



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



TÝMOVÁ CVIČENÍ PŘEDMĚTU VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA

Návody do cvičení předmětu „Vibrační diagnostika“

Alena Bilošová

Ostrava 2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Týmová cvičení předmětu Vibrační diagnostika

Autor: Bilošová, Alena

Vydání: první, 2011

Počet stran: 51

Náklad:

Studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu

Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147

Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Alena Bilošová

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2757-5

POKYNY KE STUDIU

Vibrační diagnostika

Pro studium problematiky vibrační diagnostiky jste obdrželi skriptum, které je koncipováno jako souhrn návodů do jednotlivých cvičení. Pro každé cvičení je zařazena teoretická část, jejíž cílem je uvedení do problematiky, a praktická část, která je koncipována jako protokol z měření.

Prerekvizity

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa předmětů Dynamika I a Technické kmitání.

Cíl učební opory

Cílem je praktické seznámení se základními pojmy z oblasti vibrací, zpracování signálů a vibrační diagnostiky. Po prostudování modulu by měl student být schopen řešit základní úlohy technické praxe, které souvisejí s nežádoucími vibracemi částí strojů. Učební opora primárně slouží jako návod do cvičení. Teoretický základ je zde uveden pouze v nejmenší možné míře tak, aby bylo možné porozumět podstatě každého cvičení. Pro hlubší porozumění problematiky je nutné studium doplnit studiem teoretických skript, případně materiálů z přednášek.

Pro koho je předmět určen

Modul Vibrační diagnostika je zařazen do bakalářského studia oboru Aplikovaná mechanika studijního programu Strojírenství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoli jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity. Modul se částečně překrývá s modulem Technická diagnostika a spolehlivost II, který je zařazen do bakalářského studia oboru Technická diagnostika, opravy a udržování studijního programu Strojírenství. Studijní opora je tedy částečně určena i pro studenty tohoto oboru.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

-  Popsat ...
-  Definovat ...
-  Vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeje autorka.

Alena Bilošová

OBSAH

1	MĚŘENÍ CELKOVÝCH HODNOT VIBRACÍ.....	7
1.1	Popis vibračního signálu.....	7
1.2	Hodnocení stroje dle ČSN ISO 10816.....	8
2	PROVOZNÍ VYVAŽOVÁNÍ	11
2.1	Vyvažování metodou putujícího nevyvážku	11
2.2	Vyvažování v jedné rovině bez fáze - tříkružnicová metoda	12
2.3	Vyvažování v jedné rovině s fází - vektorová metoda	13
2.4	Provozní vyvažování ve dvou rovinách	15
3	ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ	20
3.1	Modální zkouška	20
3.2	Zkouška rázem	20
4	PRŮMĚROVÁNÍ PŘI MĚŘENÍ VIBRACÍ	23
4.1	Typy průměrování	23
4.2	Časově synchronní průměrování.....	24
5	ZJIŠŤOVÁNÍ STAVU VALIVÝCH LOŽISEK.....	26
6	MĚŘENÍ POLOHY A VIBRACÍ HŘÍDELE	29
6.1	Orbita	29
6.2	Rozběh a doběh stroje.....	30

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: CELKOVÉ EFEKTIVNÍ HODNOTY RYCHLOSTI VIBRACÍ MODELU

PŘÍLOHA 2: VYVAŽOVÁNÍ METODOU PUTUJÍCÍHO NEVÝVAŽKU

PŘÍLOHA 3: VYVAŽOVÁNÍ V JEDNÉ ROVINĚ – TŘÍKRUŽNICOVÁ METODA

PŘÍLOHA 4: VYVAŽOVÁNÍ V JEDNÉ ROVINĚ – VEKTOROVÁ METODA

PŘÍLOHA 5: VYVAŽOVÁNÍ VE DVOU ROVINÁCH – VEKTOROVÁ METODA

PŘÍLOHA 6: ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ - "BUMP" TEST

PŘÍLOHA 7: FREKVENČNĚ PRŮMĚROVANÁ SPEKTRA VIBRACÍ A SPEKTRA VIBRACÍ
PŘI ČASOVĚ SYNCHRONNÍM PRŮMĚROVÁNÍ

PŘÍLOHA 8: ZJIŠŤOVÁNÍ ZÁVAD LOŽISEK

PŘÍLOHA 9: POLOHA STŘEDU ČEPU, VÝCHYLKA RELATIVNÍCH VIBRACÍ $S_{p,p}$

PŘÍLOHA 10: SPEKTRA RELATIVNÍCH VIBRACÍ PŘI USTÁLENÉM REŽIMU

PŘÍLOHA 11: KASKÁDOVÝ DIAGRAM ROZBĚHU (DOBĚHU)

PŘÍLOHA 12: MĚŘENÍ ORBITY

1 MĚŘENÍ CELKOVÝCH HODNOT VIBRACÍ

V této kapitole se seznámíte se základními pojmy z oblasti měření vibrací a dozvíte se, jaké veličiny se při měření vibrací používají a jaké charakteristiky se pro jejich popis používají.

1.1 Popis vibračního signálu



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Popsat vibrační signály a vztahy mezi jeho různými typy.
- ✚ Definovat pojmy z oblasti měření vibrací.



Výklad

Pohyb lze v mechanice popsat dráhou, rychlostí nebo zrychlením, které jsou navzájem vázány známými matematickými vztahy. Teoreticky nezávisí na volbě veličiny, kterou pro měření vibrační odezvy zvolíme, je to jen otázka měřítka a fáze. V praxi je ale nutné vzít v úvahu i vlivy, které mohou nepříznivě ovlivnit přesnost měření, a proto je vhodné volit měřenou veličinu tak, aby dávala dostatečný odstup od šumu v měření, který u slabých signálů způsobí větší nepřesnosti až chyby měření. Obecně se dá říci, že pro běžná měření v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1000 Hz se používá rychlost, pro vyšší frekvence má přednost zrychlení, pro nižší frekvence výchylka.

Harmonický signál lze definovat pomocí jeho frekvence (nebo periody), fázového posunu a amplitudy (viz Obrázek 1.1). Místo amplitudy se někdy používají jiné charakteristiky k popisu velikosti signálu, a to:

efektivní hodnota = RMS (Root Mean Square) = $0,707 \times \text{amplituda}$ $x_{\text{ef}} = 0,707 \cdot x_a$

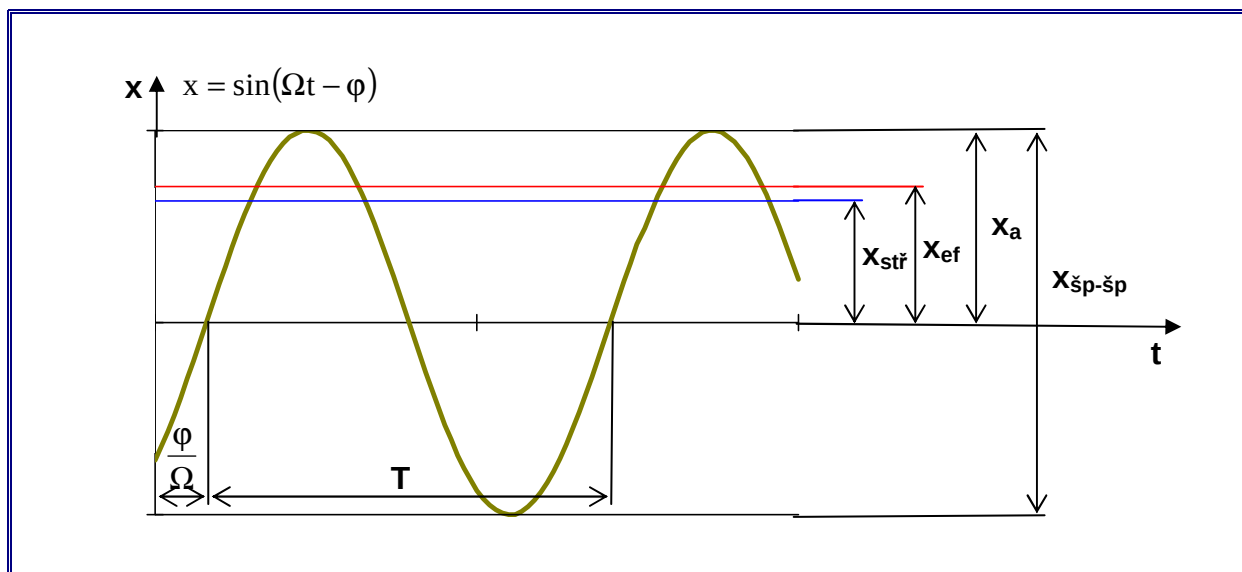
střední hodnota = $0,637 \times \text{amplituda}$ $x_{\text{stř}} = 0,637 \cdot x_a$

rozkmít (velikost špička-špička) = $2 \times \text{amplituda}$ $x_{\text{šp-šp}} = 2 \cdot x_a$

Podobné charakteristiky se používají i u signálů, které nejsou harmonické. U nich ztrácí smysl pojem amplituda, ale nadále platí vztahy pro efektivní a střední hodnotu:

$$x_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 dt}$$

$$x_{\text{stř}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| dt$$



Obrázek 1.1 - Charakteristiky popisující měřený signál

Pomocí poměru špičkové a efektivní hodnoty lze usuzovat na převládající tvar časového signálu. Tento poměr se nazývá činitel výkmitu (anglicky crest factor).

1.2 Hodnocení stroje dle ČSN ISO 10816

V této kapitole se seznámíte s hodnocením stavu strojů na základě celkových hodnot vibrací podle norem ČSN ISO 10816.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Označit měřená místa na stroji podle konvence MIMOSA
- ✚ Zařadit stroj podle typu a výkonu dle ČSN ISO 10816
- ✚ Zařadit stroj do pásma podle naměřených celkových hodnot vibrací
- ✚ Navrhnout opatření týkající se dalšího provozu stroje



Výklad

Normy ČSN ISO 10816 (Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech, Části 1 až 7) platí pro rotační stroje podle a typu. V každé části normy jsou stanoveny tzv. hranice pásem, což jsou mezní hodnoty efektivních hodnot rychlosti vibrací, které zařazují stroj podle stavu do jednoho ze 4 pásem:

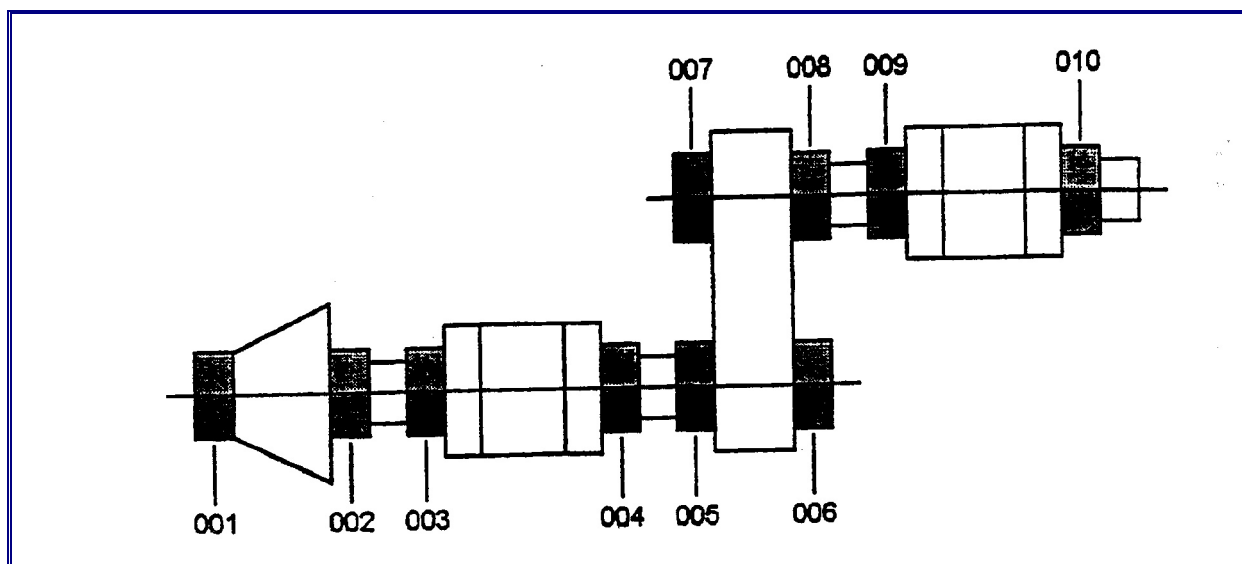
pásmo A - V tomto pásmu mají být za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů.

pásmo B - Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu.

pásmo C - Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány do té doby, než se nalezne možnost nápravy.

pásmo D - Hodnoty vibrací v rámci tohoto pásma jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.

Zařazení stroje do pásma napomůže k rozhodnutí o dalším provozu stroje a navržení potřebných opatření (např. okamžité odstavení, provoz do další plánované opravy apod.). Měření se provádějí zpravidla na všech ložiskových domcích ve třech směrech (horizontální, vertikální, axiální). Pro posouzení stavu stroje se použije nejvyšší naměřená hodnota, nazývaná *mohutnost vibrací*. Pro číslování a označování měřeného místa se používá konvence MIMOSA (viz. Obrázek 1.2), která je uvedena v normě ČSN ISO 13373-1 (Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací, Část 1: Obecné postupy). Dle této konvence se číslovají ložiska postupně, začíná se od volného konce hnacího hřídele.



Obrázek 1.2 - Značení ložisek dle konvence MIMOSA

Mohutnost vibrací pro hodnocení strojů dle ČSN ISO 10816 je efektivní hodnota rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 - 1000 Hz.

Příklad 1.1. Měření celkových hodnot vibrací

Proveďte měření celkových hodnot vibrací na modelu stroje. Nakreslete schéma stroje a ložiska označte podle konvence MIMOSA. Stav stroje vyhodnoťte podle ČSN ISO 10816-1 ZMĚNA AMD 1.

V Tab. 1.1 je uveden příklad měření celkových hodnot vibrací na modelu stroje, který má k měření přístupné 4 ložiskové domky (ložiska č. 1 a 2 jsou součástí elektromotoru a nejsou měření přístupná). Nejvyšší hodnota je naměřena na ložisku č.5 v horizontálním

směru; tato hodnota bude použita pro vyhodnocení stavu stroje. U ložisek č.3 a č.6 nejsou uvedeny hodnoty pro axiální směr, protože tento směr není pro měření přístupný.

Tab. 1.1 – Celkové hodnoty vibrací

označení ložiska	v [mm/s]		
	H	V	A
3	2,1	2,5	
4	2,0	2,1	1,4
5	3,5	2,5	1,7
6	3,2	2,7	

Stroj, na kterém by byly naměřeny tyto hodnoty, by byl dle uvedené ČSN ISO zařazen do pásma C, to znamená, že by nebyl vhodný pro trvalý provoz. Pokud by zvýšené vibrace pocházely od nevývahy, bylo by doporučeno provést vyvážení stroje,

Při řešení tohoto úkolu se studenti rozdělí do dvou až čtyřech týmů. V rámci týmů provedou měření celkových hodnot vibrací alespoň dvěma typy měřidel a srovnají, zda se naměřené hodnoty shodují. Každý tým bude měření provádět na jiném modelu stroje. V závěrečné diskusi si jednotlivé týmy vymění zkušenosti - prodiskutují, který model připadl do kterého pásma a zkusí najít odůvodnění pro případné rozdíly. Také vyhodnotí, které typy měřidel jsou přesnější a spolehlivější.



Shrnutí pojmů

efektivní hodnota
střední hodnota
rozkmít (hodnota špička-špička)
celková hodnota vibrací
mohutnost vibrací
konvence MIMOSA



Otázky

1. Co je to efektivní hodnota vibrací?
2. Pomocí jakých veličin je možné popsat vibrační signál? Jsou tyto veličiny na sobě nezávislé?
3. V jakém frekvenčním pásmu měříme vibrace pro hodnocení strojů podle mohutnosti vibrací dle norem ČSN ISO 10816 a jakou veličinu měříme?

2 PROVOZNÍ VYVAŽOVÁNÍ

V této kapitole se seznámíte s některými metodami provozního vyvažování od těch nejjednodušších, k jejichž aplikaci stačí jednoduchý vibrometr, přes složitější metody v jedné rovině, až po metodu provozního vyvažování ve dvou rovinách, k jejíž aplikaci budete potřebovat analyzátor se speciálním programovým modulem.

2.1 Vyvažování metodou putujícího nevyvážku

V této kapitole se seznámíte s nejjednodušší možnou metodou vyvažování, kterou lze provést s použitím jednoduchého přístroje na měření vibrací např. typu VibPen. Tato metoda se v praxi obvykle nepoužívá, je však důležité pro pochopení vlivu polohy a velikosti nevyvážku a tím i principu vyvažování.



Čas ke studiu: 1 hodina



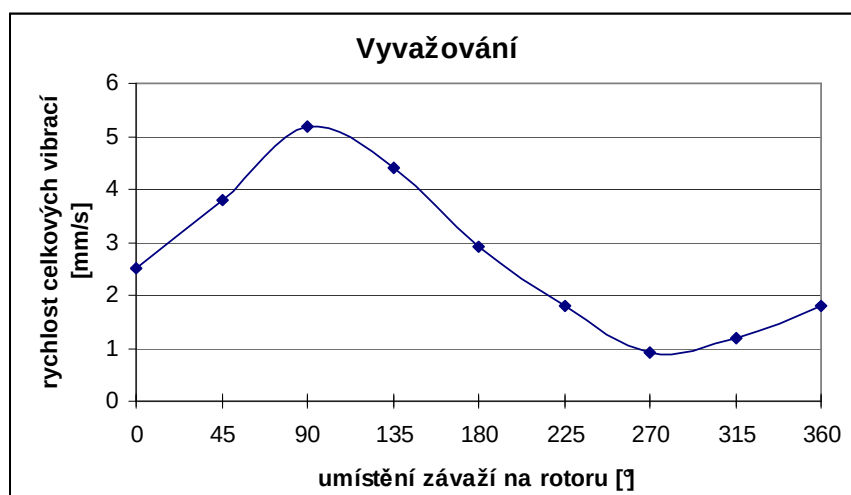
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Provést vyvážení stroje metodou putujícího nevyvážku
- ✚ Posoudit, zda se vyvážením zlepšil stav stroje



Výklad

Pokud budete do různých míst po obvodu rotoru v jedné rovině postupně umisťovat zkušební závaží a budete přitom měřit celkové vibrace (na jednom vhodně vybraném ložisku a směru), můžete získat graf podobný tomu na Obrázek 2.1. Tím zjistíte, při kterém umístění jsou vibrace nejmenší, a do tohoto místa pak umístíte vyvažovací závaží. Jeho hmotnost i polohu (v rozmezí použitého úhlového přírůstku) můžete poté rovněž pokusně měnit, až dosáhnete co nejmenších hodnot celkových vibrací.



Obrázek 2.1 - Vyvažování metodou putujícího nevyvážku

2.2 Vyvažování v jedné rovině bez fáze - tříkružnicová metoda

Tříkružnicová metoda je další jednoduchá metoda provozního vyvažování, k jejíž aplikaci postačí jakýkoliv jednoduchý přístroj na měření vibrací, např. VibPen. Pokud v praxi nejsou podmínky nebo přístrojové vybavení pro měření fáze, je tato metoda dobře použitelná.



Čas ke studiu: 1 hodina



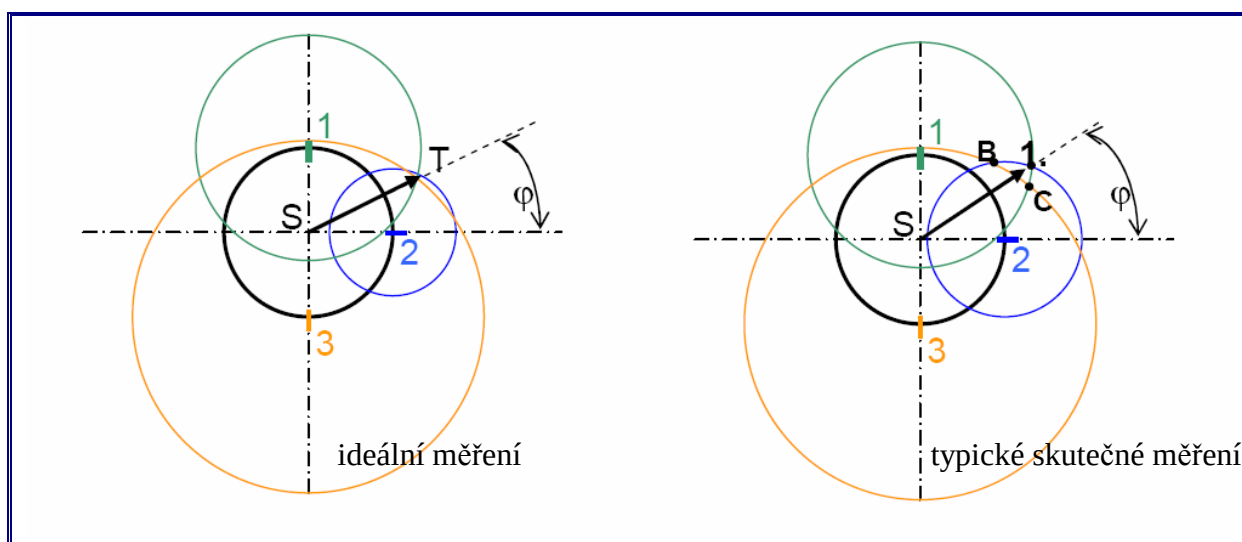
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Provést vyvážení stroje tříkružnicovou metodou



Výklad

Občas je nezbytné vyvažovat rotor, u kterého není možné nebo praktické měřit fázi – např. u velkých ventilátorů chladících věží. V těchto případech je možné použít pouze měření celkových hodnot vibrací (nebo, pokud měříme spektrum, složky s frekvencí otáčení - $1\times$). Postup vyžaduje celkem 4 měření – jeden chod pro zjištění úrovně vibrací při původní nevyváze a 3 zkušební chody. Při každém zkušebním chodu je v různých polohách na rotoru postupně upevněno jediné zkušební závaží, které má stále stejnou hmotnost. Nejlepších výsledků se dosáhne, pokud jsou zkušební závaží rovnoměrně rozložena po 120° . To však není možné vždy a není to ani nezbytné. Na Obrázek 2.2 je příklad, kdy byla zkušební závaží umístěna po 90° . (Tak by tomu bylo např. u dmychadla se 4 lopatkami.) Z naměřených dat se pak tříkružnicovou metodou zjistí místo, do kterého se má umístit vyvažovací závaží, a také jeho hmotnost.



Obrázek 2.2 - Tříkružnicová metoda

Při provádění tříkružnicové metody postupujte následovně:

1. Proveďte nultý chod a tři zkušební chody se zkušebním závažím umístěným v různých místech.

2. Nakreslete kružnici, jejíž poloměr je roven velikosti vibrací při původní nevývaze. Zvolte vhodné měřítko s ohledem na všechny naměřené hodnoty.
3. Na obvodě této kružnice označte relativní úhlové polohy zkušebních závaží (body 1, 2 a 3).
4. Nakreslete kružnici se středem v bodě 1, který na původní kružnici znázorňuje polohu prvního zkušebního závaží, a poloměrem rovným velikosti vibrací při prvním zkušebním chodu. Použijte stejné měřítko, jaké bylo použito pro původní kružnici.
5. Krok 4 opakujte i pro druhý a třetí zkušební chod.
6. V ideálním případě by se všechny 3 kružnice odpovídající zkušebním chodům měly protnout v jednom bodě (bod T, Obrázek 2.2 vlevo). Nakreslete vektor ST ze středu původní kružnice do bodu T.
V praxi se však může stát, že se všechny 3 kružnice v jednom bodě neprotnou. V tom případě umístěte bod T do těžiště trojúhelníku ABC. (Obrázek 2.2 vpravo)
7. Změřte velikost vektoru ST.
8. Vypočtete potřebnou hmotnost vyvažovacího závaží m_v :

$$m_v = \text{správné závaží} = \text{zkušební závaží} \times \frac{\text{poloměr původní kružnice}}{\text{velikost vektoru ST}}$$

9. Vektor ST ukazuje místo na rotoru, do kterého je třeba přidat správné závaží (změřte úhel ϕ mezi vektorem ST a nejbližší polohou zkušebního závaží).

2.3 Vyvažování v jedné rovině s fází - vektorová metoda

K aplikaci vektorové metody potřebujete složitější vybavení než pro předchozí dvě metody. Typicky se používá snímač fázové reference a jednokanálový analyzátor s možností vstupu tohoto signálu.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Provést vyvážení stroje vektorovou metodou



Výklad

Vektorová metoda je v praxi nejčastěji používanou metodou vyvažování v jedné rovině. Mnoho analyzátorů má tuto metodu zabudovanou a potom při jejím použití není nutné kreslit vektorový diagram jako je ten na Obrázek 2.3, ale pro pochopení principu metody je vhodné si vyzkoušet její aplikaci bez použití softwaru v analyzátoru. Při provádění vektorové metody postupujte následovně:

1. Nastavte analyzátor tak, abyste měřili spektrum vibrací ve frekvenčním rozsahu, který příliš nepřesahuje otáčkovou frekvenci. Display nastavte tak, abyste viděli současně

amplitudu i fázi vibrací. Na rotoru musíte mít značku, kterou budete snímat sondou fázové reference. Spouštění měření (trigger) bude externí od signálu z fázové reference.

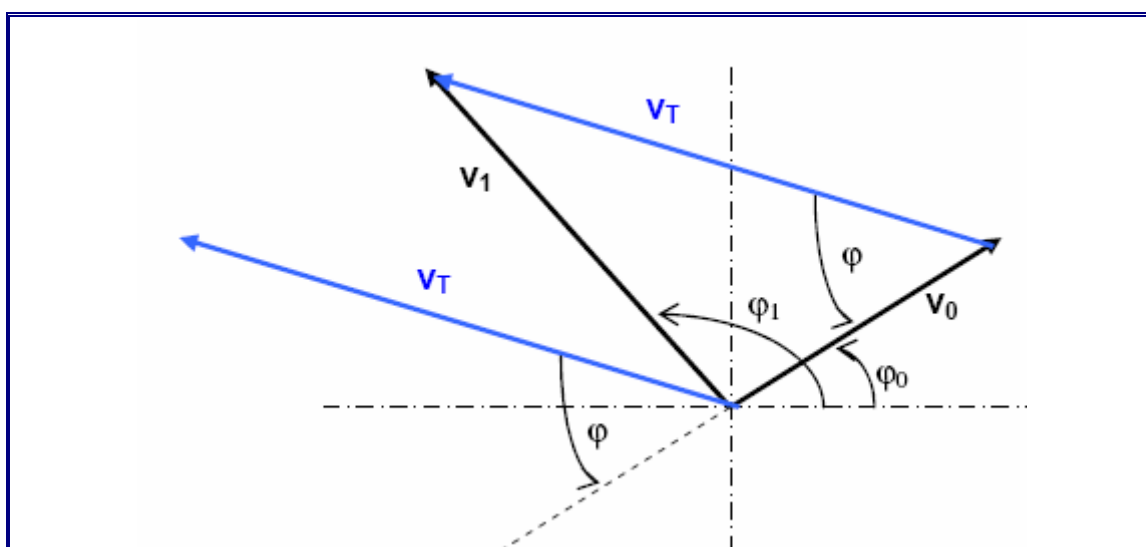
2. Proveďte nultý chod - změřte amplitudu a fázi vibrací na otáčkové složce. Tím se získá počáteční vektor $\mathbf{v}_0$, odpovídající nevyváženosti.
3. Zvolte velikost hmotnosti zkušební (tárovacího) závaží $\mathbf{m}_T$.
4. Do libovolně zvoleného místa na obvodu kotouče umístěte toto zkušební závaží o hmotnosti $\mathbf{m}_T$.
5. Proveďte zkušební chod - opět změřte amplitudu a fázi vibrací. Tím se získá vektor $\mathbf{v}_1$, odpovídající složení počáteční nevyváženosti a vlivu zkušební závaží

Pozn.: Pro dosažení dobrého vyvážení je nutné, aby se změnila buď amplituda alespoň o 30% nebo fáze alespoň o 30° vzhledem k původním hodnotám. Pokud tomu tak není, umístěte zkušební závaží do jiného místa na rotoru (nebo změňte jeho hmotnost) a proveďte zkušební chod znovu.

6. Vektory $\mathbf{v}_0$ a $\mathbf{v}_1$ zakreslete do vektorového diagramu – velikost vektoru je dána amplitudou vibrací (vhodně zvolte měřítko) a jeho směrový úhel je dán fází vibrací.
7. Skutečný vliv přidaného zkušební závaží je dán vektorem $\mathbf{v}_T$ – vyjadřuje změnu vibrací z původního vektoru $\mathbf{v}_0$ na nový vektor $\mathbf{v}_1$ (viz Obrázek 2.3).
8. Pro ideálně vyvážený rotor je výsledný vektor nulový. Toho se dosáhne tak, že se vektor $\mathbf{v}_1$ otočí o úhel φ (tj. do směru $\mathbf{v}_0$, ale v opačném smyslu) a jeho velikost se upraví změnou hmotnosti závaží tak, aby byla rovna velikosti $\mathbf{v}_0$. Vyvažovací závaží se umístí na kotouči o úhel φ vůči poloze zkušební závaží (pozor na směr posouvání!! - pokud úhel φ vyjde kladný, tak jako Obrázek 2.3, musí se rotor pootočit o úhel φ ve směru rotace, pokud úhel φ vyjde záporný, pootočí se rotor proti směru rotace). Hmotnost vyvažovacího závaží m_v se určí ze vztahu:

$$m_v = m_T \cdot \frac{v_0}{v_T}$$

9. Umístěte vyvažovací závaží do určeného místa a proveďte kontrolní chod. Rotor by teď měl být uspokojivě vyvážen. Pokud tomu tak není, považujte tento kontrolní chod za zkušební chod a opakujte kroky 5 až 8.



Obrázek 2.3 - Vyvažování v jedné rovině s fází

2.4 Provozní vyvažování ve dvou rovinách

Metoda, která se v praxi používá pro vyvažování ve dvou rovinách, je v principu totožná s vektorovou metodou používanou pro vyvažování v jedné rovině, tak jak byla popsána v kapitole 2.3. Rozdíl je ve větší složitosti, která je dána tím, že vektorové diagramy podobné tomu na Obrázek 2.3 budou čtyři, budou složitější a k tomu, aby se z nich získaly požadované informace, je nutné provést vektorové výpočty.



Čas ke studiu: 2 hodiny



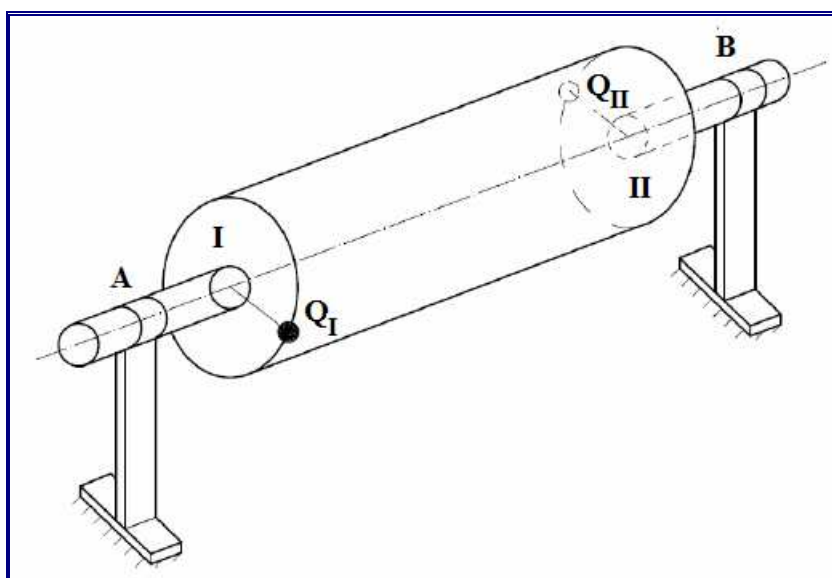
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Provést vyvážení stroje ve dvou rovinách



Výklad

V praxi samozřejmě nevíme, jak jsou na rotoru rozloženy hmoty, které způsobují nevývahu. Pro účely odvození postupu vyvažování ve dvou rovinách (dle [4]) však můžeme, se zřetelem k vnějším dynamickým účinkům obecně nevyváženého tuhého rotoru, nahradit libovolně rozložené nevyvážené hmoty dvěma nevyvážky Q_I a Q_{II} ve dvou vyvažovacích rovinách I a II (viz Obrázek 2.4).



Obrázek 2.4 - Schéma dynamické nevyváženosti

Okamžitou výchylku ložiskové podpory ve zvoleném směru můžeme považovat za průmět vektoru kmitu rotoru do roviny ložiskové podpory. V průmětu do vyvažovací roviny svírá vektor kmitu s vektorem nevyvážky tzv. úhel zpoždění, který závisí na otáčkách rotoru a na tlumení kmitající soustavy. Za předpokladu, že je systém lineární, lze použít principu superpozice a vektory kmitů ložiskových podpor A a B, vyvolaných nevyvážky ve zvolených vyvažovacích rovinách I a II, lze vyjádřit dvěma vektorovými rovnicemi (ve tvaru pro měření rychlosti vibrací):

$$v_{A0} = \alpha_{AI} \cdot Q_I + \alpha_{AII} \cdot Q_{II}$$

$$v_{B0} = \alpha_{BI} \cdot Q_I + \alpha_{BII} \cdot Q_{II} \quad , \text{ kde}$$

v_{A0}, v_{B0} [mm/s] ... vektory kmitů ložiskových podpor A a B nevyváženého rotoru

Q_I, Q_{II} [g] ... vektory nevývažků ve vyvažovacích rovinách I a II

$\alpha_{AI}, \alpha_{AII}, \alpha_{BI}, \alpha_{BII}$ [mm·s⁻¹·g⁻¹] ... příčinkové činitele (koeficienty vlivu)

V prvním pokusném chodu se přidá pokusné vyvažovací závaží m_I do vyvažovací roviny I a výše uvedené rovnice budou mít tvar:

$$v_{A1} = \alpha_{AI} \cdot (Q_I + m_I) + \alpha_{AII} \cdot Q_{II}$$

$$v_{B1} = \alpha_{BI} \cdot (Q_I + m_I) + \alpha_{BII} \cdot Q_{II}$$

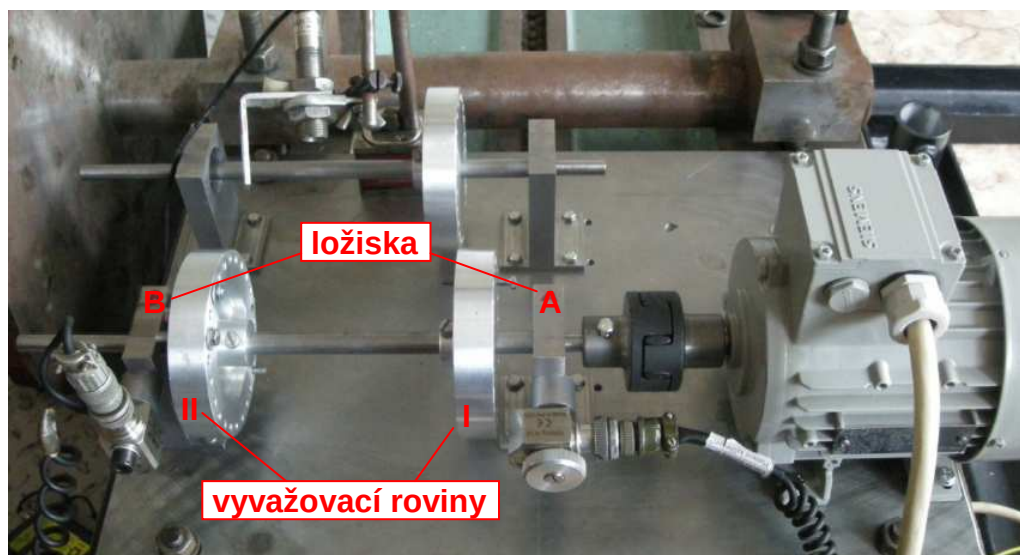
Podobně v druhém pokusném chodu se přidá pokusné vyvažovací závaží m_{II} do vyvažovací roviny II:

$$v_{AII} = \alpha_{AI} \cdot Q_I + \alpha_{AII} \cdot (Q_{II} + m_{II})$$

$$v_{BII} = \alpha_{BI} \cdot Q_I + \alpha_{BII} \cdot (Q_{II} + m_{II})$$

Všechny veličiny jsou vektory, tedy mají amplitudu a fázi (amplituda je u nevývažku jeho velikost a fáze jeho umístění na hřídeli).

Z výše uvedených rovnic lze vyjádřit vektory neznámých nevývažků Q_I a Q_{II} . Závaží, která je nutné použít k tomu, abychom rotor vyvážili, jsou potom vektory opačné k vektorům Q_I a Q_{II} .



Obrázek 2.5 - Model stroje pro vyvažování ve dvou rovinách

Programy, které bývají součástí analyzátorů pro měření vibrací, vás při vyvažování celým proces povedou: zadáte jen hmotnosti pokusných vyvažovacích závaží a provedete všechna potřebná měření - provedete nultý neboli referenční chod a dva pokusné chody; ve

všech třech chodech budete měřit rychlost vibrací na obou ložiscích A a B. Program v analyzátoru poté provede výpočet a určí, jak velká závaží a na jaké pozice máte ve vyvažovacích rovinách I a II umístit. Poté, co závaží dle doporučení na rotor umístíte, můžete provést tzv. trimovací chod - rotor už by měl být uspokojivě vyvážen, ale přesto je možné jeho vyvážení ještě vylepšit umístěním tzv. trimovacích závaží, které vám program rovněž doporučí.



Úlohy k řešení

Příklad 2.1. Vyvažování metodou putujícího nevyvážku

Proved'te vyvážení stroje metodou putujícího nevyvážku

Měřením celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje (viz příklad 1.1) jste např. zjistili, že nejvyšší hodnota vibrací je na ložisku č.5 v horizontálním směru. Na tomto ložisku a v horizontálním směru budete proto provádět všechna následující měření. Hodnotu $v=3,5\text{mm/s}$ budete považovat za hodnotu naměřenou při zkušebním chodu. Dále budete provádět pokusné vyvažování a dostanete graf (viz Obrázek 2.1). Potom by místo, do kterého musíte umístit vyvažovací závaží, bylo 270° . Dále měníte hmotnost pokusného závaží tak, aby naměřená hodnota celkových vibrací byla co nejmenší. Na závěr změříte znovu hodnoty celkových vibrací na celém stroji a provedete ohodnocení dle ČSN ISO 10816. Pokud bylo vyvažování úspěšné, měl by stroj ležet v pásnu A nebo B.

Jednotlivé týmy studentů srovnají své zkušenosti s vyvažováním. Je možné, že některé stroje se podaří vyvážit lépe a některé hůř. Skupinová diskuse má za cíl odhalit možné příčiny různé úspěšnosti při vyvažování.

Příklad 2.2. Vyvažování v jedné rovině pomocí tříkružnicové metody

Proved'te vyvážení stroje tříkružnicovou metodou

Každé vyvažování začnete změřením celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje, abyste mohli vybrat nejvhodnější místo a směr, ve kterém budete provádět všechna měření v rámci použité metody. Poté provedete postup uvedený v kapitole 2.2, čímž byste měli stroj vyvážit. Na závěr provedete opět změřením celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje.

Jednotlivé týmy studentů srovnají své zkušenosti s vyvažováním. Je možné, že některé stroje se podaří vyvážit lépe a některé hůř. Skupinová diskuse má za cíl odhalit možné příčiny různé úspěšnosti při vyvažování.

Příklad 2.3. Vyvažování v jedné rovině pomocí vektorové metody

Proved'te vyvážení stroje vektorovou metodou (s použitím fáze)

Každé vyvažování začnete změřením celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje, abyste mohli vybrat nejvhodnější místo a směr, ve kterém budete provádět všechna měření v rámci použité metody. Poté provedete postup uvedený v kapitole 2.3, čímž byste měli stroj vyvážit. Na závěr provedete opět změření celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje.

Jednotlivé týmy studentů srovnají své zkušenosti s vyvažováním. Je možné, že některé stroje se podaří vyvážit lépe a některé hůř. Skupinová diskuse má za cíl odhalit možné příčiny různé úspěšnosti při vyvažování. Studenti také srovnají, zda se různé stroje chovají konzistentně při různých měřeních, tzn. zda např. stroj číslo 1 je možné vždy dobře vyvážit, zatímco u stroje č.2 je to problematictější apod.

Příklad 2.4. Vyvažování ve dvou rovinách

Proved'te vyvážení stroje ve dvou rovinách

Také vyvažování ve dvou rovinách začnete změřením celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje. Výběr míst měření je nicméně omezen a u stroje, který je pro tuto úlohu k dispozici v laboratoři experimentální dynamiky (viz Obrázek 2.5), je v podstatě předem dán; jde o horizontální směr na ložiscích A a B. Provedete postup uvedený v kapitole 2.4, čímž byste měli stroj vyvážit. Na závěr provedete opět změření celkových hodnot vibrací na všech ložiscích stroje.

U této úlohy nebude možné srovnat své výsledky s výsledky ostatních týmů, protože v laboratoři je k dispozici pouze jediný model umožňující vyvažování ve dvou rovinách. Místo srovnávání výsledků vysvětlíte ostatním týmům, na jakém principu je metoda založena a jak jste postupovali.

**Shrnutí pojmů**

provozní vyvažování
vyvažování v jedné rovině
metoda putujícího nevyvážku
tříkružnicová metoda
vektorová metoda
vyvažování ve dvou rovinách

**Otázky**

1. Popište princip metody vyvažování pomocí putujícího nevyvážku.
2. Popište princip metody vyvažování bez použití fáze, tzv. tříkružnicové metody
3. Popište princip metody vyvažování s fází, tzv. vektorové metody
4. Popište princip metody vyvažování ve dvou rovinách

3 ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ

V této kapitole se seznámíte s metodami, pomocí kterých se dají zjistit vlastní frekvence stroje nebo obecně jakékoliv struktury. Někdy se v naměřeném frekvenčním spektru objeví výrazná frekvenční špička, která nepřísluší ani otáčkové frekvenci, ani jejím harmonickým, ani žádným jiným známým jevům (např. zubové frekvenci). V tomto případě může jít o strukturní rezonanci stroje – špička odpovídá některé z vlastních frekvencí měřeného stroje.

3.1 Modální zkouška

Modální zkouška je postup, pomocí kterého lze získat tzv. modální parametry systému, tj. vlastní frekvence, tlumení a vlastní tvary. Tento postup je relativně složitý a vyžaduje minimálně dvoukanálovou měřicí aparaturu. Měří se při něm tzv. frekvenční odezvové funkce, které se získají tak, že se systém vybudí silou známého průběhu a měří se jeho frekvenční odezva. Problematika modálních zkoušek bude náplní předmětu "Experimentální modální analýza" v navazujícím studiu. V této kapitole pojednáme pouze o jednodušším způsobu, jak zjistit vlastní frekvence systému, a tím je tzv. rázová zkouška (bump test).

3.2 Zkouška rázem

Zkouška rázem je jednoduchý a rychlý způsob, jak zjistit vlastní frekvence systému. Ty se nejlépe zjišťují v klidovém stavu. Kmitání měřeného stroje nebo konstrukce se vybudí úderem kladívka, což představuje širokopásmové buzení, při kterém jsou vybudeny všechny vlastní frekvence v určitém frekvenčním pásmu. V takto pořízeném spektru představují špičky jednotlivé vlastní frekvence.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Vysvětlit princip zkoušky rázem
- ✚ Pomocí rázové zkoušky zjistit vlastní frekvence systému



Výklad

Pro provedení zkoušky rázem budete potřebovat kladívko nebo jakýkoliv jiný předmět, který lze k úderu použít. Tvrdost a velikost kladívka volíte podle typu měřené struktury a podle toho, v jakém rozsahu přibližně vlastní frekvence očekáváte. Obecně platí, že čím hmotnější a měkčí je kladívko, tím menší rozsah frekvencí vybudíte. Např. u struktury,

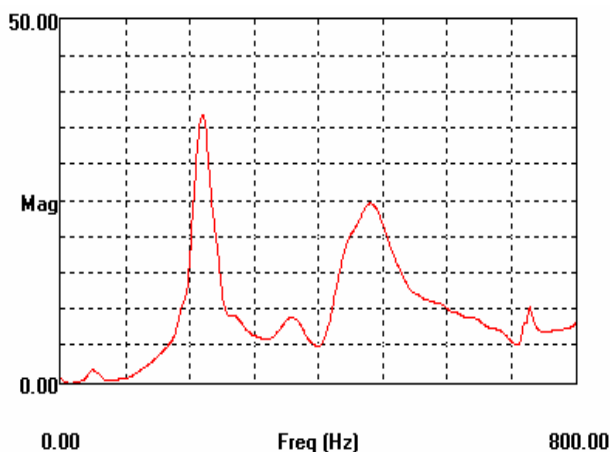
u které vás zajímají frekvence do 200 Hz, použijete kladivo s plastovou nebo pryžovou špičkou, u struktury, u které vás zajímají frekvence kolem 6 kHz, musíte použít relativně malé kladívko s ocelovou špičkou.

Pro provedení zkoušky rázem je třeba nastavit analyzátor odlišným způsobem, než jste jej nastavovali v předchozích cvičeních pro měření celkových hodnot vibrací. Podstatné změny v nastavení jsou tyto:

- ♦ Vypněte automatické nastavování rozsahu (autorange OFF) a rozsah nastavte ručně.
- ♦ Jako vstupní veličinu zvolte zrychlení - převod na rychlost není nutný ani žádoucí.
- ♦ Pokud analyzátor má k dispozici exponenciální váhové okno, zvolte je (EXPONENTIAL nebo TRANSIENT). Pokud ne, zvolte obdélníkové okno (UNIFORM).
- ♦ Průměrování můžete vypnout nebo zvolte menší počet průměrů (do 6).
- ♦ Display nastavte tak, abyste současně viděli časový signál i frekvenční spektrum.
- ♦ Spouštění (TRIGGER) měření bude pomocí náběžné hrany signálu vibrační odezvy. Úroveň spouště nastavte na 10-20% maximální hodnoty a časové zpoždění na cca -20 ms (je třeba zpracovat celou odezvu, ne až od okamžiku spouště).

Postup při zkoušce rázem:

1. Nastavte analyzátor.
2. Spusťte měření a udeřte kladivem do měřené struktury. Může se stát, že uvidíte hlášku: NO TRIGGER. V tom případě zkuste udeřit silněji nebo snižte hodnotu maximálního rozsahu. Naopak, pokud uvidíte hlášku SIGNAL OVERLOADED, hodnotu maximálního rozsahu zvyšte.
3. Pokud je měření provedeno, ale výsledky nevidíte, zkuste zmáčknout tlačítko DISPLAY EXPAND a potom opakovaně šipku ↓ (platí pro Microlog CMVA 10).
4. Výrazné frekvenční špičky v naměřeném spektru jsou vlastní frekvence měřené struktury. Je dobré použít funkci DISPLAY EXPAND i tehdy, pokud ve spektru výrazné frekvenční špičky vidíte, ale jsou až na vyšších frekvencích. Je třeba se ujistit, že jste nepřehlédli žádnou špičku na nižších frekvencích. Na Obrázek 3.1 je zobrazeno spektrum naměřené při zkoušce rázem na rotoru. První ohybová frekvence rotoru je vzhledem k ostatním vlastním frekvencím relativně malá, ale z diagnostického hlediska nejvýznamnější.



Obrázek 3.1 - Spektrum naměřené při zkoušce rázem



Úlohy k řešení

Příklad 3.1. Zjištění vlastních frekvencí konstrukce

Zjistěte vlastní frekvence tří různých strojních částí

Vytvořte 3 týmy; každý tým si vybere jinou strojní součást, jejíž vlastní frekvence zjistí rázovou zkouškou. Na závěr týmy srovnají zjištěné hodnoty a pokusí se na základě známých fyzikálních zákonitostí posoudit, zda naměřili správné výsledky a prodiskutují, proč a jak se různé součásti mezi sebou z hlediska vlastních frekvencí liší.



Shrnutí pojmů

vlastní frekvence
modální parametry
frekvenční špička
rázová zkouška



Otázky

1. Co jsou to vlastní frekvence systému? Jsou závislé na provozních podmínkách?
2. Co jsou modální parametry systému?
3. Jak se dají zjistit vlastní frekvence systému?
4. Popište princip rázové metody.

4 PRŮMĚROVÁNÍ PŘI MĚŘENÍ VIBRACÍ

Vzhledem k tomu, že měřený vibrační signál není deterministický, ale má pravděpodobnostní charakter, je při měření vibrací více než u jiných typů měření potřeba signál průměrovat, abychom diagnostické posouzení zakládali na spolehlivých datech.



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- + Popsat typy průměrování
- + Popsat parametry průměrování
- + Poznat, jaký typ průměrování se v různých aplikacích používá



Výklad

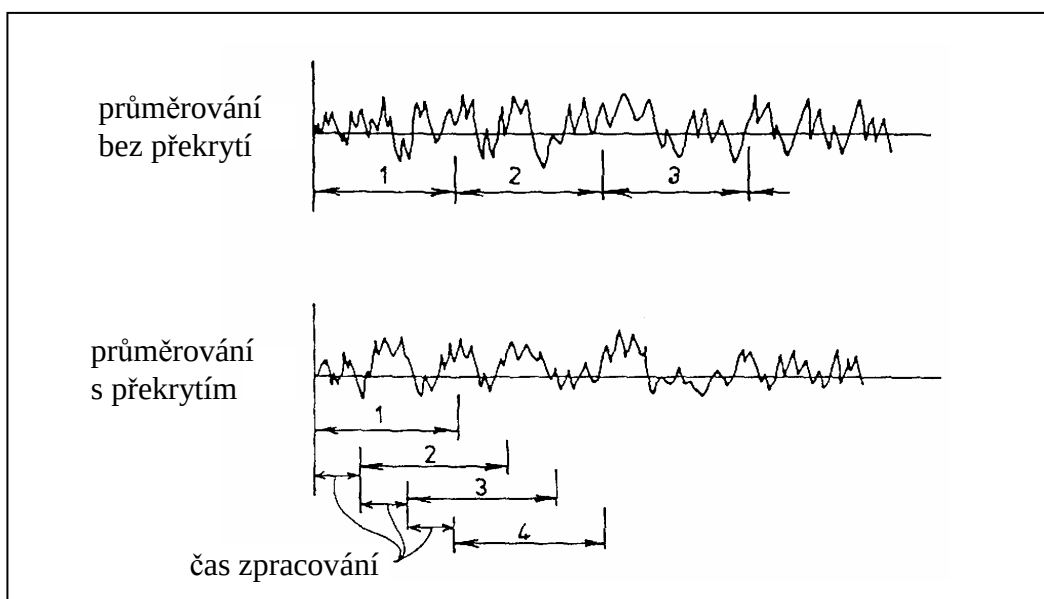
4.1 Typy průměrování

Většina aplikací ve vibrační diagnostice používá průměrování ve frekvenční oblasti. Toto průměrování se používá při měření celkových hodnot vibrací, při vyvažování vektorovou metodou i při získávání spekter, ze kterých usuzujeme na typické závady strojů (nesouosost, ohnutý hřídel, přidírání rotoru apod.) Princip spočívá v tom, že se průměrují spektra, která vzniknou Fourierovou transformací naměřeného časového signálu. Analyzátor obvykle nabízí několik typů tohoto průměrování:

- ♦ lineární, při kterém mají všechny průměry stejnou váhu
- ♦ exponenciální, při kterém mají větší váhu novější průměry
- ♦ s držením špičky - průměrování je lineární, ale s uchováním maximálních špičkových hodnot

Dalšími parametry průměrování, které se v analyzátoru zadávají, jsou:

- ♦ počet průměrů
- ♦ míra překrytí - jde o způsob, jakým vstupují do analýzy vzorky měřeného spojitého časového signálu. Je-li doba zpracování signálu v analyzátoru menší, než délka časového vzorku, je možné průměrovat s překrytím (viz Obrázek 4.1).
- ♦ zda se po zpracování zadaného počtu průměrů měření zastaví (mód FINITE) nebo měření pokračuje s tím, že se starší průměry zapomínají a přibírají se nové (mód CONTINUOUS).



Obrázek 4.1 - Typy průměrování

4.2 Časově synchronní průměrování

Dalším typem průměrování, které se od typů uvedených v kapitole 4.1 principiálně liší, je časově synchronní průměrování. Používá se tehdy, když chceme z měřeného spektra odfiltrovat všechny informace, které nesouvisejí s otáčkovou frekvencí hřídele, ze kterého snímáme značku (tzv. key-fázor). Lze to demonstrovat na modelu, který má dva hřídele otáčející se různými otáčkami.

Časově synchronní průměrování je specifické v tom, že pro vzetí úseku časového signálu je třeba spouštěcí signál (trigger), který je obvykle externí, odvozený z pohybu stroje (u rotačních strojů obvykle od otáčení hřídele). Pak jsou průměrovány přímo tyto časové úseky a teprve pro výsledný průměrovaný časový úsek se počítá spektrum.

Velká výhoda (a současně v některých případech i velká nevýhoda) je to, že po dostatečném průměrování (50 až 100 průměrů) ze signálu vymizí nesynchronní části signálu. Jinými slovy – vymizí vše, co nesouvisí s otáčením daného měřeného stroje (například signály od vibračních sousedních strojů nebo od částí soustrojí za převodovkou atd.). Totéž může být ale nevýhodou, když na daném stroji existují nesynchronní děje – samobuzené kmitání kluzného ložiska, rotující vír u kompresorů atd. Proto je vhodné časově synchronní průměrování použít až při detailní analýze a spektrum porovnávat se spektrem, stanoveným při aritmetickém průměrování.



Úlohy k řešení

Příklad 4.1. *Ověření principu časově synchronního průměrování*

Na modelu stroje se dvěma hřídeli ověřte princip časově synchronního průměrování

Pro řešení této úlohy potřebujete model stroje, který má nejméně dva hřídele otáčející se různými otáčkami. Z údajů na měřiči otáček a z převodového poměru mezi řemenicemi vypočtete otáčkové frekvence obou hřídelů. Otáčkové frekvence můžete rovněž změřit laserovým měřičem otáček. Spektrum na vybraném místě stroje změřte nejdříve běžným způsobem. Všimněte si, že v naměřeném spektru budou výrazné frekvenční špičky odpovídající oběma otáčkovým frekvencím. To by se nezměnilo, ani kdybyste počet průměrů zvedli na 50 nebo více. Pro další měření použijte časově synchronní průměrování. Nastavte fotosondu tak, aby snímala značku na hřídeli, který budete považovat za referenční. Na analyzátoru nastavte typ průměrování na TIME SYNC a počet průměrů nejméně na 50. Spusťte měření a sledujte, jak se zmenšuje frekvenční špička, která souvisí s otáčkovou frekvencí druhého rotoru – "odprůměrovává se". Celý postup zopakujte s tím, že za referenční budete považovat druhý hřídel.

Úlohu řešte tak, že vytvoříte tři týmy, z nichž každý uloží, vytiskne a okomentuje jiné měření:

- ♦ měření spektra běžnou metodou s průměrováním ve frekvenční oblasti
- ♦ měření spektra metodou časově synchronního průměrování se značkou na pomaleji se otáčejícím hřídeli
- ♦ měření spektra metodou časově synchronního průměrování se značkou na rychleji se otáčejícím hřídeli



Shrnutí pojmů

průměrování ve frekvenční oblasti

časově synchronní průměrování

key-fázor

referenční hřídel

nesynchronní složky



Otázky

1. Jaké znáte typy průměrování?
2. Jaké parametry se zadávají pro nastavení průměrování?
3. Čím se liší časově synchronní průměrování od ostatních typů průměrování?
4. Kdy se časově synchronní průměrování používá?

5 ZJIŠŤOVÁNÍ STAVU VALIVÝCH LOŽISEK

Ložiska se vyskytují u všech rotačních strojů. Vibrační diagnostika poskytuje prostředky, jak sledovat stav ložisek (v této kapitole valivých ložisek) a aplikovat na ložiska princip proaktivní údržby.



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- + Rozlišit možné typy závad valivého ložiska
- + Zjistit stav valivého ložiska metodami vibrační diagnostiky



Výklad

Na valivém ložisku rozlišujeme 4 typy závad, podle místa, kde se závada vyskytuje. Každé z těchto závad odpovídá tzv. "frekvence ložiskové závady", kterou je možné spočítat na základě parametrů ložiska a otáčkové frekvence:

BPFI - závada na vnitřním kroužku	$BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n$
BPFO - závada na vnějším kroužku	$BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n = N \cdot FTF$
BSF - závada na valivém tělísku	$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right) \cdot n$
FTF - závada na kleci	$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n$

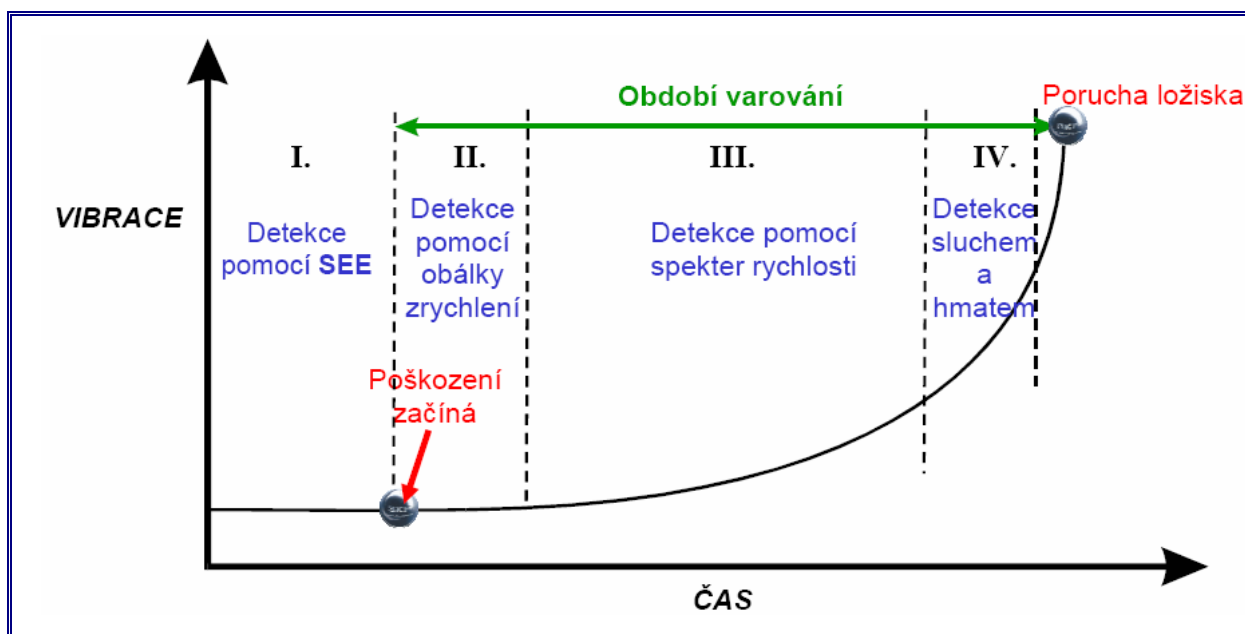
kde:

- n ... otáčky rotoru [Hz]
- N ... počet valivých elementů
- B_d ... průměr valivého elementu [mm]
- P_d ... roztečný průměr
- φ ... kontaktní úhel

Pokud se některá ze závad v ložisku vyskytuje, vybuzuje příslušnou frekvencí vlastní frekvence částí ložiska a obálkovou metodou je možné tuto frekvenci závady zjistit. Výskyt závadové frekvence ve spektru obálek zrychlení tedy indikuje příslušnou závadu ložiska.

Vývoj závady na valivém ložisku lze rozdělit do čtyř etap (viz Obrázek 5.1):

- I. Nejčasnější indikace problémů ložisek včetně špatného mazání se objevují v ultrazvukovém frekvenčním pásmu od asi 250 kHz do 350 kHz. Později, když poškození začíná, frekvence klesá na asi 20 až 60 kHz. Toto jsou frekvence, pro jejichž měření nemáme v laboratoři experimentální dynamiky vybavení.
- II. Malé vady v ložisku začínají "zvonit" - vybuzují vlastní frekvence komponent ložiska, které jsou hlavně v oblasti 500 Hz až 2 kHz. Tyto rezonance mohou rovněž být rezonancemi nosných částí ložiska. Na konci 2. etapy se objevují postranní pásma kolem rezonanční špičky. Tuto etapu je možné zjistit pomocí demodulovaných obálkových spekter vysokých frekvencí.
- III. Objevují se frekvence ložiskových závad a jejich harmonické násobky. Když opotřebení narůstá, objevuje se více harmonických násobků frekvencí ložiskových závad a narůstá počet postranních pásem, která jsou kolem výše uvedených harmonických násobků i kolem vlastních frekvencí ložiskových závad. Tuto etapu je možné zjistit ze spekter rychlostí vibrací.
- IV. Ke konci životnosti je dokonce ovlivňována amplituda otáčkové složky. Tato roste a spolu s ní i řada harmonických násobků otáčkové frekvence. Diskrétní frekvence ložiskových závad i vlastní frekvence komponent ložiska začínají v důsledku zvětšení vůle v ložisku ze spektra mizet a jsou nahrazeny náhodným širokopásmovým vysokofrekvenčním "prahovým šumem".



Obrázek 5.1 - etapy poškození ložiska

Vybavením, které máme v laboratoři experimentální dynamiky, jsme schopni detekovat závadu ložiska ve druhé, třetí a čtvrté etapě vývoje.



Úlohy k řešení

Příklad 5.1. Zjištění stavu ložisek

Na modelu stroje detekujte případné závady ložisek

Na modelu ADASH a na kufříkovém modelu jsou některá ložiska bez závad a u některých se závady vyskytují. Pomocí analýzy obálek zrychlení zjistěte, která ložiska jsou poškozena a o jaký typ závady se u nich jedná. Každý ze studentů vyhodnotí stav jednoho ložiska a v týmu potom proběhne srovnání jednotlivých výsledků a ohodnocení celkového stavu stroje z pohledu stavu ložisek.



Shrnutí pojmů

valivé ložisko

závadové frekvence ložiska

etapy poškození ložiska

spektrum obálek zrychlení



Otázky

1. Jaké závady se mohou u valivých ložisek vyskytnout?
2. Jaké rozlišujeme etapy poškození ložiska od začátku vývoje poškození až do poruchy ložiska?
3. Na jakém principu je založeno vyhodnocení spekter obálek zrychlení?

6 MĚŘENÍ POLOHY A VIBRACÍ HŘÍDELE

V předchozích kapitolách jsme se zabývali měřeními vibrací na nerotujících částech stroje (převážně na ložiskových domcích). V této kapitole se budeme zabývat měřením pohybu a vibrací hřídele, neboli měřením relativních vibrací. Hodnocením strojů na základě měření na rotujících částech se zabývá sada norem ČSN ISO 7919.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Měřit relativní vibrace a provést posouzení stroje podle normy ČSN ISO 7919
- Měřit a vyhodnotit spektra relativních vibrací
- Vysvětlit, jaké informace je možné vyčíst z kaskádového diagramu naměřeného při rozběhu nebo doběhu stroje.
- Vysvětlit, co je to orbita a jaké informace lze z jejího tvaru vyčíst.

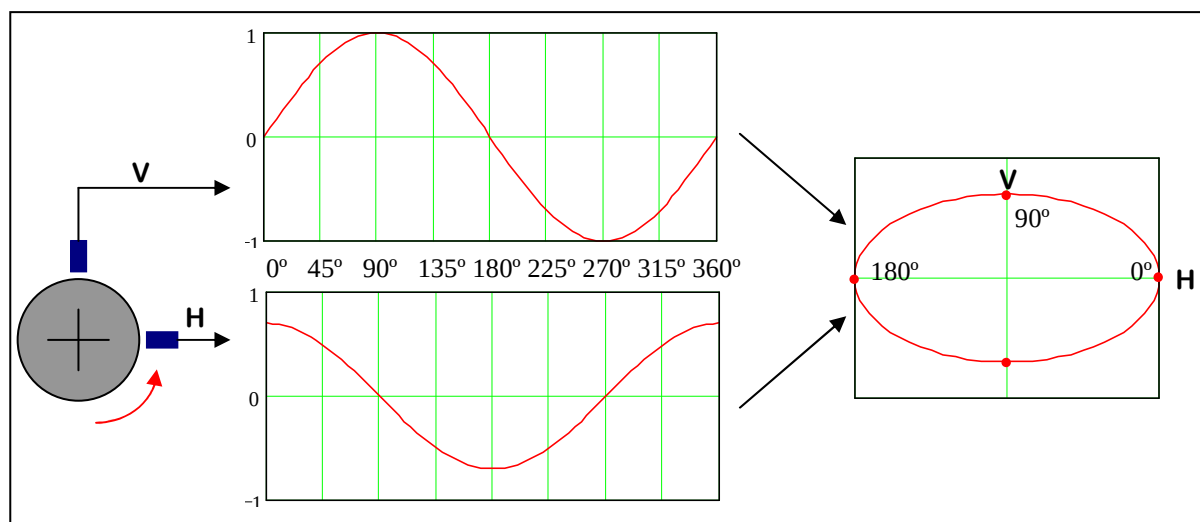


Výklad

Měření na hřídeli se provádí pomocí snímačů výchylky, které pracují na bázi vířivých proudů. Před započítím měření je nutno provést správnou instalaci těchto snímačů podle pokynů výrobce. Měřenou veličinou je výchylka a detekovaným parametrem je hodnota "špička-špička", která nejsrozumitelněji poskytuje informaci, zda se hřídel pohybuje v rámci ložiskové vůle nebo zda dochází ke kontaktu se statorem. Vibracím měřeným pomocí snímačů výchylky se říká relativní vibrace, protože měří vibrace rotoru vůči skříni, která sama kmitá.

6.1 Orbita

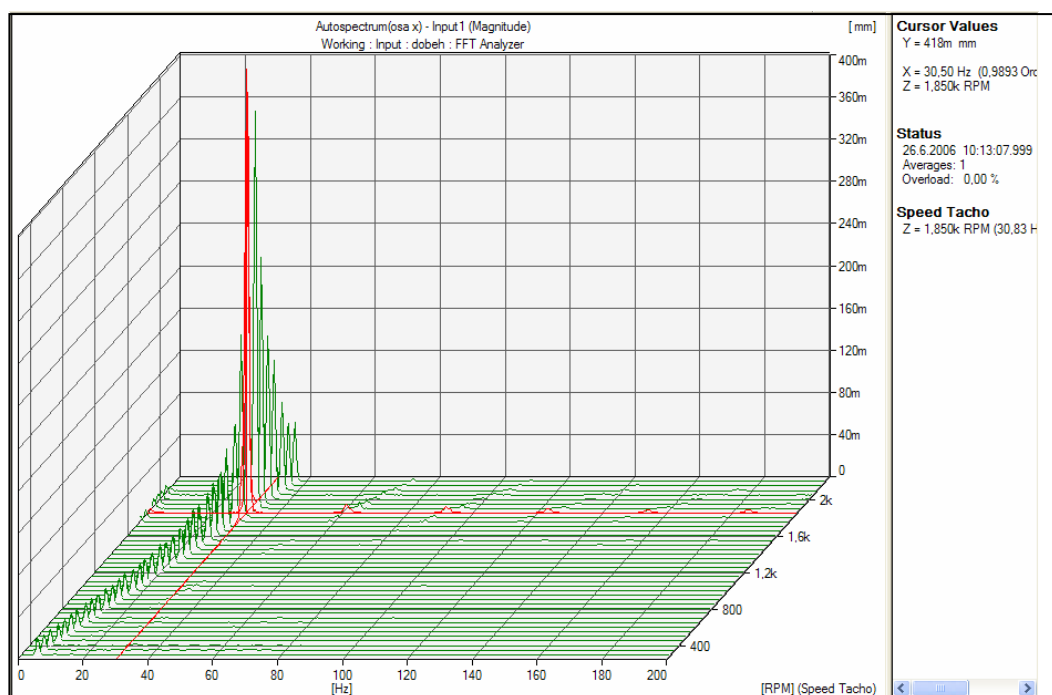
V naměřeném signálu udává stejnosměrná složka polohu středu hřídele a ze střídavé složky se konstruuje tzv. orbita, což je dráha středu čepu v průběhu jedné otáčky. K získání orbity je potřeba snímat signál ze dvou na sebe kolmo umístěných snímačů výchylky. Orbita se získá na základě stejného principu jako Lissajousovy obrazce známé z fyziky (viz Obrázek 6.1). V ideálním případě - při bezchybném chodu stroje - má orbita tvar elipsy, která se vykresluje ve stejném smyslu, jako jsou otáčky hřídele (tzv. souběžná orbita). Z tvaru orbity lze také diagnostikovat různé závady chodu stroje, např. nestabilitu olejového filmu (víření a tlučení oleje) nebo přidírání rotoru o stator.



Obrázek 6.1 - Princip vytvoření orbity

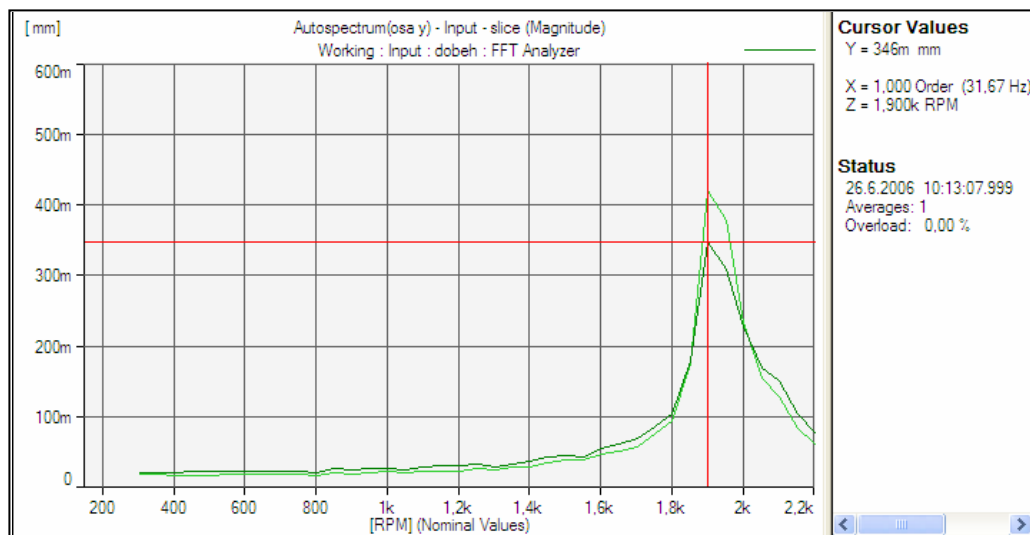
6.2 Rozběh a doběh stroje

Pomocí snímačů výchylky se sleduje také kmitání rotoru při rozběhu a doběhu stroje. Měření v těchto režimech se obvykle zobrazuje pomocí tzv. kaskádových diagramů, ze kterých je možné odečíst jak vlastní frekvence rotoru, pokud rotor při rozběhu/doběhu prochází přes kritické otáčky, tak i případný výskyt nestability olejového filmu v kluzných ložiscích (víření, příp. tlučení oleje). Frekvence víření oleje (oil whirl) je tzv. subharmonická frekvence, je rovna přibližně 0,38 až 0,48 násobku otáčkové frekvence a amplituda na této frekvenci může být i vyšší než amplituda na otáčkové frekvenci. Jde tedy o velmi nežádoucí stav zvýšených vibrací, který může navíc přejít do ještě nebezpečnějšího stavu tzv. tlučení oleje (oil whip), kdy nestabilita olejového filmu budí vlastní frekvenci rotoru (viz Obrázek 6.4).

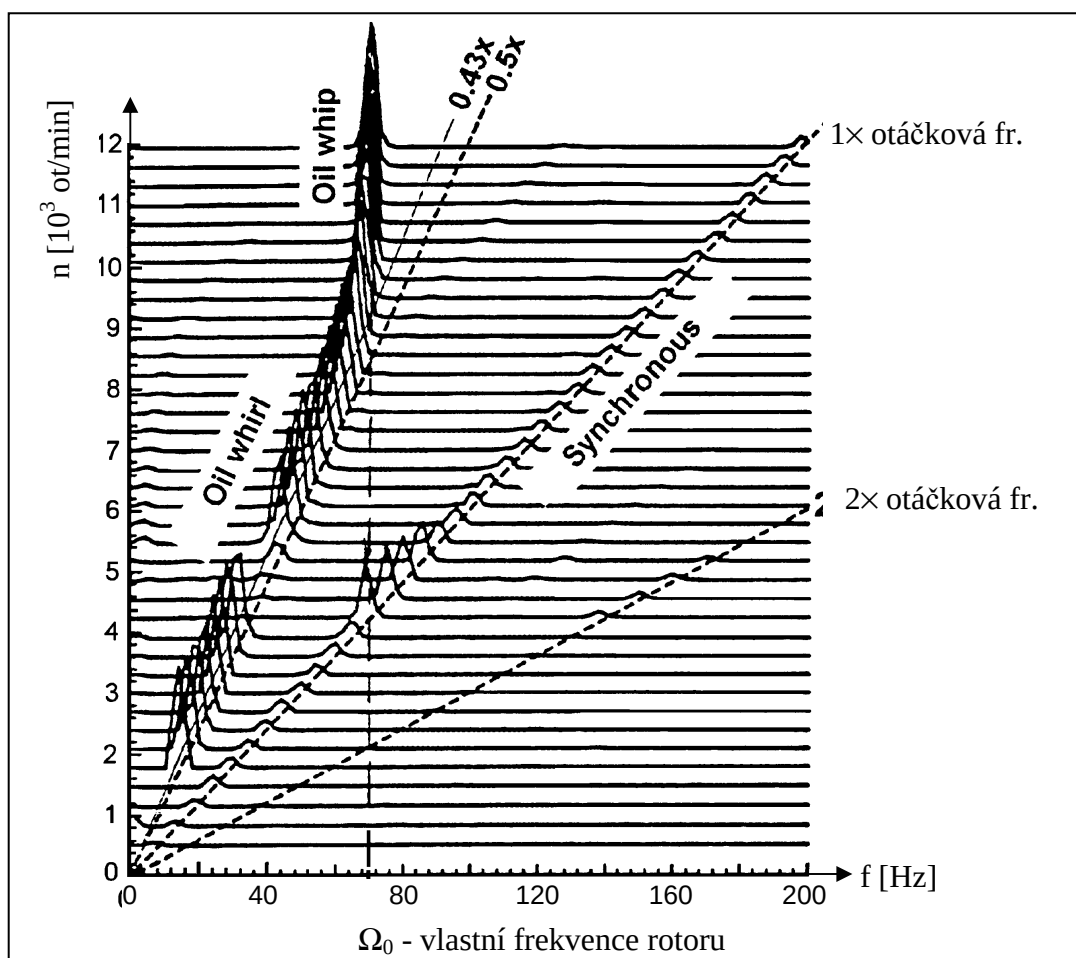


Obrázek 6.2 - Kaskádový diagram rozběhu stroje

Příklad kaskádového diagramu naměřeného při rozběhu stroje je na Obrázek 6.2. Je na něm vidět, jak amplituda kmitání roste s tím, jak se otáčky rotoru blíží kritickým otáčkám (vlastní frekvenci rotoru) a při kritických otáčkách 1900 ot/min je maximální. Totéž lze vidět také na Obrázek 6.3, což je řez kaskádovým diagramem na otáčkové frekvenci.



Obrázek 6.3 - Řez kaskádovým diagramem na otáčkové frekvenci



Obrázek 6.4 - Frekvence víření a tlučení oleje



Úlohy k řešení

Příklad 6.1. Celkové relativní vibrace

Na modelu RK4 změřte celkové hodnoty relativních vibrací a ohodnoťte stav stroje podle normy ČSN ISO 7919.

V laboratoři experimentální dynamiky je pouze jeden model stroje, který je uzpůsoben k měření relativních vibrací, a to Rotorkit RK4 firmy Bently Nevada. Jednotlivé týmy studentů se postupně vystřídají u tohoto modelu a změří celkové hodnoty relativních vibrací při různých provozních režimech - je možné měnit tlak oleje v kluzném ložisku a otáčky hřídele. Poté ohodnotí stav stroje podle normy ČSN ISO 7919.

Příklad 6.2. Spektra relativních vibrací při ustáleném režimu

Na modelu RK4 změřte spektra relativních vibrací při ustáleném režimu

Podobně jako v příkladě 6.1. změří jednotlivé týmy spektra relativních vibrací při různých provozních režimech. Ve všech režimech bude ve spektru přítomná výrazná špička otáčkové frekvence a případně její harmonické násobky. Provozní režimy přizpůsobte tak, aby alespoň jeden tým zaznamenal ve spektru i frekvenci víření oleje, ale vzhledem k destruktivní povaze tohoto režimu v něm stroj neprovozujte déle než 10 sekund. Zaznamenejte výrazné frekvenční špičky (frekvence a jejich amplitudy) a srovnajte, jak se spektra naměřená jednotlivými týmy liší.

Příklad 6.3. Kaskádový diagram při rozběhu (doběhu)

Na modelu RK4 změřte vibrace při rozběhu nebo doběhu stroje

Proveďte nastavení modelu RK4 tak, abyste mohli snímat spektra při rozběhu a/nebo doběhu a sestavit je do kaskádového diagramu. Cílový stav při rozběhu zvolte stejný, jako v předchozím příkladě 6.1 (nastavíte stejný tlak oleje v ložisku a konečné otáčky stejné, jako byly ustálené otáčky v příkladu 6.1). Proveďte řez kaskádou na otáčkové frekvenci a případně na frekvenci víření oleje, pokud se projevilo. Diskutujte v týmech o rozdílech v naměřených kaskádách a o příčinách těchto rozdílů.

Příklad 6.4. Orbita

Na modelu RK4 změřte orbitu

Měření proveďte ve stejných režimech jako v příkladě 6.1, ale místo zobrazení spekter nastavte analyzátor tak, aby vám zobrazil orbitu. V týmech srovnajte tvar orbity při různých režimech, zejména rozdíl mezi orbitou ve stabilním režimu a orbitou při víření olejového filmu.



Shrnutí pojmů

snímač výchylky

relativní vibrace

orbita

kaskádový diagram

kluzné ložisko

nestability olejového filmu - víření oleje (oil whirl), tlučení oleje (oil whip)



Otázky

1. Proč se vibračním snímaným pomocí snímačů výchylky říká relativní vibrace?
2. Jakou veličinu a jaký parametr při měření relativních vibrací měříme?
3. Co je to orbita?
4. K čemu lze využít kaskádový diagram naměřený při rozběhu nebo doběhu stroje?



Další zdroje

Při tvorbě tohoto textu byla použita následující literatura, ve které student nalezne podrobnější vysvětlení předkládané problematiky:

- [1] BILOŠ, Jan. *Vibrační diagnostika* [online].
<[http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni diagnostika/vibro.htm](http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/vibro.htm)>
- [2] BILOŠ, Jan. *Přehled norem z oblasti vibrační diagnostiky*. Bohumín: DTI, 2007
- [3] BRYCHCY, Jaroslav, HUDECZEK, Mečislav. *Vyvažování rotačních strojů*. Bohumín: DTI, 2007
- [4] FRYML, Bohumil, BORŮVKA, Vladimír. *Vyvažování rotačních strojů v technické praxi*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962
- [5] JULIŠ, Karel, BORŮVKA, Vladimír, FRYML, Bohumil. *Základy dynamického vyvažování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979
- [6] MUSZYŃSKA, Agnieszka. *Rotordynamics*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005
- [7] NĚMEČEK, Pavel, TOMEH, Elias. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. Bohumín: DTI, 2007
- [8] TŮMA, Jiří. *Zpracování vibrodiagnostických signálů*. Bohumín: DTI, 2007

Dále naleznete přílohy - protokoly k jednotlivým měřením.

CELKOVÉ EFEKTIVNÍ HODNOTY RYCHLOSTI VIBRACÍ MODELU**A. Měření v_{ef} a hodnocení dle ČSN ISO 10816-1****Postup:**

1. Schéma měřeného stroje s označením míst měření (dle ČSN ISO 13373-1 – číslování postupně od volného konce hnacího hřídele).
2. Označení měřicího přístroje:
3. Celkové hodnoty efektivní rychlosti vibrací v_{ef}

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

4. Označte v tabulce mohutnost vibrací, která slouží k hodnocení dle ČSN ISO 10816.
5. Hodnocení stroje podle normy ČSN ISO 10816-1:

6. Závěr:**7. Doporučení:****Datum:****Jméno:
Podpis**

VYVAŽOVÁNÍ METODOU PUTUJÍCÍHO NEVÝVAŽKU

Postup:

1. Místo a směr měření pro vyvažování (vybrané na základě předchozího měření):
2. Velikost pokusného závaží: $m =$
3. Naměřené hodnoty při pokusném závaží v různých místech po obvodu kotouče:

Rychlost	v_{ef} [mm/s]											
Místo												

4. Graf závislosti v_{ef} v na poloze na obvodu:

5. Místo, ve kterém jsou vibrace nejmenší:
6. Umístěte pokusné závaží do tohoto místa a opakujte měření. $v_{ef} =$
7. Měňte hmotnost pokusného závaží a opakujte měření:

Hmotnost (g)							
v_{ef} [mm/s]							

8. Výsledná poloha a velikost vyvažovacího závaží:
9. Závěrečné měření v_{ef} ve všech měřicích místech.

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

10. **Závěr** (hodnocení dle ČSN ISO 10816-1):

11. **Doporučení:**

Datum:
Jméno:
Podpis:

VYVAŽOVÁNÍ V JEDNÉ ROVINĚ – TŘÍKRUŽNICOVÁ METODA

A. Přípravná etapa - Měření v_{ef} a hodnocení dle ČSN ISO 10816-1

1. Schéma měřeného stroje:

2. Označení měřicího přístroje:

3. Celkové hodnoty efektivní rychlosti vibrací v_{ef} .

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

4. Označte v tabulce mohutnost vibrací (která slouží k hodnocení dle ČSN ISO 10816).

5. Hodnocení stroje podle normy ČSN ISO 10816-1:

6. **Závěr:**

7. Vyberte místa pro kontrolu, zda lze provést vyvažování v jedné rovině (ložiska po stranách kotouče nebo jiná vhodná místa):

8. Ohodnoťte poměr velikosti vibrací s ohledem na možnost vyvažování v jedné rovině:

9. **Doporučení:**

B. Vyvažování v jedné rovině – tříkružnicová metoda

1. Zápis měření: $m_T =$
- 2.

Číslo měření	0	1	2	3
v_{ef} [mm/s]				

3. Tříkružnicový diagram

4. $\varphi =$

5. Výpočet hmotnosti závaží

$m_V =$

6. Kontrolní měření ve všech měřicích bodech.

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

Závěr:

Datum:

Jméno:

Podpis:

VYVAŽOVÁNÍ V JEDNÉ ROVINĚ – VEKTOROVÁ METODA

A. Přípravná etapa - Měření v_{ef} a hodnocení dle ČSN ISO 10816-1

Postup:

1. Nakreslete schéma měřeného stroje:

2. Označení měřicího přístroje:

3. Celkové hodnoty efektivní rychlosti vibrací v_{ef} :

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

4. V tabulce zjistíte mohutnost vibrací tj. největší hodnotu v radiálním směru (která slouží k hodnocení dle ČSN ISO 10816):

maximální v_{ef} =

5. Hodnocení stroje podle normy ČSN ISO 10816-1:

6. **Závěr:**

7.

8. Nastavte nabídky na Micrologu tak, aby bylo možné měřit amplitudové spektrum a fázi složek.

9. Ustavte fotosondu tak, aby byl dostatečný externí signál pro spouštění měření.

10. Proveďte měření amplitudy a fáze otáčkové složky vibrací (1X) ve vybraných místech:

Složka 1X	(mm/s)/deg	
Místo/směr		
horizontálně		
vertikálně		

11. Ohodnoťte poměr amplitud a fází s ohledem na možnost vyvažování v jedné rovině:

12. **Doporučení**

B. Vyvažování v jedné rovině–vektorová metoda (s fází)

1. Nultý chod:

$v_0 =$

$\varphi_0 =$

2. Zkušební závaží:

$m_T =$

3. Zkušební chod:

$v_1 =$

$\varphi_1 =$

4. Vektorový diagram:

5. Vyvažovací závaží:

$$m_v = m_T \cdot \frac{v_0}{v_T} \qquad m_v =$$

6. Kontrolní chod - změřte v_{ef} ve všech měřicích bodech:

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

Závěr:**Datum:****Jméno:****Podpis:**

VYVAŽOVÁNÍ VE DVOU ROVINÁCH – VEKTOROVÁ METODA

A. Přípravná etapa – Měření v_{ef} a hodnocení dle ČSN ISO 10816

Postup:

1. Nakreslete schéma měřeného stroje:

2. Označení měřicího přístroje:
3. Celkové hodnoty efektivní rychlosti vibrací v_{ef}

Rychlost	v_{ef} [mm/s]						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

4. V tabulce zjistíte mohutnost vibrací tj. největší hodnotu v radiálním směru (která slouží k hodnocení dle ČSN ISO 10816)
maximální v_{ef} =

5. Hodnocení stroje dle normy ČSN ISO 10816

6. **Závěr:**

7. Nastavte nabídky na Micrologu tak, aby bylo možné měřit amplitudové spektrum a fázi složek.

8. Ustavte fotosondu, aby byl dostatečný signál pro spouštění měření.

9. Proveďte měření amplitudy a fáze otáčkové složky vibrací (1X) ve vybraných místech:

Složka 1X	(mm/s)/deg	
Místo/Směr		
Horizontálně		
Vertikálně		

10. Ohodnoťte poměr amplitud a fází s ohledem na možnost vyvažování ve dvou rovinách:

11. **Doporučení:**

B. Vyvažování ve dvou rovinách s měřením fáze – vektorová metoda

1. Nultý chod

Ložisko 1

Ložisko 2

$v_{01} =$

$v_{02} =$

$\varphi_{01} =$

$\varphi_{02} =$

2. Zkušební závaží v první vyvažovací rovině:

$m_{T1} =$

3. První zkušební chod:

Ložisko 1

Ložisko 2

$v_{11} =$

$v_{12} =$

$\varphi_{11} =$

$\varphi_{12} =$

4. Zkušební závaží v druhé vyvažovací rovině:

$m_{T1} =$

5. Druhý zkušební chod:

Ložisko 1

Ložisko 2

$v_{21} =$

$v_{22} =$

$\varphi_{21} =$

$\varphi_{22} =$

6. Spusťte v Micrologu výpočet velikosti a polohy potřebných vyvažovacích závaží a tato závaží do požadovaných míst umístěte.

Ložisko 1

Ložisko 2

$m_{V1} =$

$m_{V2} =$

$\phi_1 =$

$\phi_2 =$

7. Kontrolní chod:

Ložisko 1

Ložisko 2

$v_{k1} =$

$v_{k2} =$

$\varphi_{k1} =$

$\varphi_{k2} =$

8. Změřte v_{ef} ve všech měřících bodech:

Rychlost	$v_{ef} [mm/s]$						
Místo/směr							
Horizontálně							
Vertikálně							
Axiálně							

9. Závěr:

Datum:

Jméno:

Podpis:

ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ - "BUMP" TEST

Postup:

1. Načrtněte měřený stroj (součást) a vyznačte místo a směr buzení a snímání odezvy.
2. Označení měřicího přístroje:
3. Proveďte nastavení analyzátoru. Spoušť (TRIGGER) nastavte na INTERNAL, úroveň spouště na 10% maximálního rozsahu.
4. Úderem vybud'te strukturu a změřte spektra zrychlení vibrací. Výrazné frekvenční špičky (vlastní frekvence) запиšte do tabulky.

špička frekvence	frekvence [Hz]	amplituda [mm s ⁻²]
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

5. Závěr:

Datum:

Jméno:

Podpis:

FREKVENČNĚ PRŮMĚROVANÁ SPEKTRA VIBRACÍ A SPEKTRA VIBRACÍ PŘI ČASOVĚ SYNCHRONNÍM PRŮMĚROVÁNÍ

Frekvenčně průměrovaná spektra vibrací

- Nastavte analyzátor podle instrukcí pro daný typ (měření spektra v_{ef} , frekvenční rozsah, citlivost snímače, počet čar, počet průměrů, překrytí, typ okna).
- Použijte laserový měřič otáček a změřte otáčky:

hřídel 1: ot/min, tj. Hz
 hřídel 2: ot/min, tj. Hz
- Proveďte postupně měření v měřicích bodech a směrech před a za řemenovým převodem.
- Po dokončení měření v daném místě a směru odečtěte pomocí kurzoru velikosti hlavních špiček ve spektru a napište je do následující tabulky. Špičky by měly být harmonické obou otáčkových frekvencí.

ložisko	směr	Hlavní složky ve spektru [mm/s]				
		Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
	H					
	V					
	A					
	H					
	V					
	A					

Spektra vibrací při časově synchronním průměrování

Fázová značka na hřídeli 1:

1. Nastavte analyzátor pro měření s externí spouští, použijte velký počet průměrů (50 až 100).
2. Zapište hlavní špičky ve spektru do následující tabulky.

ložisko	směr	Hlavní složky ve spektru [mm/s]				
		Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
	H					
	V					
	A					
	H					
	V					
	A					

Fázová značka na hřídeli 2:

3. Opakujte měření s externí spouští od hřídele 2 a zapište hodnoty hlavních špiček.

ložisko	směr	Hlavní složky ve spektru [mm/s]				
		Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
	H					
	V					
	A					
	H					
	V					
	A					

4. Porovnejte všechna tři měření:

5. **Závěr:**

Datum:

Jméno:

Podpis:

ZJIŠŤOVÁNÍ ZÁVAD LOŽISEK

Postup:

1. Nakreslete schéma měřeného stroje s označením míst měření (dle ČSN ISO 13373-1).
2. Označení měřicího přístroje:
3. Na dvou vybraných ložiscích změřte hodnotu SEE(perem) a klasické spektrum rychlosti a zrychlení .
4. Určete hodnotu poruchových frekvencí u ložisek modelu ADASH (Případně najděte v katalogu, či programu Prism).
5. Nastavte analyzátor jako pro obvyklá měření bez spouště s těmito výjimkami:

Analyzer

Input setup

Type: ENV ACC

Spectrum setup:

LINES 800 (1600) Tak aby šlo tyto frekvence odlišit od jiných očekávaných

Average type: AVERAGE

Average mode: FINITE

Number of Averages: 5-6

Detection Pk-Pk

Window: HANNING

Display setup

Trace: DUAL – Magnitude, Time

Pro nastavení filtrů použijte tato doporučení: Jsou-li hledané ložiskové frekvence

do 10 Hz nastavte filtr na	5Hz-100 Hz
do 100 Hz	50 Hz-1000 Hz
do 1000 Hz	500 Hz-10000 Hz
do 10000 Hz	5000 Hz-100000 Hz

6. Změřte obálky zrychlení na vybraných ložiscích modelu.
7. Spust'te program PRISM nebo spočt'ete poruchové frekvence. Ložiska na modelu Adash mají tyto parametry:

počet kuliček	$n = 8$
průměr roztečné kružnice	$P_d = 33,5 \text{ mm}$
průměr kuličky	$B_d = 7,5 \text{ mm}$
BPMI = $4,896 \times \text{otáčky}$	BPF = $2,121 \times \text{otáčky}$
BPFO = $3,104 \times \text{otáčky}$	FTF = $0,388 \times \text{otáčky}$

8. Změřte otáčkovou frekvenci a spočítejte závadové frekvence ložisek.

otáčková frekvence =

BPFI =

BPFO =

BSF =

FTF =

9. V naměřeném spektru hledejte ložiskové frekvence. Případně postranní pásma okolo těchto frekvencí, které mohou být modulovány otáčkami (o 1×, 2×, 3×...).

10. Vyplňte následující tabulku pro vybrané ložisko v případě výběru ano určete amplitudu na dané frekvenci.

Ložisko číslo:

	ANO / NE	mag [mm/gE]
SEE		
BPFI - vnitřní kroužek	*)	
postranní pásma BPFI		
BPFO - vnější kroužek	*)	
BSF - valivý element	*)	
postranní pásma BSF		
FTF - klec	*)	

*) V případě "ANO" vyplňte amplitudu na dané frekvenci.

Ložisko číslo:

	ANO / NE	mag [mm/gE]
SEE		
BPFI - vnitřní kroužek	*)	
postranní pásma BPFI		
BPFO - vnější kroužek	*)	
BSF - valivý element	*)	
postranní pásma BSF		
FTF - klec	*)	

*) V případě "ANO" vyplňte amplitudu na dané frekvenci.

10. **Závěr** (Porovnejte relativní stav obou ložisek.):

Datum:

Jméno:

Podpis:

POLOHA STŘEDU ČEPU, VÝCHYLKA RELATIVNÍCH VIBRACÍ S_{p-p}

Postup:

1. Nakreslete schéma měřeného stroje s označením míst měření.
2. Typ a výrobní číslo měřicího přístroje:
voltmetr:
Pulse:
Microlog CMVA40:
3. Proveďte nastavení analyzátoru pro měření celkových hodnot dle instrukcí pro přístroj.
4. Změřte celkové hodnoty relativní výchylky vibrací S_{p-p} a zapište je do tabulky.

Číslo měření							
Otáčky [ot/min]							
Poloha: Snímač X (H)							
Poloha: Snímač Y (V)							
Vibrace: Snímač X: S_{p-p} [μm]							
Vibrace: Snímač Y: S_{p-p} [μm]							

5. V tabulce zjistěte mohutnost vibrací, tj. největší hodnotu (pro hodnocení dle ČSN ISO 7919-3):
maximální S_{p-p} =

6. Hodnocení stroje podle normy ČSN ISO 7919-3:

7. Závěr:

8. Doporučení:

Datum:

Jméno:

Podpis:

SPEKTRA RELATIVNÍCH VIBRACÍ PŘI USTÁLENÉM REŽIMU

Postup:

1. Nastavte analyzátor (Pulse nebo Microlog) podle instrukcí pro daný typ (měření spektra S_{p-p} , frekvenční rozsah, citlivost snímače, počet čar, počet průměrů, překrytí, typ okna).
2. Proveďte postupně měření při různých otáčkách hřídele.
3. Odečtěte pomocí kurzoru amplitudy hlavních špiček ve spektru a napište je do tabulky:

Otáčky [Hz]	sonda	Hlavní složky ve spektru [μm]			Další složky (Hz / μm)
		1×	2×	3×	
	X				
	Y				
	X				
	Y				
	X				
	Y				
	X				
	Y				
	X				
	Y				
	X				
	Y				

Závěr:

Datum:

Jméno:

Podpis:

KASKÁDOVÝ DIAGRAM ROZBĚHU (DOBĚHU)

Postup:

1. Nastavte analyzátor (Pulse nebo Microlog) pro měření při rozběhu (doběhu).
2. Proveďte měření při plynulé změně otáček a sledujte:
 - ♦ vznik (zánik) subsynchronních vibrací – odečtěte otáčky na otáčkoměru
 - ♦ přechod přes kritické otáčky
3. Zaznamenejte pozorované otáčky vzniku (zániku) subsynchronních vibrací:

začátek:

konec:

Závěr:**Datum:****Jméno:****Podpis:**

MĚŘENÍ ORBITY

Postup:

1. Nastavte analyzátor Microlog pro měření filtrované orbity.
2. Proved'te měření při otáčkách těsně pod otáčkami vzniku subsynchronních vibrací a uložte orbitu do paměti.
3. Proved'te měření při otáčkách nad otáčkami vzniku subsynchronních vibrací a uložte orbitu do paměti.
4. Porovnejte velikost a směr precese orbit v obou režimech.

Závěr:

Datum:

Jméno:

Podpis: