaduje napájení konstantním proudem (to snižuje provozní dobu při použití baterií) • Nezanedbatelný šum zdroje • Maximální provozní teplota do 120 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Omezená délka kabelu (do 10 m) • Je požadován speciální kabel s nízkým šumem • Je požadován nábojový zesilovač

3.4.2 Měřicí přístroje diagnostických systémů off-line

3.4.2.1 Jednoduché měřicí přístroje pro měření vibrací

Jsou to jednoduché ruční přístroje určené převážně pro pracovníky údržby, přejímky a inspekce. Měření se provádí integrovaným nebo externím snímačem zrychlení vibrací – akcelerometrem. Přístroje jsou vybaveny detektorem efektivní hodnoty v pevném nebo nastavitelném frekvenčním pásmu. Mohou také být vybaveny filtry a detektory hodnoty výkmitu nebo rozkmitu na frekvencích otáček stroje a přepínačem amplitudového rozsahu. Hodnota naměřené veličiny je zobrazena na displeji přístroje a vyhodnocení je provedeno porovnáním s předepsanou hodnotou a v trendu. Pokročilé přístroje jsou vybaveny filtry pro měření v pásmech ložiskových frekvencí a výstupem pro připojení sluchátek a poslech signálu.

3.4.2.2 Měřicí přístroje pro záznam a analýzu naměřených dat

Pro provádění diagnostiky rotačních strojů se vyžaduje určit způsob měření a vyhodnocování širokopásmových vibrací a provádění rozkladu na jednotlivé frekvenční složky s možností jejich analýzy. Pro tyto účely jsou součástí přístrojů na měření vibrací vestavěné nebo připojené frekvenční filtry. Přístroj, který je vybaven frekvenčními filtry a má schopnost vyhodnotit jednotlivé hodnoty určující veličiny vibrací v širokém frekvenčním rozsahu se nazývá frekvenční analyzátor.

Podle konstrukce rozlišujeme dva typy frekvenčních analyzátorů [3]:

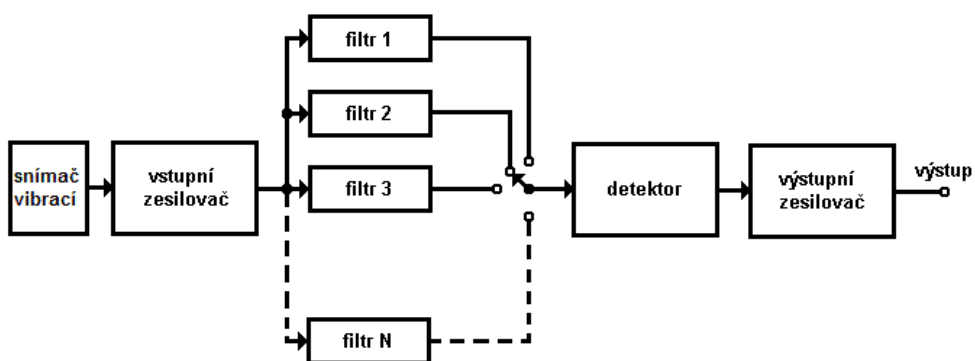
- analogové frekvenční analyzátory s řadou filtrů (diskrétní analyzátory) nebo s laditelným filtrem (analyzátory s rozmítaným filtrem)
- FFT analyzátory s využitím rychlé Fourierovy transformace

3.4.2.3 Analogové frekvenční analyzátory

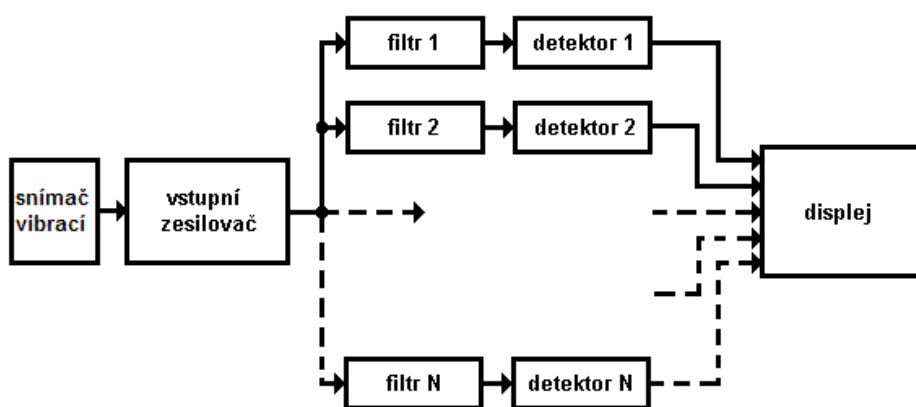
Z hlediska historického vývoje měřicí techniky pro analýzu vibrací se jedná o základní typ analyzátorů. V současnosti je jejich použití v průmyslové praxi omezené, protože se nahrazují FFT analyzátory. Princip činnosti spočívá v přivedení vstupního signálu vibrací ve formě elektrického signálu k analogovým filtrům nebo digitálním filtrům. Ty jsou v provedení řady filtrů, na které se signál postupně přepíná nebo s jedním laditelným filtrem, jehož střední frekvence se plynule přeladuje přes požadované frekvenční pásmo.

Signál je po úpravě ve vstupním zesilovači přiveden na řadu filtrů s přesně odstupňovanými středními frekvencemi a s konstantní relativní šířkou pásma. Synchronně se vstupním signálem se na výstupy jednotlivých filtrů přepíná detektor, který měří výstupní výkon každého frekvenčního pásma. Obvykle se používají analyzátory s diskretními filtry pro konstantní relativní šířku pásma až

do 1/3 oktávy. Pro užší pásma filtrů již vznikají vysoké náklady z důvodu použití velkého množství samostatných filtrů. Proto je vhodnější použít analyzátor s laditelným filtrem. Diskrétní analyzátoři se podle činnosti dělí na sériové a paralelní. Pro paralelní se používá také název analyzátoři pracující v reálném čase. Filtrace a detekce u nich probíhá ve všech frekvenčních pásmech současně a úplné spektrum se získá z téhož časového úseku signálu. To je významná výhoda proti analyzátorům se sériovou činností, u kterých postupné zpracování vyžaduje, aby byl signál stacionární, protože jinak by analýza na jednom pásmu neměla souvislost s analýzou v jiném pásmu. Stacionárnost signálu se dosahuje např. záznamem na magnetofonovou smyčku, která je pak opakovaně přehrávána. Další výhody analyzátorů pracujících v reálném čase jsou schopnosti zpracovat a zobrazit signály s krátkým průběhem např. přechodové charakteristiky a rázové děje. Využití číslicového způsobu zpracování signálu (filtrace, detekce, integrace) umožňuje také uložit data do paměti pro pozdější analýzu a porovnání s dalším záznamem.



Obr. 3.4.2.3.1 Zjednodušené blokové schéma analyzátoru se sériovou činností a přepínatelným filtrem



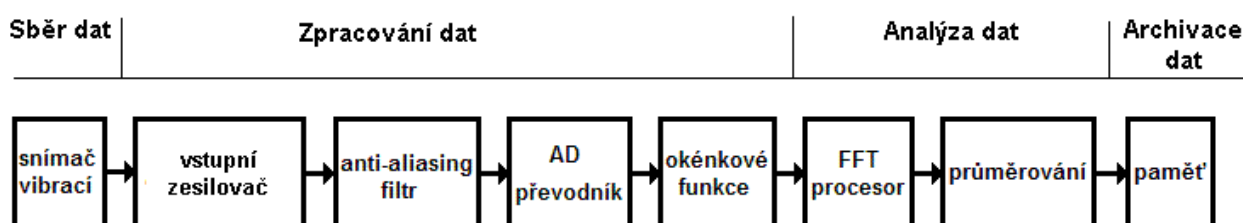
Obr. 3.4.2.3.1 Zjednodušené blokové schéma analyzátoru s paralelní činností

3.4.2.4 FFT analyzátoři s využitím rychlé Fourierovy transformace

Rychlý vývoj technologie výroby polovodičů a mikroprocesorů umožňuje použít algoritmus rychlé Fourierovy transformace v FFT analyzátořích a jejich nasazení do běžné provozní diagnostiky rotačních strojů.

Princip činnosti FFT analyzátoru

FFT analyzátor [3] využívá číslicového způsobu zpracování signálu. Vstupní časový signál je vzorkován analogově číslicovým převodníkem na posloupnost číselných hodnot a pomocí algoritmu FFT jsou měřená data převedena na frekvenční spektrum. Na obr. 3.4.2.4.1, převzatém a upraveném podle [3], je uvedeno blokové schéma částí měřícího řetězce s FFT analyzátořem. Jednotlivé části FFT analyzátoru a jejich funkce jsou popsány v následujícím textu.



Obr. 3.4.2.4.1 Zjednodušené blokové schéma částí měřícího řetězce s FFT analyzátořem

1) Vstupní zesilovač

Vstupní zesilovač pracuje jako předzesilovač a jeho činnost spočívá v zesílení výstupních analogových signálů ze snímačů vibrací a v napájení snímačů. Pro měření vibrací se používají dva typy zesilovačů: napěťový a nábojový. Napěťový zesilovač je určen k zesílení napěťových signálů s širokým frekvenčním rozsahem. Jeho vstupní odpor musí být co největší a vstupní kapacita co nejmenší, aby se zamezilo snížení citlivosti snímače. U nábojového zesilovače musí být vysoký vstupní odpor i kapacita. Rozhodnutí o použití typu zesilovače závisí na účelu použití a také na tom, zda piezoelektrický snímač uvažujeme jako zdroj napětí nebo náboje. Napěťové zesilovače se používají přímo ve spojení se snímačem a s krátkými kabely, aby nedošlo ke snížení citlivosti snímače. Nábojový zesilovač upravuje výstupní signál snímače dříve, než je veden dále k měřícím přístrojům. Je používán v těžkých provozech, kde jeho robustní konstrukce dovoluje nasazení v podmínkách nevhodných pro jiné elektronické přístroje a tam, kde je nutné omezit šum snímače vznikající v dlouhých kabelech vlivem elektromagnetických a triboelektrických jevů.

2) Zkreslení vlivem jevu charakterizovaného výskytem zdánlivých frekvencí (anglicky aliasing). Tento jev je způsoben vzorkováním časového signálu frekvencí, která je nižší než dvojnásobek maximální měřené frekvence v časovém signálu. Podle Shannonova teoremu [3] je nutné zvolit vzorkovací frekvenci jako:

$$f_v \geq 2 \cdot f_m \quad (2.21)$$

kde:

f_v vzorkovací frekvence [Hz];

f_m maximální měřená frekvence v časovém signálu [Hz].

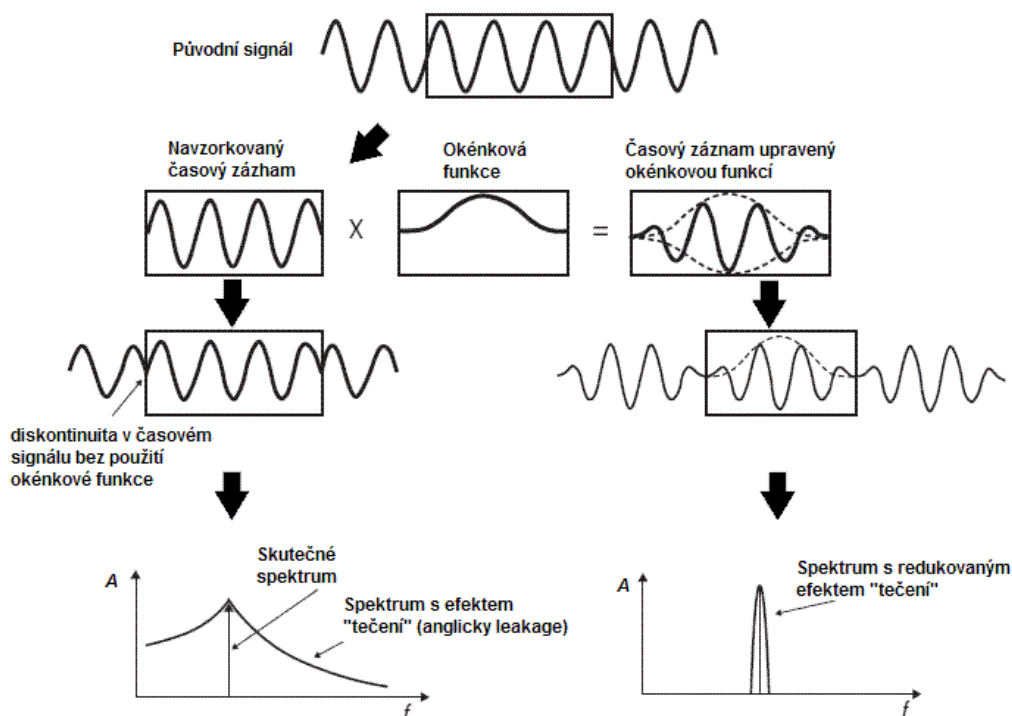
Při výskytu aliasingu se vysoké frekvence po vzorkování mohou projevit jako nízké frekvence v měřeném signálu. Takovému zkreslení se zabraňuje použitím analogového filtru typu dolní propust (anglicky anti-aliasing filter) před vzorkováním signálu. Kvalitní filtry s velkou strmostí přechodové charakteristiky jsou výhodné z hlediska volby nižší frekvence f_v a tím snížení nároků na rychlost a kapacitu paměti přístroje.

3) Analogově číslicový převodník

Analogově číslicový převodník (anglicky ADC – Analog to Digital Converter) převádí vstupní analogový signál na číslicový. Převod probíhá v čase i v amplitudě formou vzorkování a kvantování. Pro účely provozní diagnostiky rotačních strojů postačuje převodník s rozlišením 12 bitů. Takový převodník umožňuje zpracování vstupních signálů s dynamickým rozsahem až 72 dB. Kvalitnější vícebitové převodníky je nutno použít například při zpracování signálů na rotačních strojích s velmi nízkými otáčkami, kde má signál v oblasti nízkých frekvencí velmi malou úroveň.

4) Vliv časové funkce

Před provedením FFT převodu časového signálu na frekvenční spektrum je nutné signál vhodně upravit. Frekvenční analýza je totiž prováděna jen na časovém výseku ze skutečného časového úseku. Algoritmus FFT předpokládá, že signál je periodický a časový výsek se neustále opakuje. Časové výseky se spojí pro výpočet FFT do smyčky. Je-li doba vzorkování shodná s periodou signálu (nebo je jejím násobkem), nedochází k diskontinuitám na začátku a konci časových výseků a okénkovou funkci není nutné použít (resp. používá se obdélníkové okénko – anglicky Rectangular nebo lze použít synchronní vzorkování podle otáček hřídele stroje). Není-li doba vzorkování shodná nebo násobkem periody signálu, vzniknou na začátcích a koncích vzorkovaného záznamu diskontinuity, které neodpovídají skutečnému signálu. Pro řešení tohoto problému se používají časové váhové funkce (okénkové funkce), které upravují časový průběh signálu. Pro diagnostiku rotačních strojů jsou nejvíce využitelné okénkové funkce Hanning (velmi dobré stanovení amplitudy, horší frekvenční rozlišení), Rectangular (nejlepší frekvenční rozlišení, větší chyba stanovení amplitudy) a plochý vrch (anglicky Flat Top, používané při kalibraci snímačů). Princip vzorkování a aplikace okénkové funkce je ukázán na obr. 3.4.2.4.2 převzatém a upraveném podle [16].



Obr. 3.4.2.4.2 Zobrazení časového záznamu bez a s časovým okénkem a vliv na výsledné spektrum

5) Zpracování frekvenčního spektra pomocí FFT

Naměřený časový průběh vibrací je po navzorkování a úpravě okénkovou funkcí zpracován FFT procesorem za účelem výpočtu frekvenčního spektra. Při zpracování se využívá algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Výsledkem je rozklad časového signálu na jednotlivé komponenty, které se nazývají frekvenční čáry. Každá čára je určena svoji amplitudou, fází a frekvencí. Přiřazením frekvence určité komponentě rotačního stroje a vyhodnocením její amplitudy můžeme velmi přesně analyzovat problémy stroje. Pro přesnou analýzu vibrací je nutné FFT analyzátor správně nastavit a využít tak plně jeho parametry. Mezi základní nastavení analyzátoru patří maximální frekvence, počet čar rozlišení, počet průměrů, typ průměrování, okénková funkce.

Maximální frekvence je nejvyšší frekvence, která bude zobrazena analyzátozem. V případě použití anti-aliasing filtru je signál v souladu se vztahem (2.8) vzorkován frekvencí minimálně dvojnásobnou. Z důvodu strmosti reálných anti-aliasing filtrů a překrývání postranních pásem je nutné ve skutečnosti vzorkovat vyšší frekvencí. Používá se frekvence podle vztahu [16]:

$$f_v = 2,56 \cdot f_m \quad (2.22)$$

kde:

f_v vzorkovací frekvence [Hz];

f_m maximální měřená frekvence v časovém signálu [Hz].

Například pro maximální frekvenci zobrazenou ve spektru 1000 Hz je nutné signál vzorkovat s frekvencí 2560 Hz.

Počet čar rozlišení popisuje počet čar, který bude zobrazen ve frekvenčním spektru. Je udáván v hodnotách 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 a 12800 čar. Rozlišení každé čáry může být vypočítáno jako podíl maximální frekvence f_m počtem čar. Například pro maximální frekvenci 1000 Hz a 400 čar je rozlišení 2,5 Hz. Čím je počet čar vyšší, tím je lepší schopnost rozlišit blízké frekvence ve spektrech. Doba měření je nepřímo úměrná maximální frekvenci f_m .

Po zvolení parametrů maximální měřené frekvence a počtu čar rozlišení a na základě přímé souvislosti mezi frekvenčním rozsahem měřeného signálu, délkou jeho záznamu a dobou měření lze provést následující výpočty [16]:

Doba měření

$$T = \frac{N}{2,56 \cdot f_m} \quad (2.23)$$

Délka záznamu

$$N = 2,56 \cdot \text{počet čar} \quad (2.24)$$

Šířka pásma (Frekvenční rozlišení)

$$BW = \frac{f_m}{\text{počet čar}} \quad (2.25)$$

kde:

T doba záznamu [s];

N délka záznamu [počet vzorků];

f_m maximální měřená frekvence v časovém signálu [Hz];

BW šířka pásma neboli frekvenční rozlišení (anglicky **B**and **W**idth);

počet čar celkový počet čar rozlišení FFT.

Na základě vztahů (2.22), (2.23), (2.24) a (2.25) můžeme provést výpočet délky záznamu pro zadání v následujícím příkladu, kdy je požadováno měření v pásmu definovaném maximální frekvencí $f_m = 1000$ Hz a na analyzátoru je nastaven počet čar na hodnotu 400. Úkolem je určit dobu potřebnou pro sledování časového signálu tak, aby mohla být provedena jeho FFT analýza.

Řešení:

Pro omezení anti-aliasing jevu je nutné provést vzorkování signálu podle (2.22), tj.

$$f_v = 2,56 \cdot 1000 = 2560 \text{ Hz}$$

Pro rozlišení 400 čar je FFT analyzátozem použita délka záznamu o velikosti 1024 vzorků podle vztahu (2.24), tj.

$$N = 2,56 \cdot 400 = 1024 \text{ vzorků}$$

Doba potřebná pro sledování časového signálu (doba měření) je určena podle vztahu (2.23), tj.

$$T = \frac{1024}{2,56 \cdot 1000} = 0,4 \text{ [s]}$$

Frekvenční rozlišení ve spektru se určí podle vztahu (2.25), tj.

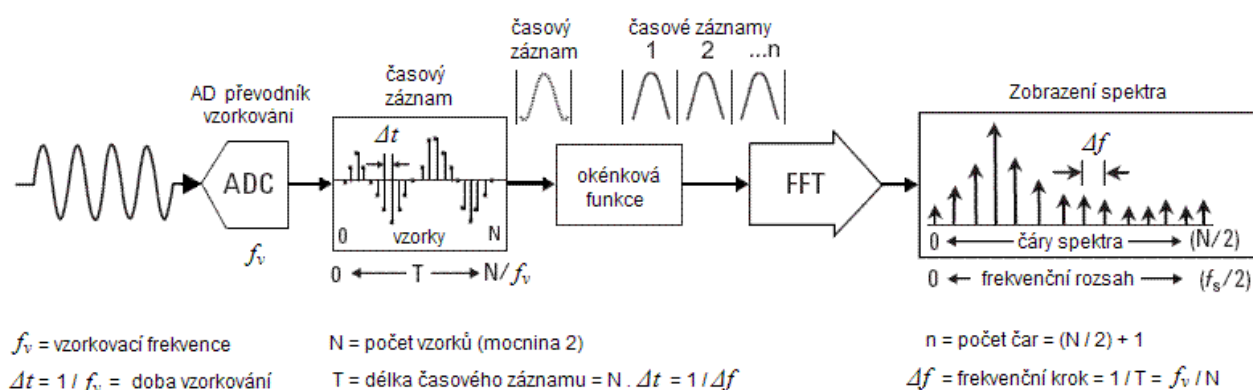
$$BW = \frac{1000}{400} = 2,5 \text{ [Hz]}$$

Výsledek:

Doba měření časového signálu FFT analyzátořem bude 0,4 s pro nastavenou maximální frekvenci 1000 Hz s rozlišením 400 řar. Frekvenční rozlišení výsledného spektra bude 2,5 Hz.

Na základě příkladu a vztahu (2.23) lze vyslovit důležitý závěr: Snížením hodnoty maximální měřené frekvence f_m se prodlouží doba měření T a naopak.

Na obrázku 3.4.2.4.3 převzatém a upraveném podle [16] je uvedeno schéma průchodu vibračního signálu FFT analyzátořem.



Obr. 3.4.2.4.3 Schéma průchodu vibračního signálu FFT analyzátořem

6) Průměrování

Po zpracování frekvenčního spektra za FFT procesorem používají analyzátořy průměrování frekvenčních spekter. Průměrování se provádí za účelem odfiltrovat náhodný řum, kontrolovat konzistenci dat a tím umožnit lepší interpretaci naměřených signálů vibrací.

Nejpoužívanější typy průměrování ve frekvenční oblasti jsou:

Lineární průměrování – změří se uživatelem zvolený počet spekter. Spektra jsou seřtena a dělena celkovým počtem spekter. Výsledkem je jedno spektrum s vyhlazeným průběhem. Tento způsob je nejpoužívanější pro stanovení reprodukovatelných dat při analýze trendů.

Exponenciální průměrování – nazývá se také klouzavé průměrování, kdy poslední měřené spektrum má nejvyšší váhu pro vyhodnocení a nejstarší spektra se postupně odstraňují. Tento způsob je používán například u sledování signálů přechodových jevů.

Průměrování lze provádět také v časové oblasti před provedením frekvenční analýzy. Používá se v případech analýzy časového průběhu a provádí se způsobem synchronní průměrování. K tomu je nutné využít snímač fázové značky jako spouštěcího impulsu pro vzorkování signálu vždy při stejném natočení hřídele. Tento způsob se uplatňuje při potlačení náhodných vibrací mimo celistvé

násobky otáčkové frekvence. V praxi se jedná například o měření dvou rotačních strojů na stejném základu, které pracují na velmi blízkých otáčkách.

7) Paměť

Pro uložení naměřených dat využívají FFT analyzátory paměti typu RAM. V současnosti jsou paměti RAM nahrazovány převážně pamětí typu Flash. Výhodou Flash pamětí je možnost aktualizovat firmware analyzátoru pomocí souborů, které si uživatel může zkopírovat v rámci platné licence z webových stránek výrobce.

3.4.3 Programové vybavení pro analýzu vibrací

Programové vybavení off-line diagnostického systému má vlastnosti téměř stejné jako mají on-line systémy uvedené v kapitole 3.3.2.3. U off-line se nepoužívá volba redukce dat. Snížení velikosti dat v databázi se řeší zavedením více databází nebo ručním zálohováním dat z pracovní do archivní databáze. Off-line systémy mohou stejně jako on-line systémy analyzovat naměřená data na základě expertních pravidel.

4 PRAKTICKÁ UKÁZKA APLIKACE DIAGNOSTICKÉHO POSTUPU PŘI SBĚRU, ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT NA KONKRÉTNÍM OBJEKTU

Pro praktickou ukázkou provedení diagnostického měření a jeho vyhodnocení byl vybrán typický rotační stroj používaný v průmyslu – čerpadlo řady META spojené pomocí kotoučové spojky s asynchronním elektromotorem.

4.1 Popis měřeného objektu

Měřeným objektem je čerpadlo vodíkové strany ucpávek generátoru, umístěné na strojovně prvního výrobního bloku Jaderné elektrárny Temelín. Čerpadlo zajišťuje potřebný tlak a cirkulaci těsnícího oleje ucpávkami u čepů rotoru generátoru. Celé soustrojí, složené s komponent elektromotor-spojka-čerpadlo, je uloženo pomocí patek na ocelové základové desce, která je kotvena čtyřmi šrouby k betonovému základu. K sacímu a výtlačnému potrubí čerpadla je prostřednictvím přírub připojeno potrubí systému.

Čerpadlo je řady META, typ 40-NHG-315-10-YC-2009, výrobní číslo 9310911, výrobce Sigma Olomouc, štítkové hodnoty $Y=1300$ J/kg, $P=2,6$ kW, $Q=8$ l/s, otáčky 2968 ot.min⁻¹. Čerpadlo je horizontální, odstředivé s jedním oběžným kolem s 5 lopatkami, rotor je uložen ve valivých ložiscích mazaných olejem. Přední ložisko je řady NU311, zadní ložisko je řady 3311.

Elektromotor je třífázový asynchronní, typ F200LK02, výrobní číslo 218308, výrobce MEZ Frenštát, štítkové hodnoty $P=30$ kW, $I=52$ A, $U=380$ V, otáčky 2965 ot.min⁻¹. Elektromotor je horizontální, rotor je uložen ve valivých ložiscích mazaných tukem. Přední ložisko i zadní ložisko je řady 6320.

Spojka je pružná, kotoučová typu BKN o průměru 125 mm. Spojku tvoří dvě části, nazývané půlspojky. Každá půlspojka má tři otvory, do kterých jsou vloženy ocelové čepy s vnějším polyamidovým kroužkem. Ustavení hřídelí na spojce se provádí podle montážního předpisu výrobce čerpadla s předepsanou radiální a úhlovou tolerancí.

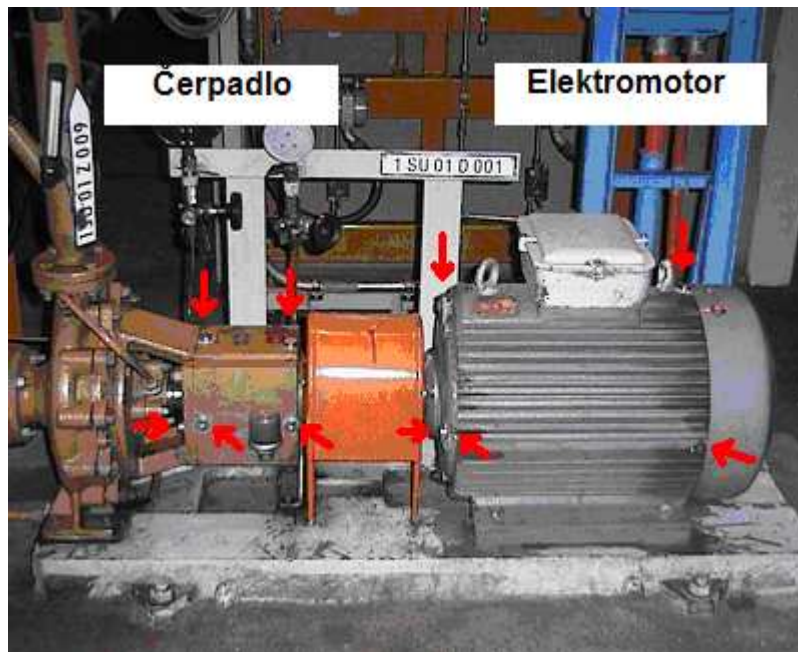
4.2 Příprava měření

4.2.1 Volba a příprava měřících míst

Volba počtu měřících míst a směrů měření se provádí podle dokumentace výrobce rotačního stroje, doporučení norem nebo také na základě provozních zkušeností.

Pro volbu měřících míst a směrů v této praktické ukázce byla použita dokumentace výrobce rotačního stroje s označením Technické podmínky číslo TP 426-13-130/98. Zvolena jsou měřící místa v pozicích uložení ložisek elektromotoru a čerpadla (celkem čtyři měřící místa) a v každém místě dva směry v radiální rovině (vertikální a horizontální směr). Navíc je na elektromotoru a na čerpadle v jednom měřícím místě zvoleno měření v axiálním směru.

Správné provedení měření vibrací je významně závislé na přenosu pohybu měřené plochy na snímač. Nejlepších výsledků se dosahuje při pevném spojení snímačů. Pro splnění tohoto požadavku byla měřící místa před provedením měření upravena obroušením ploch a odmaštěna. Na obroušenou plochu zbavenou nerovností byly pomocí speciálního tmelu Hottinger-Baldwin X-60 nalepeny měřící podložky. Tyto podložky, vyrobené z magnetické nerezové oceli, jsou opatřeny závitovou dírou pro připevnění snímače vibrací pomocí šroubu. Výhodné je, že tento způsob připevnění jen minimálně snižuje rezonanční frekvenci snímače a tím neovlivňuje měření v pásmu frekvencí do 20 kHz. Na obr. 4.2.1.1 jsou šipkami znázorněny měřící směry místech uložení ložisek elektromotoru a čerpadla.



Obr 4.2.1.1 Fotografie měřeného objektu s označením měřících míst

4.2.2 Měřící přístroje, snímač a vyhodnocovací program

Sběr a zpracování dat byly provedeny off-line diagnostickým přístrojem Adash A4300-VA3 se snímačem Wilcoxon Research, Inc., typ 797 a vyhodnocení dat v programu Adash DDS2000. Dále byl použit stroboskop Brüel & Kjaer typ 4912.

Adash A4300-VA3 [17] je přenosný analyzátor s funkcí sběrače dat tzv. datakolektoru. Je určen ke zjišťování mechanických poruch strojů a stavu ložisek. Umožňuje aplikovat diagnostiku pomocí FFT analýzy a měření časových záznamů. Obsahuje velký paměťový prostor pro ukládání dat a vnitřní firmware, který lze uložit prostřednictvím sběrnice RS-232.

Základní technická specifikace Adash A4300-VA3:

- 2 vstupní kanály pro snímač vibrací s možností ICP[®] napájení
- Vstupní rozsahy (0,01÷1000) m.s⁻² pro snímač s citlivostí 100 mV/g, signály +/- 10 Vstř
- Způsob zpracování dat: měření efektivních (skutečná efektivní hodnota, anglicky TRUE RMS) a špičkových (skutečná špičková hodnota, anglicky TRUE PEAK) hodnot, širokopásmová měření v uživatelsky definovaných pásmech, uživatelské nastavení vzorkovací frekvence pro každé pásmo, integrace signálu, obálková analýza, širokopásmové měření pro určení stavu ložisek nastavitelné v pásmu (0,8÷20000) Hz, analýza časového signálu, spektrální analýza FFT, měření otáček
- FFT analýza: frekvenční rozsah nastavitelný až do 20000 Hz, maximální rozlišení až 6400 čas, typ okna Hanning, Rectangular
- Průměrování: maximálně 255 průměrů
- Filtrace: typ dolní, horní a pásmová propust

Snímač vibrací je piezoelektrický snímač zrychlení – akcelerometr typu ICP[®], výrobce Wilcoxon Research, Inc., typ 797, citlivost 10 mV/m.s⁻², maximální amplitudový rozsah 490 m.s⁻² (výkmit), rezonanční frekvence 26,1 kHz. V diagnostice se často pro označení parametrů snímače používají anglosaské jednotky. V případě tohoto snímače jsou parametry citlivosti 100 mV/g a maximální amplitudový rozsah 50 g (peak).

Vyhodnocovací program Adash DDS2000 [18] je databázový systém pro přenos, vyhodnocení, analýzu a archivaci dat z přístroje Adash A4300-VA3.

Nástroje pro vyhodnocení:

- statická data - trendy, hlídání absolutních a relativních dat včetně nastavení kritických hodnot
- grafy spekter – pásmová analýza, oktávová analýza, zobrazení amplituda-frekvence nebo fáze, trendy, zobrazení kaskády spekter, kurzory jednoduché, harmonické, postranní pásma, delta
- grafy časových průběhů – volba veličiny pro zobrazení, kurzory jednoduché, harmonické, postranní pásma, delta
- analýza ložisek a ozubených převodů – na základě interní databáze ložisek a přiřazení otáčkové frekvence schopnost vyhodnotit ložiskové frekvence (viz vztahy 2.17 až 2.20)

Stroboskop Brüel & Kjaer typ 4912 je přenosný přístroj pro měření otáček a stacionární zobrazení rotujících částí strojů. Pomocí synchronizace záblesků xenonové lampy s frekvencí otáček rotoru lze sledovat provozní chování hřídele a stav spojky.

4.2.3 Volba měřených veličin

Jestliže jsou definovány měřicí místa a směry (viz kapitola 4.2.1) a jsou známy schopnosti měřicího přístroje (viz kapitola 4.2.2), lze pro každé měřicí místo zvolit měřené veličiny a typy měření. Při volbě měřených veličin se musí zohlednit konstrukce a provozní režimy měřeného rotačního stroje. Pro měřený objekt čerpadlo vodíkové strany ucpávek byly zvoleny měřené veličiny uvedené v tabulce č.2.

Tabulka č.2 – Seznam měřených veličin použitých pro vyhodnocení stavu měřeného objektu

Měřená veličina	Důvod volby měřené veličiny
Efektivní hodnota rychlosti vibrací v_{ef} [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] v pásmu 10 - 1000 Hz.	Požadavek normativní dokumentace výrobce čerpadla.
Časový průběh a frekvenční spektrum rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz.	Diagnostika stavu ve frekvenční oblasti zahrnující předpokládané hlavní budící frekvence čerpadla a elektromotoru (základní harmonická otáček a její násobky do 20.řádu) pro analýzu nevyváhy, nesouososti, mechanického uvolnění.
Časový průběh a frekvenční spektrum rychlosti vibrací v pásmu 0,8-200 Hz s vysokým frekvenčním rozlišením.	Sledování frekvence elektrické sítě - základní harmonické (50 Hz) a jejího druhého násobku (100 Hz) pro analýzu problémů elektromotoru.
Časový průběh a frekvenční spektrum obálky zrychlení filtrované v pásmu 5000-16000 Hz.	Diagnostika stavu valivých ložisek elektromotoru a čerpadla.
Efektivní hodnota zrychlení vibrací [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] a frekvenční spektrum zrychlení vibrací v pásmu 0,8-16000 Hz a 5000-16000 Hz	Diagnostika stavu valivých ložisek elektromotoru a čerpadla.

4.3 Provedení měření a zpracování dat

Měření bylo připraveno ve vyhodnocovacím programu Adash DDS2000, který umožňuje nastavení všech parametrů do takzvané pochůzky. Pochůzka byla uložena do analyzátoru A4300-VA3 prostřednictvím sběrnice RS-232. Vlastní měření bylo provedeno při normálním provozním režimu stroje a při prohřátí na obvyklou provozní teplotu. Pochůzka byla provedena postupným připojováním snímače vibrací na měřící místa stroje, jejich změřením a uložením do paměti. Na displeji analyzátoru byla po ukončení měření každé veličiny zobrazena naměřená hodnota pro okamžité vyhodnocení stavu z hlediska limitních hodnot. Konečné zpracování a vyhodnocení dat bylo provedeno na počítači v programu Adash DDS2000 po uložení dat opět prostřednictvím sběrnice RS-232. Vyhodnocována byla frekvenční spektra a časové záznamy z jednotlivých měřících směrů i jejich vzájemným porovnáním.

4.4 Vyhodnocení dat

Způsob vyhodnocení naměřených dat vibrací lze rozdělit do několika úrovní, které jsou uvedeny v kapitolách 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 a 4.4.4. V protokolu z kontroly vibrací (viz kapitola 4.4.5) je uvedeno vyhodnocení a doporučení pro provoz zařízení.

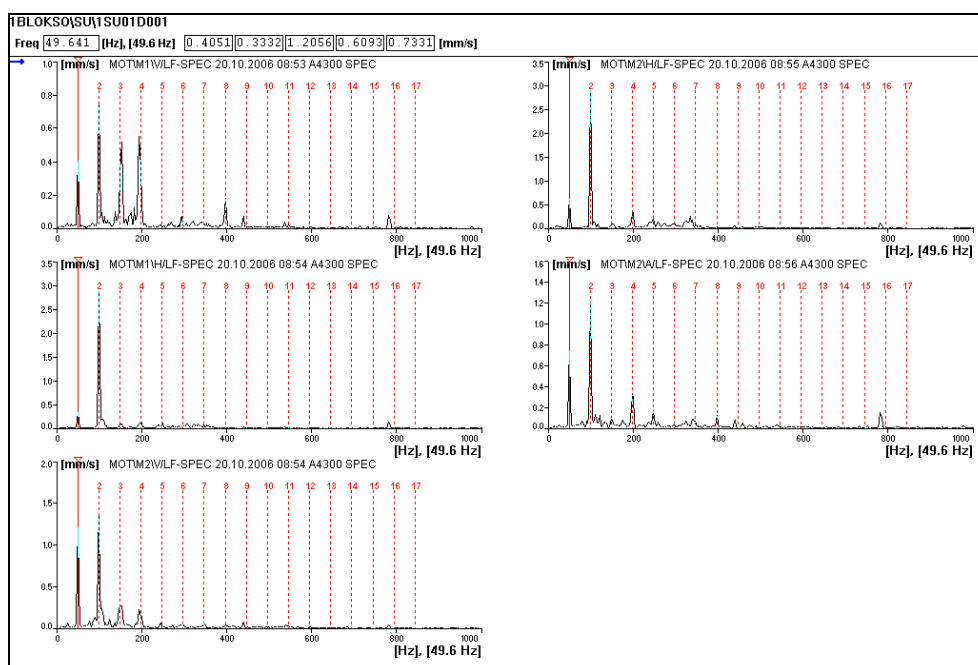
4.4.1 Vyhodnocení na základě limitních hodnot

Vyhodnocení je patrné z protokolu z vyhodnocení kontroly vibrací v kapitole 4.4.5. Normativní dokumentace výrobce stanovuje limitní hodnoty vyjádřené efektivní hodnotou rychlosti vibrací v_{ef} [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] v pásmu (10÷1000) Hz a to pro obě komponenty soustrojí samostatně. Vyhodnocení je provedeno porovnáním naměřené a limitní hodnoty. Výsledkem je stanovení přípustného stavu, protože limitní hodnoty nejsou překročeny.

4.4.2 Vyhodnocení frekvenčních spekter

Jestliže vyhodnocení stavu na základě limitních hodnot dává informaci o tom, zda stroj není vystaven působení nadměrných sil a nehrozí jeho bezprostřední porucha, tak vyhodnocení frekvenčních spekter dává informaci o příspěvku jednotlivých budících sil na celkové vibrace stroje. To je zásadní pro stanovení příčin vibrací a stanovení předpokládaného vývoje stavu stroje tzv. predikci stavu.

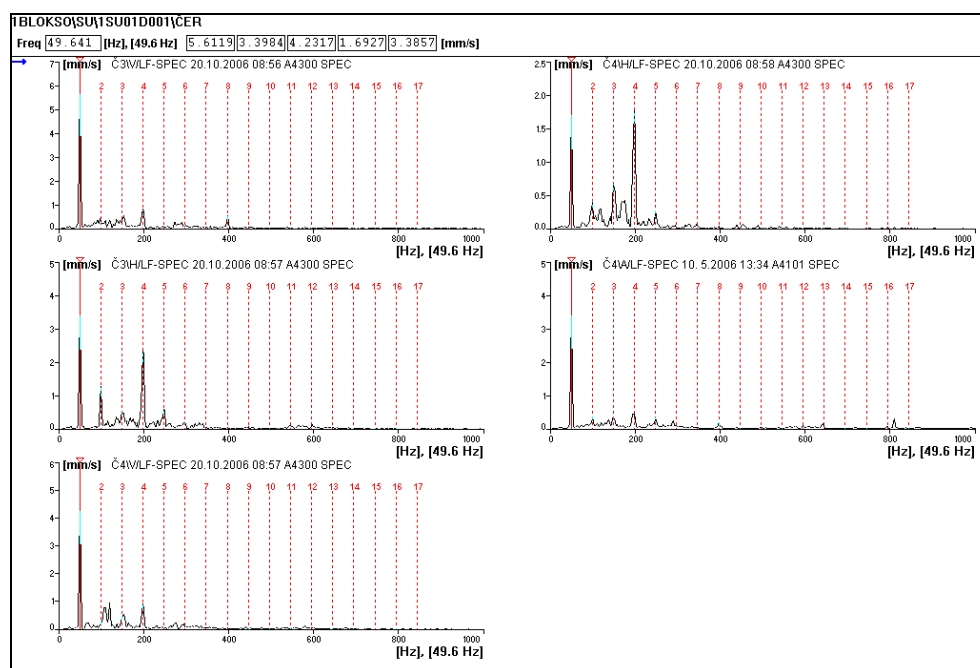
Analýza frekvenčních spekter pro pět měřících míst elektromotoru na obr. 4.4.2.1 ukazuje na výskyt několika dominantních frekvencí. Tyto frekvence odpovídají harmonickým násobkům otáček elektromotoru (skutečné otáčky při měření byly $2977 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, tj. 49,63 Hz). Ve spektrech je umístěn kurzor harmonických frekvencí a lze vyhodnotit, že nejvyšší amplitudy jsou na druhém harmonickém násobku otáčkové frekvence.



Obr. 4.4.2.1 Frekvenční spektra efektivní hodnoty rychlosti vibrací na elektromotoru

Analýza frekvenčních spekter pro pět měřících míst čerpadla na obr. 4.4.2.2 ukazuje na opět na výskyt několika dominantních frekvencí. Tyto frekvence odpovídají harmonickým násobkům otáček elektromotoru (skutečné otáčky při měření byly $2977 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, tj. 49,63 Hz). Ve spektrech je

umístěn kurzor harmonických frekvencí a lze vyhodnotit, že nejvyšší amplitudy jsou na prvním a čtvrtém harmonickém násobku otáčkové frekvence.



Obr. 4.4.2.2 Frekvenční spektra efektivní hodnoty rychlosti vibrací na čerpadle

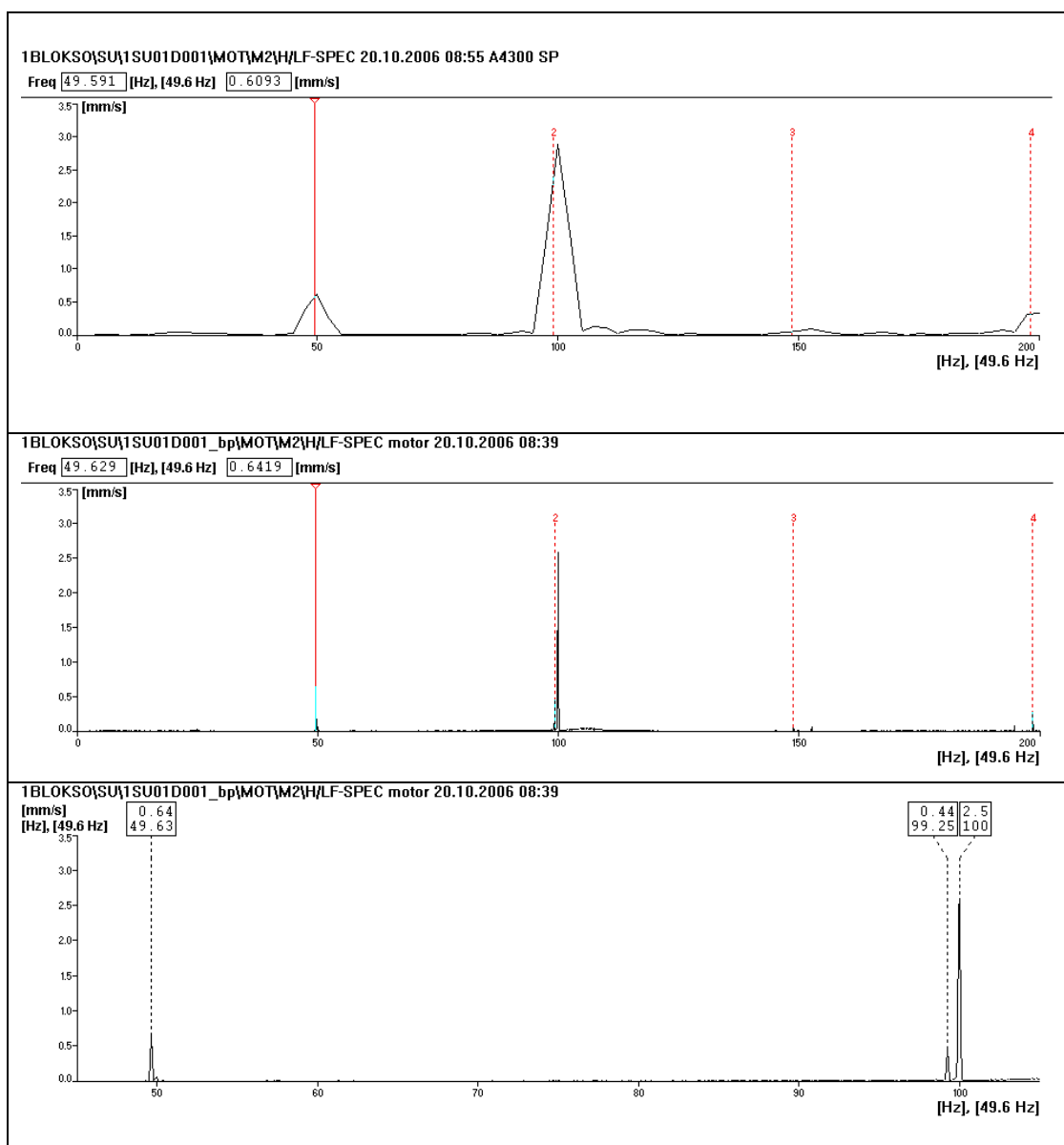
Analýza frekvenčních spekter pro měřící místo zadní ložisko elektromotoru, horizontální směr na obr. 4.4.2.3 je porovnáním frekvenčních spekter s různým frekvenčním rozlišením.

V horní části obrázku je spektrum z obr. 4.4.2.1, zobrazené ovšem v pásmu (0÷200) Hz. Toto spektrum bylo měřeno z frekvenčním rozlišením 2,5 Hz. Naproti tomu spektrum v prostřední části obrázku je měřeno s frekvenčním rozlišením 0,062 Hz a zobrazeno také v pásmu (0÷200) Hz. Konečně spektrum v dolní části obrázku je výsekem (tzv. zoom) v pásmu (45÷105) Hz z prostředního frekvenčního spektra. V horních dvou spektrech jsou umístěny harmonické kurzory otáčkové frekvence a v dolním spektru jsou označeny jednotlivé frekvence kurzory s uvedením amplitudy.

Rozhodnutím pro měření a vyhodnocení spekter s různým rozlišením bylo zjištění hluku soustrojí charakteru zánějů. Protože má elektromotor otáčky blízké frekvenci napájecí sítě, byla vyslovena hypotéza, že hluk může být způsoben provozní nesymetrií sil magnetického obvodu a nerovnoměrnou vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem. Z obrázků je vidět, že druhá harmonická frekvence otáček 99,25 Hz má amplitudu $0,44 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a to je méně než amplituda na základní otáčkové frekvenci 49,63 Hz ($0,64 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). Nejvyšší amplituda je na frekvenci 100 Hz ($2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). Z výše uvedeného vyhodnocení plynou důležité závěry:

- Analýza s vysokým frekvenčním rozlišením umožňuje vyhodnotit, že dominantní frekvence ve spektru je 100 Hz a nikoliv druhá harmonická otáčkové frekvence 99,25 Hz.

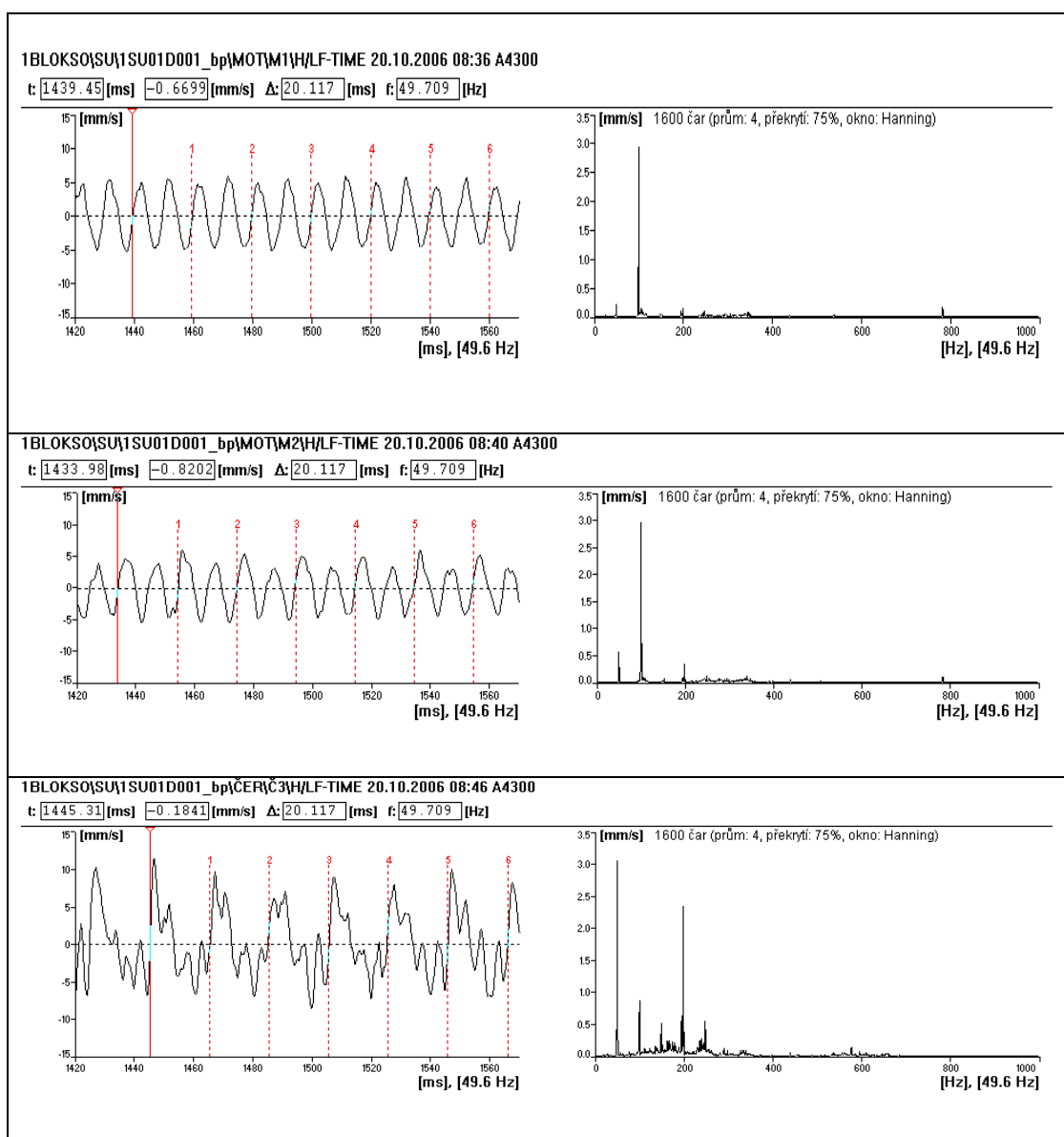
- Měření s frekvenčním rozlišením 2,5 Hz uvedené na obr. 4.4.2.1 je nedostatečné pro rozlišení příčin vibrací stroje.
- Zážnějový hluk je způsoben vzájemnou blízkostí druhého harmonického násobku frekvence napájecí sítě 100 Hz a druhého harmonického násobku otáček stroje 99,25 Hz. Jedná se o typický příklad skládání kmitů jehož výsledkem jsou kmity nazývané rázy. Příčiny mohou být provozní nesymetrie sil magnetického obvodu a nerovnoměrná vzduchová mezera mezi rotorem a státorem způsobené špatným uložením elektromotoru, opotřebením a nesymetrií spojky nebo geometrickými rozměry vnitřních částí elektromotoru. Uvedená diagnóza se opírá také o měření pomocí stroboskopu, při kterém bylo zjištěno protáčení polyamidových vložek čepů spojky. Pokud je spojka v pořádku, tj. přenáší rovnoměrně kroutící moment z pohonu na čerpadlo, nedochází k protáčení vložek čepů a tím k jejich rychlému opotřebenění.

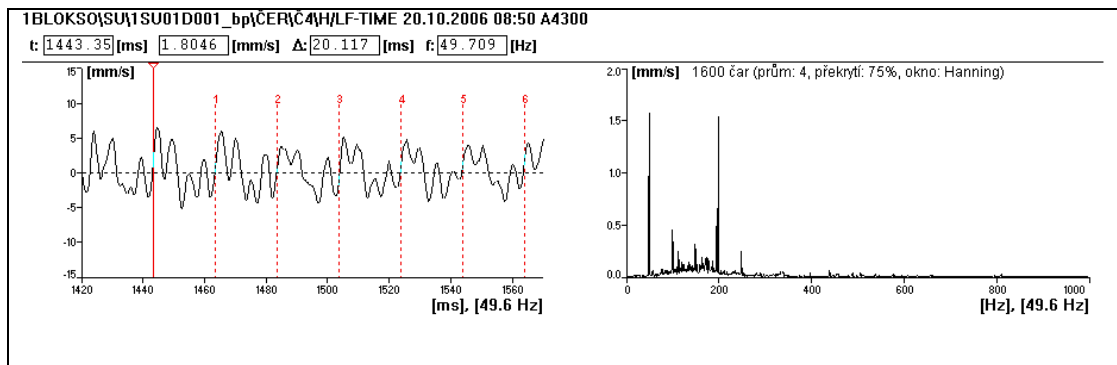


Obr. 4.4.2.3 Porovnání frekvenční spektra efektivní hodnoty rychlosti vibrací na elektromotoru s různým frekvenčním rozlišením

4.4.3 Vyhodnocení časových záznamů

Vyhodnocení časových záznamů umožňuje sledovat stabilitu signálu v čase a amplitudě. Z časového záznamu lze posoudit charakter signálu a odhadnout některé děje probíhající v měřeném stroji. Analýza časových záznamů rychlosti vibrací v horizontálních směrech na ložiscích elektromotoru a čerpadla je uvedena na obr. 4.4.3.1. Zároveň je na obrázku u každého časového záznamu uvedeno jeho frekvenční spektrum, vypočtené analýzou FFT ve vyhodnocovacím programu Adash DDS2000. V horní části obrázku jsou dva časové záznamy z elektromotoru a v dolní části obrázku časové záznamy z čerpadla. Kurzory jsou proloženy frekvencí odpovídající jedné otáčce hřídele stroje. Je vidět, že na elektromotoru je dominantní vliv sil působících dvakrát za otáčku hřídele a na čerpadle je signál složitější s vlivem více frekvencí. Vypočítaná spektra odpovídají rozboru časového záznamu.

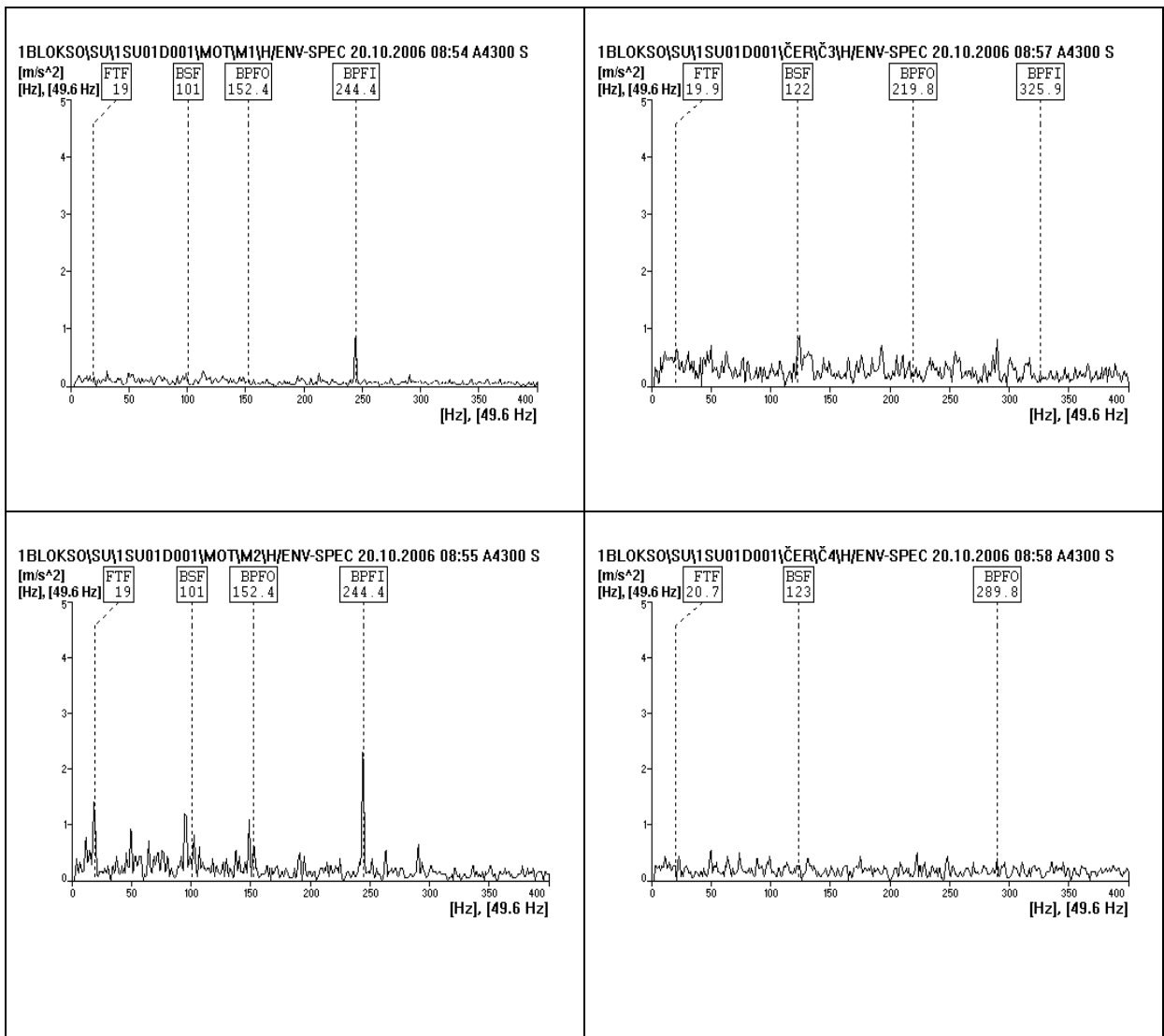




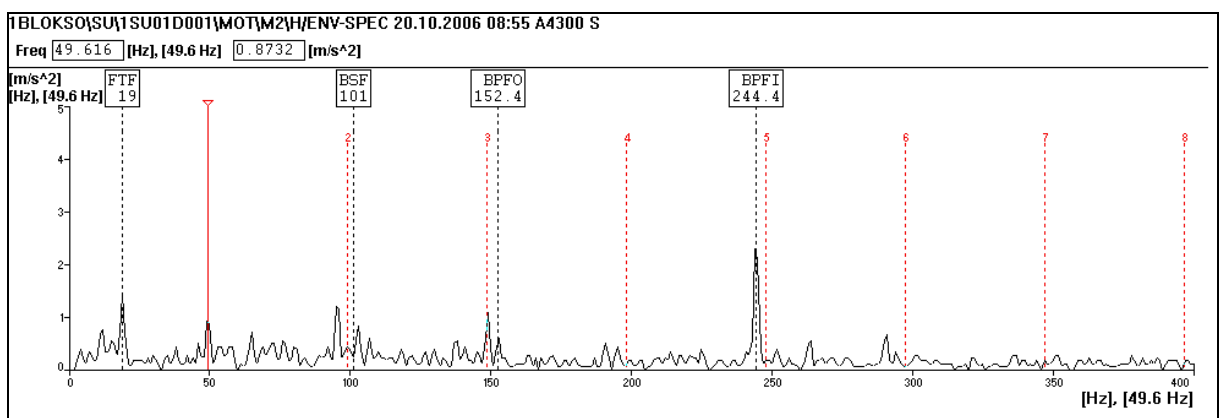
Obr. 4.4.3.1 Časové záznamy a frekvenční spektra efektivní hodnoty rychlosti vibrací

4.4.4 Vyhodnocení stavu ložisek

Valivá ložiska při odvalování generují signály, které mají opakující se charakter. V případě vzniku problému valivého ložiska (např. trhlina, přetížení) se ve vibračním signálu objeví frekvence vad komponent ložisek, které lze spočítat podle vztahů 2.17 až 2.20. Tyto signály mají ovšem nízké amplitudy a vyšší frekvence než signály buzené silami od frekvencí otáček stroje nebo jeho uložení, procesních sil apod. Z toho důvodu je vhodné pro vyhodnocení stavu zvolit metodu obálkové analýzy, kdy jsou signály snímány ve frekvenčním rozsahu, ve kterém se objeví rázové jevy způsobené problémem ložiska. Následně se odfiltrují neopakující se rázové signály a opakující jsou naopak zesíleny – vytvoří se obálka (anglicky envelope). Výsledkem jsou zobrazení ve frekvenčním spektru obálky uvedené na obr. 4.4.4.1 a 4.4.4.2. Na levé straně obr. 4.4.4.1 jsou zobrazena obálková spektra ložisek elektromotoru, na pravé straně z čerpadla. Ve spektrech jsou umístěny kurzory s označením frekvencí komponent ložiska. Na elektromotoru jsou zřetelné frekvence komponent ložisek. Na čerpadle jsou tyto příznaky výrazně menší. Zároveň lze stanovit, že zejména na ložiscích obou komponent u spojky jsou příznaky výraznější. Tento stav může být důsledkem vnějšího přetížení ložisek z důvodu nesymetrií. Na obr. 4.4.4.2 je vidět, že ve spektru obálky se objevují také frekvence s periodou otáčkové frekvence (možný vliv opotřebení spojky). Doporučením z provedených měření je provést kontrolu ustavení hřídelí a uložení komponent na základu jako nápravu přetížujících sil působících na ložiska a kontrolu opotřebení polyamidových vložek čepů spojky. Po opravě sledovat vývoj stavu ložisek. V případě, že vadové frekvence nebudou přítomny, jednalo se o vnější přetížení. Pokud ovšem bude pokračovat výskyt frekvencí ložiska a zvyšování jejich amplitud, lze předpokládat jejich poškození. Protože vývoj vady ložisek je v daném případě očekáván v delším čase, je doporučeno stanovit prognózu vývoje a sledovat trend se zkrácenou periodou kontrol za účelem přípravy údržby podle stavu tzv. prediktivní údržby.



Obr. 4.4.4.1 Frekvenční spektra obálky zrychlení vibrací pro zjištění stavu valivých ložisek



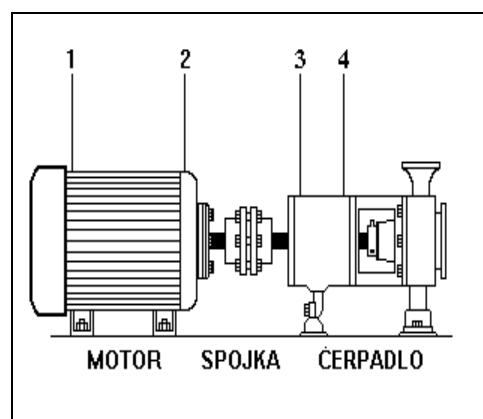
Obr. 4.4.4.2 Frekvenční spektrum obálky zrychlení bod M2, zobrazen je kurzor harmonických frekvencí otáček a kurzory vadových frekvencí ložiska

4.4.5 Protokol z vyhodnocení kontroly vibrací

Protokol z kontroly vibrací je příkladem vyhodnocení měření provedeného na čerpadle vodíkové strany ucpávek. Protokol byl vypracován v souladu s doporučením informativní přílohy B normy ČSN ISO 13373-1 [9], kde jsou uvedeny informace, které mají být zaznamenány při monitorování stavu vibrací a diagnostice strojů. Protokol je určen správcem měřeného zařízení pro jeho rozhodování o provozu a údržbě. V protokolu se uvádí podstatné informace o analýze stavu a vyhodnocení jednoduchým způsobem. Podrobné informace o analýzách stavu zařízení uvedené výše v textu kapitoly 4 jsou určeny pro potřeby diagnostického pracoviště.

PROTOKOL Z KONTROLY VIBRACÍ č. 1 / 2006

Technologické označení zařízení	1SU01D001
Název zařízení	Čerpadlo vodíkové strany ucpávek
Výrobní označení zařízení pohon / čerpadlo	F200LK02 (v.č. 218308) / 40-NHG-315-10-YC-2009 (v.č. 9310911)
Normativní dokumentace	Technické podmínky výrobce čerpadla Sigma Olomouc TP 426-13-130/98
Umístění: stavební objekt podlaží místnost	SO 490/01 0,0 m Strojovna
Datum a čas měření Druh měření Měření provedl	20.10.2006, 8:45 hod periodická kontrola Šafařík Ivo
Datum vypracování protokolu Protokol vypracoval	21.10.2006 Šafařík Ivo



Měřicí přístroj:

Měřicí přístroj	Adash A4300-VA3	Výrobní číslo	621591	Kalibrace	8 / 2006
Měřicí přístroj	Brüel & Kjaer 4912	Výrobní číslo	1434911	Kalibrace	-

Provozní režim:

Měření vibrací bylo provedeno při nominálním provozním režimu podle provozního předpisu. Provozní parametry čerpadla: tlak na sání 110 kPa, tlak na výtlaku 1,24 MPa, provozní otáčky

Limitní hodnoty vibrací podle normativní dokumentace:

Limitní efektivní hodnoty rychlosti vibrací v_{ef} [mm.s⁻¹] v pásmu (10÷1000) Hz - **platí pro elektromotor**

Stav přípustný	$v_{ef} \leq 3,5$
Stav nepřípustný	$v_{ef} > 3,5$

Limitní efektivní hodnoty rychlosti vibrací v_{ef} [mm.s⁻¹] v pásmu (10÷1000) Hz - **platí pro čerpadlo**

Stav přípustný	$v_{ef} \leq 7,1$
Stav nepřípustný	$v_{ef} > 7,1$

Naměřené hodnoty:

Naměřené efektivní hodnoty rychlosti vibrací v_{ef} [mm.s⁻¹] v pásmu 10 - 1000 Hz

Měřicí místo	Název měřicího místa	Vertikální směr	Horizontální směr	Axiální směr
1.	Motor - přední ložisko	1,2	3,1	-
2.	Motor - zadní ložisko	2,6	3,1	1,5
3.	Čerpadlo - přední ložisko	6,4	4,8	-
4.	Čerpadlo - zadní ložisko	4,3	2,8	3,7

Číslo měřicího místa odpovídá číslu na schématickém obrázku zařízení.

Analýza stavu a doporučení:

Změřený stav a jeho analýza

1) Stav zařízení je PŘÍPUSTNÝ na základě měření efektivní hodnoty vibrací.

2) Analýza stavu:

Elektromotor

Vibrace elektromotoru jsou ovlivněny provozní nesymetrií budících sil magnetického obvodu a nerovnoměrnou vzduchovou mezerou mezi rotorem a statorem. Ložiska elektromotoru vykazují zvýšené zatížení. Příčiny mohou být v nevhodném uložení elektromotoru, opotřebením a nesymetrií spojky a/nebo v nerovnostech geometrických rozměrů vnitřních částí elektromotoru.

Čerpadlo

Vibrace čerpadla jsou ovlivněny stavem opotřebením a nesymetrií spojky. Ložisko čerpadla u spojky vykazuje zvýšené zatížení valivého elementu. Příčiny mohou být v opotřebením a nesymetrií spojky.

Spojka

Kontrolou spojky stroboskopem bylo zjištěno protáčení polyamidových vložek čepů spojky. Tento jev odpovídá jejich opotřebením a vede ke vzniku nesymetrie os hřídelí na spojce.

Doporučení pro provoz a údržbu

1) Zařízení lze provozovat

2) Doporučuji:

a) provádět kontroly vibrací se zkrácenou periodou 1x týdně a sledovat vývoj v trendu.

b) V případě zvýšení vibrací nad meze přípustného stavu provést:

- výměnu opotřebovaných vložek čepů spojky

- vyrovnání os hřídelí na spojce včetně kontroly usazení elektromotoru a čerpadla na základové desce

c) V případě provozu čerpadla v mezích přípustného stavu sledovat vývoj vibrací v trendu a provedení činností doporučených v bodu b) naplánovat do termínu odstávky.

5 ZÁVĚR

Aplikace technické diagnostiky v průmyslu má velký význam pro ekonomiku a spolehlivost výroby. Dlouhodobé nasazení prostředků on-line a off-line diagnostiky a jejich zařazení do systému plánování údržby podle skutečného stavu strojů vede ke snížení nákladů na údržbu a minimalizuje neplánovaná odstavení.

V bakalářské práci jsou uvedeny základní diagnostické metody a prostředky, které umožňují vyhodnotit technický stav rotačních strojů a odhalit příčiny jejich závad a opotřebení. V praktické ukázce měření reálného rotačního stroje byly uvedeny možnosti technické diagnostiky při vyhodnocení jeho skutečného stavu včetně lokalizace a stanovení příčin zjištěných závad.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADC – analogově-číslicový převodník (anglicky **A**nalog to **D**igital **C**onverter)

BW - šířka pásma neboli frekvenční rozlišení (anglicky **B**and **W**idth)

ČSN – Česká státní norma

FFT – rychlá Fourierova transformace (anglicky **F**ast **F**ourier **T**ransformation)

HW – technické vybavení počítače nebo měřicího systémů (anglicky **h**ardware)

ICP[®] - technologie firmy PCB Piezotronics, Inc. pro snímače zrychlení s vestavěným zesilovačem (anglicky **I**ntegrated **C**ircuit **P**iezoelectric).

LAN – komunikační síť (anglicky **L**ocal **A**rea **N**etwork)

LVDT - lineární diferenciální transformátor (anglicky **L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer)

RAM – typ paměti (anglicky **R**ead **A**ccess **M**emory)

RS-232 – sériová sběrnice pro komunikaci

SW – programové vybavení počítače nebo měřicího systému (anglicky **s**oftware)

v_{ef} - typ měřené veličiny efektivní hodnoty rychlosti vibrací

v_f – vysokofrekvenční

V_{ss} – stejnosměrné napětí

$V_{stř}$ – střídavé napětí

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANOUŠEK, I., KOZÁK, J., TARABA, O. a kol.: Technická diagnostika, Praha, SNTL, 1988, ISBN 04-236-88.
- [2] Brüel & Kjaer A/S: Introduction to Shock and Vibration, 1998, www.bksv.com.
- [3] NAVRÁTIL, M., PLUHAR, O.: Měření a analýza mechanického kmitání, metody a přístroje, Praha, SNTL, 1986, ISBN 04-214-86.
- [4] Schenck První brněnská strojírna k.p. Brno: Preventivní údržba strojů, 1989
- [5] Brüel & Kjaer A/S: Zkoušení konstrukcí, Část II: Analýza vidů kmitání a modelování, www.bksv.com
- [6] TAYLOR, J.I.: The Vibration Analysis Handbook, VCI, 2003, ISBN 0-9640517-2-9.
- [7] Agilent Technologies, Inc.: Spectrum Analysis Basics, Application Note 150, www.agilent.com.
- [8] SKF®: Vibration diagnostic guide, Technical Paper CM5003, www.skf.com.
- [9] ČSN ISO 10373-1, Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 1: Obecné postupy, Český normalizační institut, květen 2003.
- [10] SABIN, S: Understanding Discrepancies in Vibration Amplitude Readings Between Different Instruments, Orbit Magazine, Vol.26, No.1, 2006, www.bently.com.
- [11] SKF Ložiska, a.s.: Příručka SKF pro údržbu ložisek, SKF publikace 4100CS, reg.70.3.000.1993-12, www.skf.cz.
- [12] Brüel & Kjaer A/S: Sledování vibrací hřidelů, www.bksv.com, www.spectris.cz.
- [13] SKF Československo, a.s.: SKF Výhody a metody monitorování velkých poruch turbogenerátorů pro zlepšení pohotovosti, Technical Paper CM1013, 1993.
- [14] Adash, s.r.o.: Uživatelský manuál On-line vibrační monitorovací systém Adash 3600, ref:13032006jp, www.adash.cz.
- [15] PCB Piezotronics, Inc.: Electronic for Piezoelectric Sensors, ESG-603, 1994, www.pcb.com.
- [16] Agilent Technologies, Inc.: Vector Signal Analysis Basics, Application Note 150-15, www.agilent.com.
- [17] Adash, s.r.o.: Uživatelský manuál Analyzátor vibrací Adash 4300_VA3, ref:28.11.2005 KM, www.adash.cz.
- [18] Adash, s.r.o.: Uživatelský manuál DDS2000, ref:02072003 JC, www.adash.cz.