

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vibrodiagnostika rotujících částí

Marcel Andrlé

Bakalářská práce
2011

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marcel ANDRLE**
Osobní číslo: **D08387**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků
a infrastruktury**
Název tématu: **Vibrodiagnostika rotujících částí**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Vibrodiagnostika
3. Metody využití vibrodiagnostiky
4. Vyhodnocení charakteristických průběhů vibrodiagnostiky
5. Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Marcel Kreidl a kolektiv.: DIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY. Vydavatelství ČVUT. Praha 2001.

Vojtěch Mišun.: Vibrace a hluk. PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1998.

Jiří Tůma.: Zpracování signálu získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika. Praha 1997.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Jilek, DiS.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



Ing. Ivo Šefčík, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2011

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10.10.2011

Marcel Andrlé

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petru Jílkovi, DiS. za jeho čas, cenné připomínky a zájem, který věnoval této práci. Děkuji také všem členům katedry dopravních prostředků a diagnostiky za vytvoření příjemného pracovního prostředí.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá obecnými základy vibrodiagnostiky, dále snímači vibrací a v neposlední řadě metodami využití vibrodiagnostiky. Součástí práce je měření, kde dojde k ověření daných zákonitostí. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

vibrace; frekvence; signál; diagnostika

TITLE

Vibrodiagnostics of Rotate Parts

ANNOTATION

This bachelor's work dealing with the general basis of vibrodiagnostics, then with the sensors of vibrations and last but not least with the methods of using vibrodiagnostics. The part of this work is measurement where is the attestation of the exist regularities are coming. In conclusion the results of measurement are striked.

KEYWORDS

vibration; frequency; signal; diagnostics

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Vibrodiagnostika.....	9
2.1	Základní definice a terminologie.....	9
2.2	Vibrodiagnostika obecně.....	14
2.3	Měření vibrací.....	15
3	Metody využití vibrodiagnostiky.....	21
3.1	Frekvenční analýza pomocí FFT.....	21
3.2	Celková mohutnost kmitání (trendování vibrací).....	23
3.3	Kepstrální analýza.....	25
3.4	Alternativní metody vibrodiagnostiky k měření techn. stavu valivých ložisek.....	26
3.5	Orbitální analýza.....	29
3.6	Multiparametrická diagnostika.....	30
3.7	Měření fáze.....	31
4	Vyhodnocení naměřených průběhů vibrodiagnostiky.....	33
4.1	Měření vyváženého stavu.....	36
4.2	Měření s nevyváhou.....	38
4.3	Měření s poloviční nevyváhou.....	40
5	Závěr.....	42
	Použitá literatura.....	43
	Seznam příloh.....	44

1 Úvod

Historický vývoj vibrodiagnostiky v podstatě kopíruje vývoj metod technické diagnostiky, to znamená od pocitových a vizuálních vjemů, přes jednoduché snahy o zesílení vibračního, respektive hlukového signálu, se dostáváme až k použití nejmodernější měřicí techniky s maximální vypovídající schopností o technickém stavu sledovaného objektu.

Za průlom v technické diagnostice je nutno považovat nasazení výpočetní techniky, které přineslo převratné změny do celé řady oblastí, to znamená i do vibrodiagnostiky a údržby. Tím se naskytla možnost nejen měřit vibrační signál, ale především jej vyhodnotit v reálném čase.

Základním cílem sledování vibrací rotujících částí je získání informací o provozním a technickém stavu za účelem zabezpečení strategického plánování a řízení údržby. Důležitou součástí uvedeného procesu se tak stává hodnocení stavu a průběhu vibrací za dobu dosavadního používání daného objektu. Je nutno brát na vědomí, že vibrace u rotujících částí jsou úzce vázány na dynamické namáhání dané části (ložisek, převodovek, nesouosostí, nevývahou, trhlinami v důležitých komponentech, opotřebením apod.), tudíž jejich sledování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky.

Důvody pro měření vibrací v praxi mohou být například ověření dynamického zatížení stroje nebo jeho části, zabránění vybuzení rezonancí v důležitých částech stroje, možnost lokalizovat a dále tlumit či izolovat zdroje vibrací. Nebo se vibrace mohou dále měřit za účelem provádění bezdemontážní diagnostiky, monitorování provozního stavu stroje či pro možnost počítačového modelování a ověření.

Ve své bakalářské práci se budu zabývat vibrodiagnostikou, jejími metodami a především měřením vibrací na ventilátoru chlazení, kde si za použití dostupné techniky ověřím dané zákonitosti a na základě toho zpracuji a vyhodnotím charakteristické průběhy. Závěrem shrnu celé měření.

2 Vibrodiagnostika

2.1 Základní definice a terminologie¹

Rychlost - charakteristika pohybu, která informuje o tom, jakým způsobem se mění poloha tělesa (hmotného bodu) v čase. Rychlost je vektorová fyzikální veličina, neboť udává jak velikost změny, tak i její směr. Rychlost lze určit jako derivaci dráhy podle času.

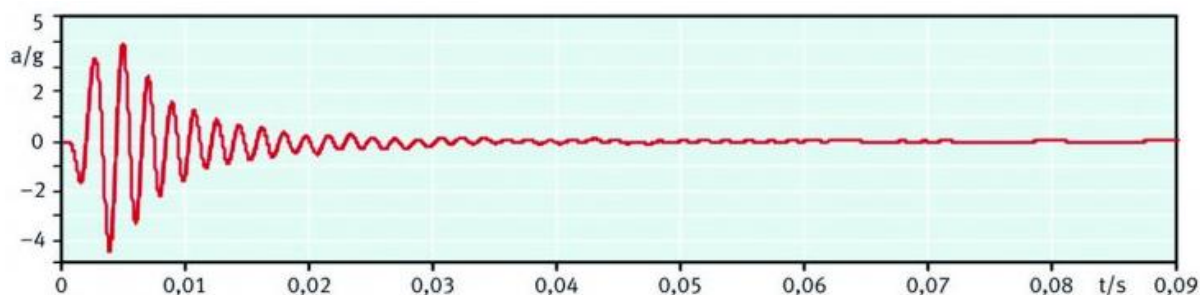
Zrychlení - charakteristika pohybu, která sděluje, jakým způsobem se mění rychlost tělesa (hmotného bodu) v čase. Zrychlení je vektorová fyzikální veličina, neboť udává jak velikost změny, tak i její směr. Lze vypočítat okamžité zrychlení a průměrné zrychlení. Zrychlení lze také určit jako derivaci rychlosti podle času. Jestliže zrychlení směřuje proti směru pohybu, pak je označováno jako zpomalení a má záporné znaménko.

Frekvence (kmitočet) - je fyzikální veličina, která udává počet opakování (počet kompletních cyklů) periodického děje za jednotku času.

Oscilace – změna popsána časem a amplitudou počtu – frekvence vztažená na referenci, kdy amplituda kolísá (je větší či menší) kolem reference.

Vibrace – oscilace, kde kvantita (počet oscilací) je parametrem, který definuje pohyb mechanického systému.

Obrázek č. 1: Příklad průběhu vibrací (tlumené vibrace)

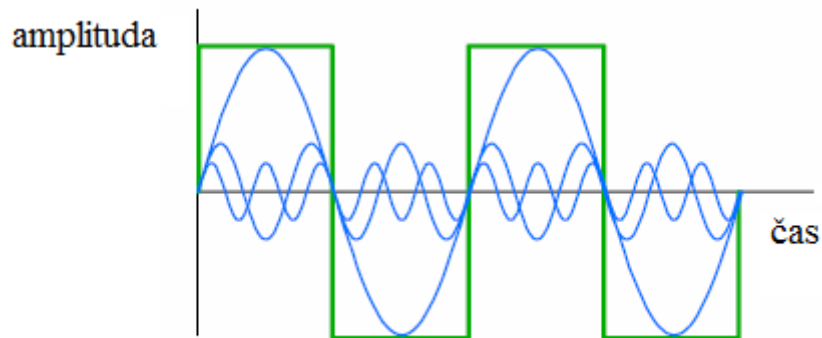


Zdroj: *Tlumené vibrace* [online]. 2011 [cit. 2011-07-28]. Dostupné z www.mmspektrum.com

¹ HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

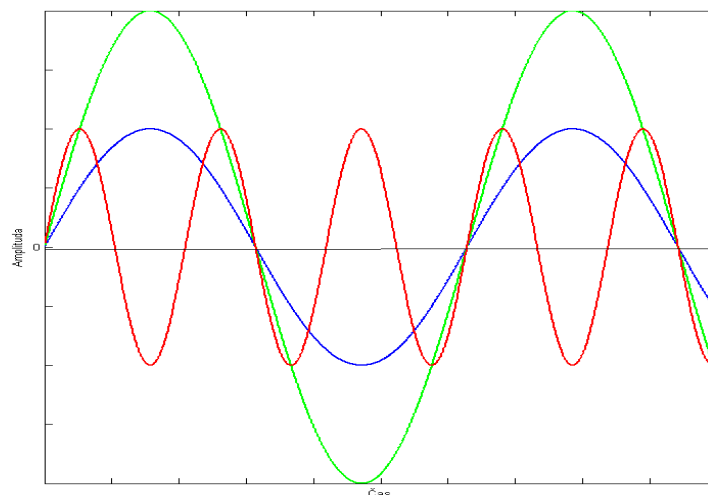
Periodický signál – je složený z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobkem jedné základní frekvence. Z pohledu harmonického signálu lze hovořit o velmi širokém uplatnění v oboru kmitání a je obecně definován jako reálná časová funkce. Periodický signál je složený z harmonických signálů, které jsou násobkem jedné základní frekvence (vyšší harmonické – celé násobky a subharmonické – částečné násobky).

Obrázek č. 2: Příklady periodického signálu



Zdroj: Prezentace *Vibrace a rázy: Úvod do problematiky*. Univerzita Pardubice

Obrázek č. 3: Příklady periodického signálu

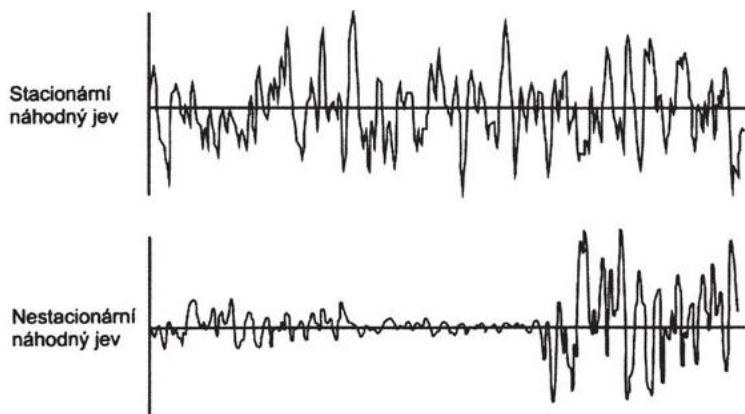


Zdroj: Autor dle teoretických poznatků

Kvasiperiodický signál – signál rovněž složený z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou násobky minimálně dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.

Stacionární a nestacionární signál – průběh signálu má ustálený – stacionární – charakter nebo se v čase mění – nestacionární charakter. Kritérium stacionárnosti je závislé na délce záznamu signálu – průběh signálu se může jevit jako stacionární za dlouhý časový úsek a nestacionární za krátký časový úsek.

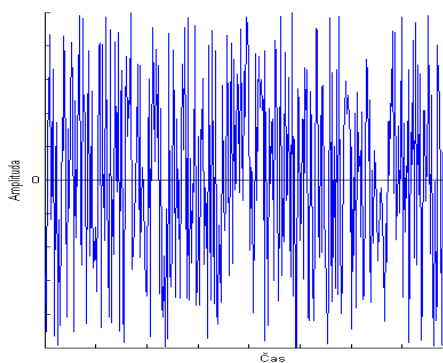
Obrázek č. 4: Stacionární a nestacionární signál



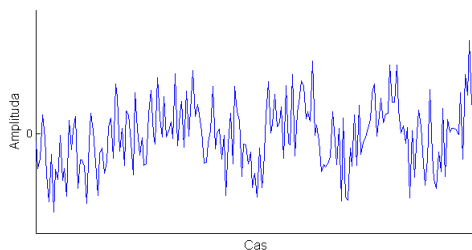
Zdroj: *Typy vibrací a pohybů* [online]. 2011 [cit. 2011-07-28].
Dostupné z www.casopisstavebnictvi.cz

Obrázek č. 5: Stacionární a nestacionární signál

a) Stacionární signál



b) Nestacionární signál



Zdroj: Autor dle teoretických poznatků

Technická diagnostika – obor, který se zabývá metodami a prostředky ke zjišťování technického stavu objektu. Technickou diagnostikou se rozumí bezdemontážní a nedestruktivní zjišťování aktuálního stavu diagnostikovaného objektu.

Diagnóza – vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Jedná se o závěr z diagnostické analýzy. Z hlediska terminologie spolehlivosti se jedná o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných technických podmínek. Základními úkoly diagnózy jsou:

- 1) **detekce vady nebo poruchy** - identifikace vady nebo identifikace úplné nebo částečné poruchy objektu,
- 2) **lokalizace vady nebo poruchy** - určení místa vady nebo poruchy v objektu,
- 3) **specifikace** - stanovení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením diagnostického signálu, tzn. okamžitým stanovením a geneze po dobu provozu,
- 4) **predikace** - určení prognózy zbytkové životnosti (času do nutné opravy) za účelem strategického plánování a řízení údržby.

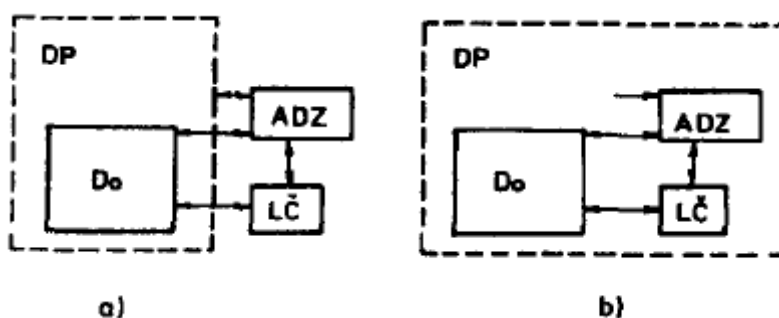
Prognóza (z řeckého „prognosis“) – extrapolace vývoje technického stavu do budoucnosti. Cílem prognózy může být např. stanovení na základě statistických vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového stavu v následujícím období nebo na základě vad stanovení termínů dílčích a generálních oprav nebo výměn komponentů objektu.

Geneze (z řeckého „genesis“) – analýza možných a pravděpodobných příčin vzniku poruchy nebo vady, a tím předčasného zhoršení technického stavu daného objektu.

Diagnostický systém – vyhodnocuje technický stav objektu a tvoří jej:

- 1) **diagnostické prostředky** – soubor technických zařízení, postupů, metod pro analýzu a vyhodnocení technického stavu objektu,
- 2) **diagnostický objekt a obsluha.**

Obrázek č. 6: Základní schéma a formulace diagnostického systému



Do – diagnostikovaný objekt

ADZ – automatizované diagnostické zařízení

LČ – lidský činitel

DP – diagnostické pozadí

Zdroj: LÁNSKÝ; MAZÁNEK, *Diagnostika a informační diagnostické systémy I*

Diagnostické systémy pro sledování technického stavu objektu jsou trvale instalovány – ON LINE měření nebo jsou tzv. přenosné měřicí systémy – OFF LINE měření. Další možnou variantou je kombinace, tzn. snímače jsou instalovány trvale a měření dat je prováděno cyklicky (periodicky).

Technický stav – diagnostikovaného objektu je tvořen odpovídající velikostí a vývojem diagnostické veličiny a množinou vybraných vlastností, včetně technických parametrů.

Provozní schopnost – stav, ve kterém je objekt schopen vykonávat předepsané funkce za daných podmínek.

Diagnostikovatelnost – vlastnost objektu, která vyjadřuje způsobilost k použití diagnostických prostředků.

Porucha – jev, který ukončuje provozní schopnost objektu.

Opravitelnost – zajištění možnosti výměny, resp. opravy (totální havárie si vynucuje zakoupení nového stroje).

Diagnostická veličina – je nositelem informace o technickém stavu daného objektu (fyzikální, funkční). Pro diagnostické měření má vypovídající hodnotu.

Diagnostický ukazatel – charakteristika, která je odvozena z diagnostické veličiny (diagnostických veličin) a vyjadřuje vlastnosti diagnostického objektu.

Diagnostický test – posloupnost úkonů (kroků) potřebných pro určení diagnostického ukazatele (diagnostických ukazatelů).

Detekce poruchy – identifikace poruchy daného objektu (nebo jeho funkční části) na základě hodnot diagnostických ukazatelů.

Lokalizace poruchy – určení místa, rozsahu a příčiny poruchy objektu na základě vyhodnocení diagnostických ukazatelů.

Detekční test – diagnostický test, kterým se zjišťuje, jestli je objekt v provozuschopném nebo poruchovém stavu.

Simulace poruchy – metoda, při které se zjišťuje reakce objektu při uměle vytvořeném poruchovém stavu diagnostikovaného objektu.

2.2 Vibrodiagnostika obecně

Vibrodiagnostika je jedním z nejvýznamnějších oborů technické diagnostiky. Nachází uplatnění na nejrůznějších rotačních i jiných pohybujících se uzlech strojů. Provoz všech strojů vázaný na rotující pohyb je provázen mechanickým kmitočtem – vibracemi, kterým se nelze v provozní praxi vyhnout.

Vibrace, jak už bylo zmíněno, jsou zapříčiněny dynamickým namáháním určité části stroje, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, nevyváhou rotujících částí, nesouosostí, vůlemi pohybových součástí, stykem třecích ploch, střetem dvou navzájem pohybujících těles (rázy) apod. Především u hřídelí je důležité se zmínit o torzním kmitání. Torzní (krouživé) kmitání vzniká kolem osy hřídele. Je nebezpečnější než ohybové namáhání.

Torzní kmitání je způsobeno periodickou změnou krouticího momentu od setrvačných sil a tlaku plynu. Torzní kmity dosahují velkých hodnot hlavně v rezonanci, kdy souhlasí frekvence vlastního kmitání torzní soustavy s frekvencí vynuceného kmitání. Torzní kmitání se vyskytuje především u klikových a vačkových hřídelí spalovacích motorů anebo u hřídelí, kde délka hřídele převyšuje několikanásobně jeho průměr.

Prvotním, co může následně i zcela znehodnotit výsledky měření vibrací, je určení, zda v daném případě jde o vibrace relativní nebo absolutní, což vede k výběru příslušného typu snímače. Zatímco absolutní vibrace popisují pohyb sledovaného tělesa (části stroje nebo zařízení) zpravidla vzhledem k Zemi, při relativním měření jde o pohyb vzhledem k uměle vytvořené, respektive vhodně zvolené základně. Takovou základnou je zpravidla rám stroje, který sám může ještě různě kmitat vzhledem k zemskému souřadnému systému. Důležitá je zde dostupnost inkriminované části stroje buď přímá, nebo popř. s využitím přenosu jejího chvění na přístupnější místo.

Podkladem pro diagnostické vyhodnocovací metody jsou především objektivní a kvalitní údaje o sledovaném systému, které získávané buď jednorázovým změřením vibrací, nebo trvalým sledováním. K diagnostickým účelům se v oblasti mechanického chvění nabízí jednak frekvence (kmitočet) kmitání a dále některá ze tří dostupných charakteristických veličin – výchylka, rychlost nebo zrychlení kmitavého pohybu.

Vibrodiagnostika využívá jako diagnostického parametru vibrace. Právě tento diagnostický parametr dává informace k určení objektivního technického stavu rotujících strojů. Včasná detekce možné závady je pak základním předpokladem pro strategické plánování nápravných opatření. Správnost a jednoznačnost diagnózy sledovaného objektu závisí na optimálním návrhu diagnostického systému, a to z hlediska bezpečnostního i ekonomického, a na pečlivé analýze diagnostikovatelosti vybraných možných závad.

2.3 Měření vibrací

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejdříve odpovídat průběhu mechanického kmitání. Mechanické kmitání určují vedle frekvence také výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou navzájem závislé. Zásadním pro funkci snímače vibrací je pohyb seismické hmoty s hmotností m vzhledem k objektu o hmotnosti M , jehož vibrace se měří.

Pro ideální případ platí: $m.a + b.v + k.y = Fb = M.a_x$

y – výchylka

v – rychlost

a – zrychlení (pohybu seismické hmoty snímače vzhledem ke sledovanému objektu)

a_x – zrychlení objektu

m – hmotnost seismické hmoty snímače

M – hmotnost objektu

k – tuhost pružiny

b – součinitel tlumení

Fb – budicí síla

V podstatě existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu:

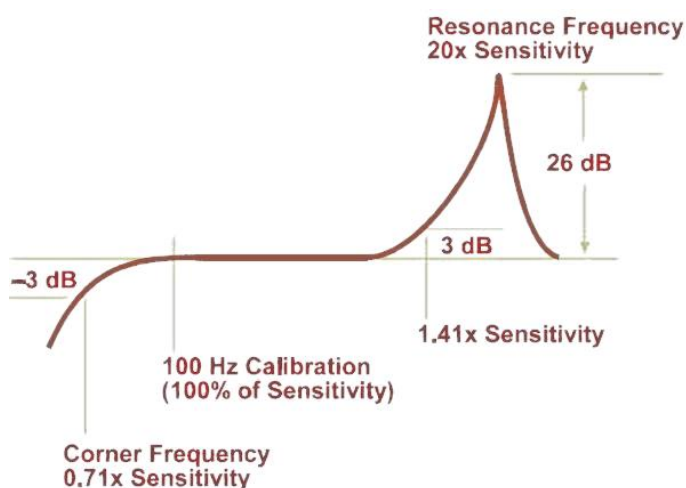
- seismická zařízení, která se montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce,
- snímače relativní výchylky, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy.

Ale existují i jiné typy měření, které vyžadují jiné typy snímačů, jako jsou např. tenzometry. Jejich použití pro sledování vibrací je však méně obvyklé.

Výběr příslušných snímačů závisí na dané aplikaci, tzn. měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda měříme absolutní či relativní vibrace, zda provádíme měření nízkofrekvenčních nebo běžných frekvenčních vibrací apod.

Nejrozšířenějším typem snímače vibrací je **akcelerometr**, jehož výstup může být zpracován tak, aby dával libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Lze splnit podmínku $m \ll M$ (hmotnost seismické hmoty snímače m je mnohem menší než hmotnost sledovaného objektu M), přičemž se současně předpokládá až nekonečně tuhé připojení akcelerometru ke sledovanému objektu. Zpravidla se akcelerometry montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Akcelerometry mohou být dostupné s různými montážními rezonančními frekvencemi, v typickém případě od 1 kHz výše.

Obrázek č. 7: Frekvenční charakteristika akcelerometru



Zdroj: *Snímače vibrací* [online]. 2011 [cit. 2011-10-01]. Dostupné z www.337.vsb.cz

Obecně se doporučuje, aby lineární rozsah namontovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence. Akcelerometry se vyrábějí v různých velikostech a jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem (1 ku 10^6) a širokým frekvenčním rozsahem. Bývají přednostně používány v aplikacích s malými objekty, jež mají malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. Typický akcelerometr obsahuje jeden nebo až několik piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle, a podle jeho umístění a hmoty ve snímači rozeznáváme dva druhy akcelerometrů, tlakový a smykový.

Obrázek č. 8: Piezoelektrické akcelerometry

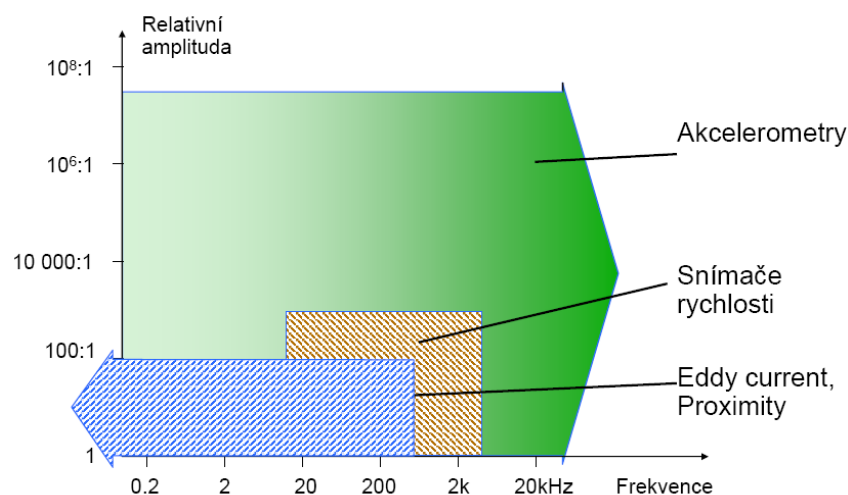


Zdroj: *Snímače vibrací - piezoelektrické akcelerometry* [online]. 2011 [cit. 2011-07-29]. Dostupné z www.industry.net.cz

Dalším typem je **snímač rychlosti vibrací**, jehož výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál, jež je úměrný mechanické (vibrační) rychlosti tělesa. Je zde dominantní tlumení (velká hodnota součinitele tlumení b) a zanedbatelně malá hmotnost seismické hmoty snímače (m). Většinou se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující) konstrukci zařízení. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívku, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.

Třetí možností je **bezdotyková sonda**, jejíž výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje. U rotujících strojů, zejména u velkých turbínových strojů a u strojů, u nichž hmotnost nosné konstrukce je velká ve srovnání s hmotností rotoru, je nezbytně nutné měřit relativní výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo ověřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříni stroje. Snímač výchylky dává střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu. Při vhodné kombinaci snímače výchylky se seismickým snímačem lze získat měření absolutní výchylky hřídele tak, že se vektorově sečtou dva signály výchylky. Většina snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Ve snímači se nachází cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud, a tato cívka generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé materiály, v materiálu vznikají vířivé proudy, které berou energii z vysokofrekvenčního magnetického pole.

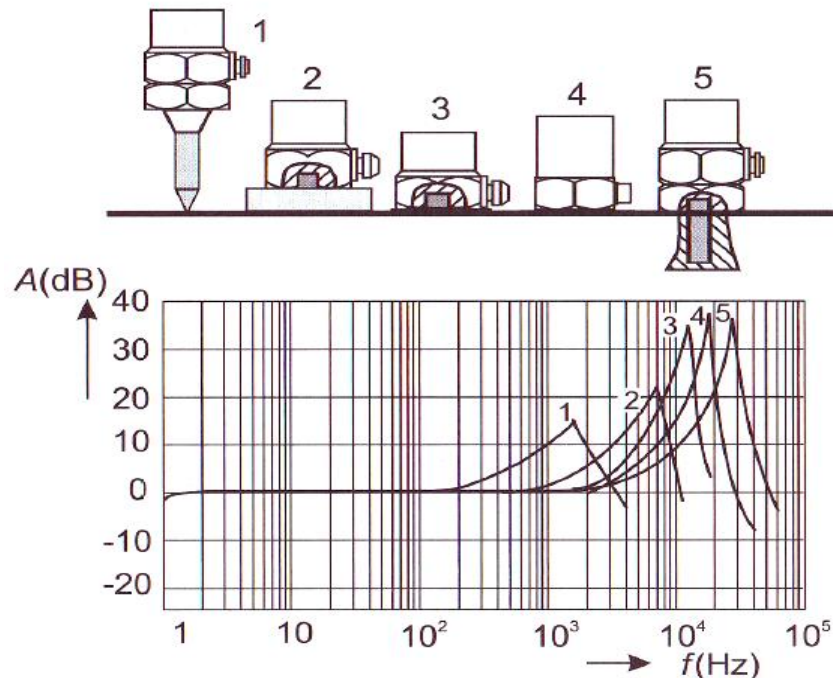
Obrázek č. 9: Pracovní rozsahy snímačů vibrací



Zdroj: Prezentace *Vibrace a rázy: Úvod do problematiky*. Univerzita Pardubice

Správné měření vibrací strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímač, tzn. rozhoduje připevnění snímače. Doporučený způsob uchycení závisí na přístupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Danou problematikou se zabývá norma ČSN ISO 5438. Je nutné vědět, že způsob uchycení nejvýrazněji ovlivní frekvenční odezvu snímače, zejména při měření na vysokých frekvencích. Piezoelektrické akcelerometry v základním provedení lze obvykle použít v pásmu od několika hertzů do 20 až 40 kHz. Nejmenšího ovlivnění frekvenční charakteristiky a naopak maximálního využití frekvenčního rozsahu se může dosáhnout při upevnění snímačů závrtnými šrouby, popř. ještě vylepšeném tenkou vrstvou silikonové vazelíny mezi styčnými plochami. Velmi dobrého frekvenčního rozsahu se také dosahuje při připevnění snímače včelím voskem nebo speciálními lepidly. Adhezní síla musí spolehlivě udržet snímač na dané ploše a současně také musí být možné snímač bez poškození sejmut. Proto se zde často používá také zubní cement nebo kyanoakrylátová lepidla. Největší problémy jsou se snímači s ručním hrotem nebo magnetickou příchytkou, které však mají svůj nezastupitelný význam při hledání vhodného měřicího místa.

Obrázek č. 10: Vliv montáže akcelerometrů na frekvenční charakteristiky



- 1) ruční sonda
- 2) upevnění šroubem přes permanentní magnet
- 3) přilepená kovová podložka se šroubem

- 4) přímé přilepení akcelerometru k objektu lepidlem nebo samolepící podložkou případně upevnění přes včelí vosk
- 5) upevnění přes závrtný šroub do objektu s možností elektrické izolace od objektu

Zdroj: KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav, *Technická diagnostika*

Stejný význam jako způsob připevnění má i vhodná volba místa pro instalaci snímače. Například u absolutních snímačů je třeba volit taková místa, aby tuhostí a pružností konstrukce částí sledovaného stroje nedošlo ke zkreslení chvění nebo jeho frekvence. Významnou roli v kvalitě snímače hraje také jeho hmotnost, kde je podmínkou, aby hmotnost snímače byla menší nebo rovna 1/10 hmotnosti kmitající součásti.

Diagnostický signál je velmi často zahlučen rušením, jednak vlivem ostatních jevů v daném objektu a jednak vlivem okolního prostředí. Z tohoto důvodu je nutno změřený diagnostický signál nejen analyzovat z hlediska detekce, lokalizace a určení typu závady, ale také z hlediska potlačení rušení. Ve vibrodiagnostice (technické diagnostice) jsou proto stále častěji aplikovány kromě standardních metod zpracování signálu, tzv. pokročilé metody analýzy signálu, založené na statistických metodách.

3 Metody využití vibrodiagnostiky

Vibrace strojů nebo jeho části a následný hluk jsou obecně buzeny zvnějšku kinematicky nebo silově, jsou také samobuzeny změnou parametrů apod. Pravidelnost buzení a jeho intenzita je dána technickým stavem zařízení a jeho opotřebením. Hlavním nástrojem vibrační diagnostiky je frekvenční analýza, ale existují i jiné používané metody, které budou naplní následujících podkapitol.

3.1 Frekvenční analýza pomocí FFT

Frekvenční analýza pomocí FFT je základní a nejběžnější analytická metoda, která v průběhu vibračního signálu hledá periodické děje, které pak v daném souřadném systému zobrazí. První možností souřadného systému je amplituda (osa y) a frekvence (osa x), jedná se o **frekvenční spektrum**.

Dalším způsobem je pak amplituda (osa y) a čas (osa x), což zobrazuje **časový průběh**. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány, analyzovány a zobrazeny ve formě tabulek a grafů za pomoci zařízení pro monitorování stavu vibrací (frekvenčního analyzátoru vibrací).

Frekvenční spektrum je tedy zobrazení v souřadnicích amplituda – frekvence. Z pohledu přenášené energie jsou časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné. U zařízení s periodickým pracovním cyklem je vibrační signál způsoben těmito periodickými ději. Frekvenční rozklad je rozklad na množství sinusových signálů s příslušnou amplitudou a příslušnou počáteční fází. Tento rozklad dává informace o technickém stavu a možných příčin jeho zhoršení. Nejrozšířenějším způsobem stanovení frekvenčního spektra je **Fourierova transformace (FFT)**.

Výhody Fourierovy transformace:

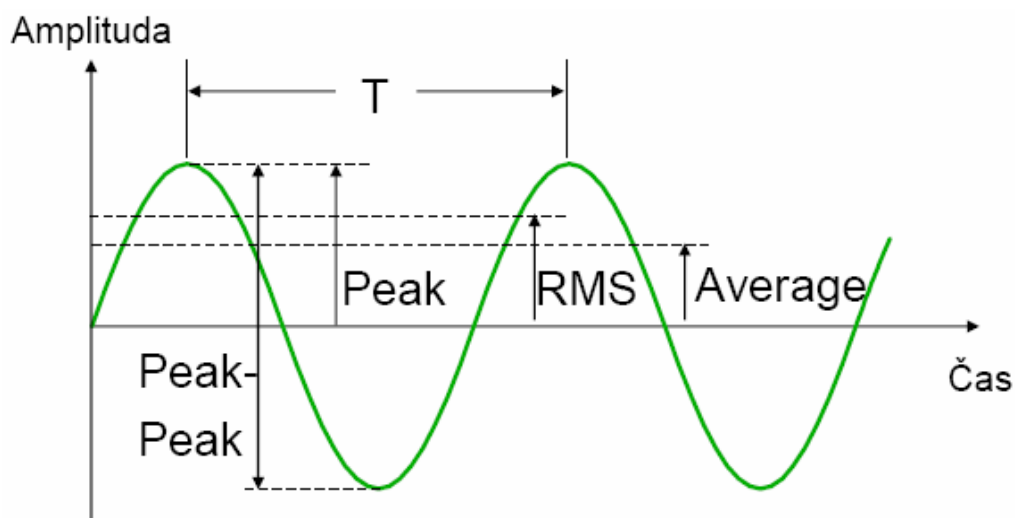
- přesnost,
- rychlost,
- srozumitelné nastavení parametrů,
- realizovatelnost ve formě univerzálního elektronického obvodu.

Měření vibrací vlastně znamená vyjádření amplitudy sinusového signálu. Pro měření celkových vibrací se používají následující vyjádření:

- **špička (peak)** je vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní,

- **špička - špička (peak to peak, rozkmit)** je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny (2 x špička),
- **průměrná hodnota (Average)** – většina průběhů nemá ideální sinusový tvar, průměrná hodnota je nenulová (0,637 x špička) u sinusového průběhu,
- **efektivní hodnota (RMS)** je odvozena matematickou cestou (FFT – druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot), jinak také při porovnání energie nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu (0,707 x špička u ideální sinusoidy).

Obrázek č. 11: Popis časového signál



Zdroj: Prezentace *Vibrace a rázy: Úvod do problematiky*. Univerzita Pardubice

Zobrazení frekvenčního spektra má různé formy. V měřící praxi se pak jedná nejen o zobrazení frekvenčního spektra, časového průběhu vibrací, ale také o možnosti překrývání frekvenčních spekter, kaskádovém zobrazení frekvenčních spekter apod. Pro určení objektivního technického stavu daného objektu diagnostiky při frekvenční analýze rotujícího objektu je nutný následující postup.

- 1) **Výpočet frekvencí zdrojů buzení**, což znamená určení rotorových, zubových, ložiskových, lopatkových apod. frekvencí. Pro výpočet těchto frekvencí je nutná znalost kinematického schématu objektu a celá řada jiných technických údajů.

2) **Zpracování metodiky měření**, lze ji shrnout do následujících bodů:

- Volba snímače vibrací - například akcelerometr, který má univerzální použití v širokém frekvenčním rozsahu.
- Určení měřicích míst – dobré volit co nejbližší ložisek, co nejméně přechodů atd.
- Způsob uchycení snímače – nejvýhodnější je lepená podložka.
- Volba měřicích směrů – ideální měření je měření ve 3 směrech (horizontální, vertikální a axiální).
- Volba časového okna a frekvenčního rozsahu měření – velmi často Hanning (není známa amplituda, ani frekvence složek signálu) a frekvenční rozsah.
- Určení měřené veličiny - nejčastěji RMS.
- Určení měřicího přístroje a způsobu sledování vibrací – tzn. vybrat, zda nasadíme kontinuální, periodický nebo kombinovaný způsob sledování diagnostikovaného objektu.

3) **Provedení provozního měření**, provedení měření přímo na diagnostikovaném objektu. Musí se provést měření diagnostikovaného objektu za opakovatelných a ustálených provozních podmínek.

4) **Interpretace a analýza naměřených dat**, základ je v určitém algoritmu, ze kterého by měl jednoznačně vyplynout postup celého měření a také to, že pro interpretaci frekvenčního spektra je nutno hledat základ již v první odrážce – výpočet frekvencí zdrojů buzení.

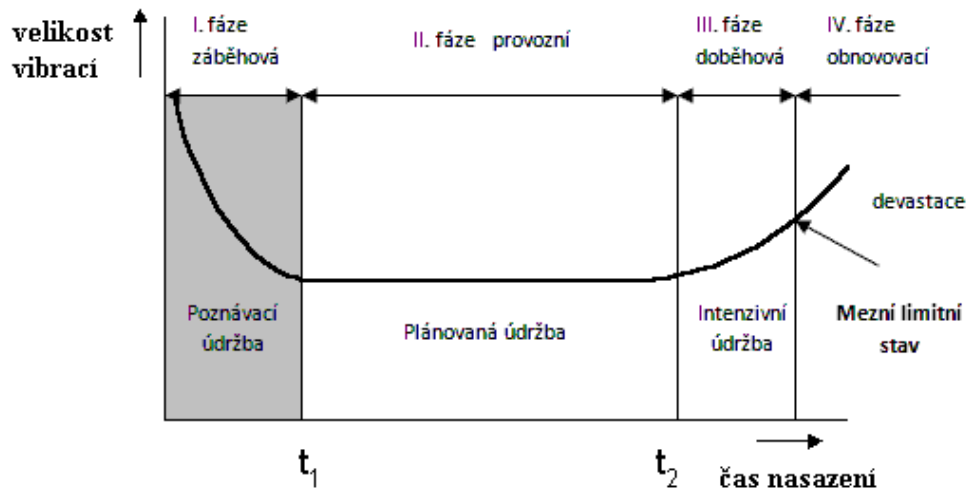
3.2 Celková mohutnost kmitání (trendování vibrací)

Celkové vibrace – představují celkovou vibrační energii měřenou v určitém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní (např. norma), získáme informace o objektivním technickém stavu objektu a lze zjistit, co způsobilo vyšší hodnoty.

Celková mohutnost (intenzita) kmitů – se rozumí hodnota naměřená na funkčně důležitém nebo nejdůležitějším místě zařízení, která se porovná s její předchozí hodnotou a limitní (mezí) hodnotou, čímž se získají informace o objektivním technickém stavu dané části.

Jestliže se tyto hodnoty vynesou do grafu, tak se získá tzv. **vanová křivka** (obrázek č. 12). Vanová křivka zobrazuje časový průběh hladiny vibrací během technického života pro danou část stroje. Z vanové křivky lze následně predikovat (prognózovat) zbytkovou životnost (čas do nutné opravy) a další důležité informace pro strategické plánování údržby.

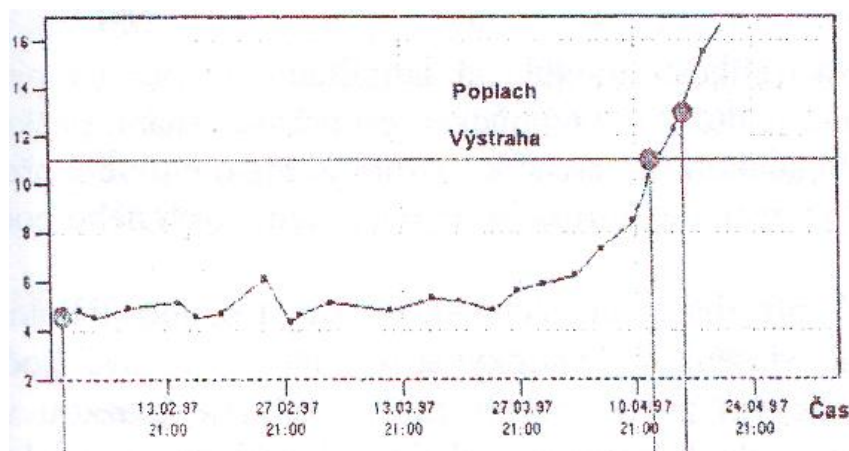
Obrázek č. 12: Příklad vanové křivky



Zdroj: Autor dle teoretických poznatků

Trendový graf (obrázek č. 13) je časový graf, který zobrazuje aktuální a předchozí hodnotu vibrací v závislosti na čase. Ze zobrazení naměřených hodnot je patrná jejich poloha v trendovém grafu k nastavené úrovni výstrahy a poplachu, tzn. vibrodiagnostikou zjistíme příčiny vznikající závady a dále musí následovat vhodná údržbářská opatření. Vývoj vibrací (trend) se sleduje pro vypočtené lokální otáčkové frekvence.

Obrázek č. 13: Trendování vibrací



Zdroj: HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří, *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*

Je patrné, že trendování se neobejde bez stanovení limitních hodnot vibrací, protože od tohoto základu se odvíjí další postup. Určení limitních hodnot vibrací je možné celou řadou známých postupů, např. určené výrobcem zařízení, určení příslušnou normou a předpisy (ČSN EN, ČSN ISO, ISO, DIN...) a lze také použít matematicko-statistických metod. Nastavení limitních hodnot vibrací musí mít pružný charakter, čímž se dosáhne respektování provozních podmínek a nelze jednou limitní hodnotou zhodnotit celý konstrukční uzel. Je nutné určit limity pro jednotlivé části konstrukčního uzlu. Dále by se měly určit limity pro kvalitní úroveň provozu (chodu) diagnostikovaného objektu (např. dříve stav dobrý, dnes zhoršený - porucha).

3.3 Kepstrální analýza

Poněkud neobvyklé pojmenování metody (Kepstrum) vzniklo přesmyčkou písmen ze slova spektrum. Podobně je na vodorovné ose kepstra queference (vychází z frekvence) nebo čas. Na svislé ose je mamplituda (vychází ze slova amplituda).

Nejdříve musí dojít k objasnění vztahu kepstrální analýzy k frekvenční analýze. Frekvenční analýza je zjednodušeně řečeno vlastně matematická metoda, která v časovém průběhu vibračního signálu hledá periodické děje, které potom v souřadném systému frekvence – amplituda (frekvenční spektrum) zobrazí jako jednotlivé čáry. Energie nesená časovým průběhem vibrace je stejná, jako energie obsažená ve spektru vibrací. Kepstrální analýza je metoda, která hledá periodické děje v daném frekvenčním spektru, tedy pravidelně se opakující rozdíly mezi sousedními frekvenčními čarami. Metoda je vhodná pro situace, kdy má frekvenční spektrum několik nosných frekvencí, na které jsou namodulována boční pásma. V kepstru je vyznačen jednotlivými čarami odstup bočních pásem. Kepstrum je tedy frekvenční analýzou frekvenčního spektra. Kepstrum udává periodické jevy ve frekvenční oblasti modulace postranního pásma.

Je zřejmé, že kepstrální analýza je metodou, která je pomůckou pro orientaci diagnostika v naměřeném spektru. Je vhodná pro diagnostiku převodovek, pro identifikaci amplitudové a frekvenční modulace. Nutnou podmínkou je, že frekvenční analyzátor má v sobě obsaženou kepstrální analýzu. Vibrační kepstrum je důležitou pomůckou při určování poškození valivých ložisek nebo boků zubů ozubeného soukolí. Naměřené kepstrum je málo citlivé k přenosu signálu z místa buzení k místu měření vibrací a dále identifikuje série harmonických nebo bočních pásem obsažených ve spektrech.

Jedním z typických příkladů je využití při zjišťování technického stavu ozubení. Jestliže se únavové opotřebení projeví ve formě vlásenkové trhlinky, tak je v podstatě nezachytitelné, ale vzhledem k dynamickým procesům při záběru zubů je otázkou velmi krátkého času, kdy se zub ulomí. To znamená, že pokud se provádí sledování cyklicky, je zachycení vlastního průběhu náhodou, takže je nutné využít keprstrální analýzu.

3.4 Alternativní metody vibrodiagnostiky k měření technického stavu valivých ložisek

Protože zjišťování technického stavu ložisek není náplní mé práce, ale vibrodiagnostika je velmi silný nástroj na zjištění TS ložiska, tak jsem zde uznal za vhodné pojednat alespoň o základních metodách.

Vedle časových průběhů, frekvenční analýzy apod. jsou vibrační signály zpracovány jinými a odlišnými metodami, které umožňují lepší analýzu daného objektu, konstrukčního uzlu či jiného elementu. Takovéto zpracování vibračního signálu nabízí nejen další možný způsob analýzy, ale především má pro dané měření větší vypovídací schopnost k určení technického stavu. Typickým příkladem alternativních metod jsou především metody k měření technického stavu valivých ložisek.

Veškeré metody, které slouží ke zjišťování stavu valivých ložisek, vychází z poznatku, že odvalováním poškozeného prvku ložiska dochází ke zvýšení úrovně vibrací na frekvenci nárazů, dále pak na frekvencích harmonických a rezonančních.

Příklady alternativních metod:

SPM (Shock Pulse Meter) – snímání krátkodobých tlakových vln, které jsou vyvolány mechanickými rázy. Tyto rázy vznikají vlivem drsnosti ložiskových drah a valivých těles. Rázové impulsy se snímají v rozmezí 30 – 40 kHz. Dále se snímá tzv. prahová úroveň a špičková úroveň.

BCU (Bearing Condition Unit) – nepřímé měření rázových impulsů pomocí obsahu energie akustických kmitů, které se šíří v pevném materiálu a projevují se v kmitočtové oblasti 20 – 40 kHz. Dochází k vyhodnocení špičkových hodnot měřeného signálu.

RBP (Related Bearing Product) – zjištění efektivních a špičkových hodnot zrychlení v rozmezí 2 – 16 kHz.

Crest factor – vyhodnocení poměru špičkového zrychlení a jeho střední hodnoty ve frekvenčním rozsahu 10 Hz – 10 kHz a časové posloupnosti.

Q faktor – využívá poměru mezi střední a špičkovou hodnotou amplitudy emitovaného ultrazvukového signálu na frekvenci 40 kHz.

K (t) parametr – vyhodnocuje vztah

$$K(t) = \frac{a_{ef(0)} \cdot a_{peek(0)}}{a_{ef(t)} \cdot a_{peek(t)}}$$

$a_{(0)}$ – výchozí hodnoty zrychlení v čase 0

$a_{(t)}$ – okamžité hodnoty zrychlení v čase t

a_{ef} – efektivní hodnoty zrychlení

a_{peek} – špičková hodnoty zrychlení

Kurtosis – posouzení statistického rozdělení amplitud chvění se zřetelem na odchylku od normálního rozdělení ve frekvenčním pásmu 2,5 – 80 kHz při rozdělení do pěti frekvenčních pásem. Hodnotí se podle velikosti K – faktoru.

$$KA = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 \cdot p(x) dx}{\sigma^4}$$

x – amplituda signálu

\bar{x} – střední hodnota

$p(x)$ – pravděpodobnost (x)

σ – standardní odchylka vůči nulovému signálu

Obálková metoda (Envelop) – činnost ložisek a záběr ozubených kol, které mají opakující se charakter, vytváří vibrační signály nižší amplitudy a s vyššími frekvencemi, než je tomu u vibračních signálů buzených otáčkami nebo konstrukcí. Například když se u ložiska s valivými elementy objeví defekt na jeho vnější dráze, tak každý valivý element procházející tímto místem vyvolá malý opakující se signál

o frekvenci, která odpovídá závadě v ložisku. Tento signál má tak nízkou energii, že se při běžném měření zcela ztratí v šumu a dalších budících otáčkových frekvencích.

Technologie SEE (Spectral Emitted Energy) – poskytuje včasnou detekci závad ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise, která je generována kovem. Je-li tento kov poškozen nebo nastanou-li jiné specifické podmínky.

Aktivní okolnosti vedoucí ke vzniku akustické emise:

- defekty ložisek,
- nedostatečné mazání,
- mikroprokluzování (tření),
- kavitace proudění,
- třískové obrábění kovu,
- elektrický oblouk,
- elektrický šum,
- znečištění plastického maziva,
- dynamické přetížení,
- tření ložiska,
- elektricky generované signály,
- styk rotoru kompresoru (se statorem), tvoření trhlinek,
- kontakt kov – kov.

Technologie SEE používají speciální snímače akustické emise, které reagují na ultrazvukovou akustickou emisi vznikající následkem poškození elementů ložisek. Takový signál není ani tak signálem vibračním, jedná se spíše o zvuk o vysoké frekvenci, přesto nese název vibrace.

Jestliže hodnoty SEE stoupají, monitoruje se ložisko podrobněji. Trendování hodnot získaných metodou SEE, obálkováním, měřením teplot a vibrací nejlépe umožní analyzovat problém a stanovit nejvhodnější dobu pro opravu. Dobrá znalost zařízení a logický přístup k řešení problému významně napomáhá ke správnému určení nápravných kroků.

Vysokofrekvenční detekce (HFD – High Frequency Detection) – udává číselnou hodnotu celkové úrovně vibrací, které jsou generovány ve vysokofrekvenčním pásmu 5 – 60 kHz malými vadami.

K zesílení nízkoúrovňového signálu, který je generován malými vadami se používá rezonanční frekvence vlastního snímače. Měření je prováděno akcelerometry, jelikož se jedná o vysoké frekvence. Hodnoty se uvádějí v „g“, měří se špičkové nebo efektivní hodnoty. Nyní je patrné, že dané označení je také používáno v podobě SPM, BCU atd.

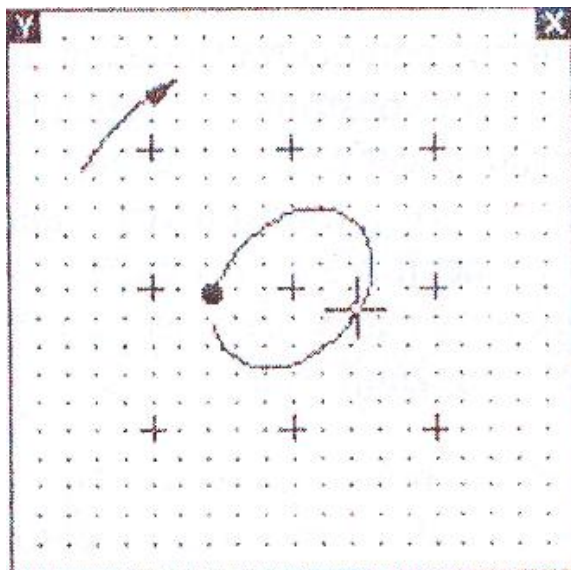
3.5 Orbitální analýza

Orbit tvoří dynamická (kinetická) složka vibrací, která je složena ze dvou vzájemně kolmých bezdotykových radiálních snímačů. Snímače se umísťují do jedné roviny v navzájem kolmých směrech. Jedná se o alternativní zobrazení časového signálu, které přináší i další diagnostické informace, které lze realizovat i na běžném osciloskopu s X-Y funkcí. Zobrazení vibrací ve formě orbitu je vlastně zobrazení pohybu středu hřídele za jednu či více otáček kolem statické polohy středu hřídele. Je zde tzv. synchronizační značka, která udává moment synchronizačního impulsu $1x$ za otáčku. Tímto způsobem lze zjistit směr precesního pohybu hřídele vůči směru otáčení, odhadnout velikost amplitudy – špička – špička.

Měřit orbity nelze bez určení absolutní fáze vibrací, která je definována jako zpoždění prvního kladného maxima signálu na daném snímači za signálem synchronizační značky v úhlových jednotkách, kdy jednomu cyklu odpovídá 360° . Fázi vibrací lze určit pro otáčkovou frekvenci a pro všechny celočíselné násobky a podíly otáčkové frekvence.

Z tvaru orbity lze usoudit směr působení radikálních sil v ložisku. Standardní eliptický tvar orbity se zplošťuje, mění se na banánový tvar nebo dostává tvar „osmičky“, a to vlivem závad sousostí a tím vzniku radiálního předpětí. Pak je směr hlavní osy orbity kolmý na směr působení radiální síly. Další možné použití orbitální analýzy je při diagnostice např. ložiskových vůlí, nestabilit rotoru v kluzných ložiskách, trhlinách rotoru a jiných závadách. Tato analýza se obvykle provádí na orbitu širokopásmového signálu i na orbitu signálu filtrovaného na harmonické a subharmonické složky. Je potřeba sledovat statickou polohu středu hřídele, která spolu s orbitem vypovídá o skutečném pohybu hřídele v měřené rovině.

Obrázek č. 14: Standardní tvar orbity



Zdroj: HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří, *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*

3.6 Multiparametrická diagnostika

Základem predikace prognózy zbytkové životnosti (času do nutné opravy) je objektivní znalost technického stavu daného objektu s co nejvyšší jistotou rozhodnutí. Multiparametrický přístup umožňuje odhalit závady, které jsou nezjistitelné při použití pouze jedné měřicí (diagnostické) metody a tím zvýšit jistotu rozhodnutí o technickém stavu se všemi návaznými pozitivy. Multiparametrický přístup spočívá v použití několika měřících (diagnostických) metod. Dále zlepšuje detekci a diagnostiku závad.

Cíl multiparametrické diagnostiky pomocí řetězce závislostí:

zvýšení jistoty
určení zbytkové
životnosti



zvýšení
provozní
spolehlivosti



zvýšení
vprojektované
spolehlivosti

Multiparametrická diagnostika má dvojí postup:

1) Multiparametrická diagnostika při použití alternativních diagnostických metod

Takovým příkladem je např. diagnostika defektu na vnějším kroužku valivého ložiska. Veškeré valivé elementy během svého průchodu narazí na defekt, tzn. způsobí vznik opakovaného vibračního signálu. Amplituda vibračního signálu je tak malá, že při použití metody měření celkových vibrací se ve spektru celkových vibrací vybuzených strojem ztrácí (je nečitelná, nemá vypovídací schopnost). Je nutné použít multiparametrickou diagnostiku např. použití následujících vibrodiagnostických metod: ENV AVE (průměrná hodnota obálky), ANV PEAK (špičková hodnota obálky) nebo SEE (spektrální emitovaná energie).

2) Multiparametrická diagnostika při použití několika metod technické bezdemontážní diagnostiky

Jde o nasazení kombinace vhodných metod technické bezdemontážní diagnostiky. Může to být např. kombinace vibrodiagnostiky a tribodiagnostiky. Do úvahy však přichází celá řada kombinací např.:

- Vibrodiagnostika + tribodiagnostika + termodiagnostika.
- Vibrodiagnostika + tribodiagnostika + optická defektoskopie.
- Vibrodiagnostika + optická defektoskopie.
- Vibrodiagnostika + výkonové parametry a další.

Tento nastíněný postup umožňuje provádět preventivní kroky ke zvýšení provozní spolehlivosti pomocí řízení údržby v celém svém komplexu.

3.7 Měření fáze

Fázový úhel je takový úhel, o který se hřídel pootočí z bodu zahájení sběru dat až k bodu, ve kterém snímač naměří maximální kladnou odezvu (výchylka, rychlost, zrychlení...) Kladný fázový úhel ($+\varphi$) se vynese od referenční značky proti smyslu otáčení rotoru (hřídele).

Je patrné, že měření fáze není druhem měření velikosti vibrací, ale měřením místa na rotujícím objektu, kde působí maximální kladná odezva.

Bez této pomůcky není možná komplexní analýza při diagnostice následujících závad:

- nesouososti – zjištění fázového posuvu mezi hodnotami na protějších koncích stroje v axiálním směru a tím přesné specifikování úhlové, paralelní nebo kombinované nesouososti,
- nevyváženost – určuje se druh nevyváhy (statická, momentová, dynamická),
- ohnutý hřídel.

Z toho vyplývá, že diagnostika některých závad se bez daného měření neobejde. Měření fáze není analýzou vibrací, nýbrž druhem měření doplňujících tuto analýzu.

4 Vyhodnocení naměřených průběhů vibrodiagnostiky

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2, vibrodiagnostika je uplatňována na nejrůznějších rotačních i jiných pohybujících se uzlech strojů a ostatních zařízeních. Dynamické namáhání určitých částí zařízení způsobuje vznik vibrací, čemuž se nelze v provozní praxi vyhnout. Vibrace mohou být dále zapříčiněny právě nevyváhou rotujících částí, čímž se mé měření zabývá.

Dále je nutné uvést rozdíl mezi silovou nevyvážeností a momentovou nevyvážeností. Silová nevyváženost se projevuje stejnou fází a je ustálená. Naproti tomu momentová nevyváženost má za následek pohyb 180° mimo fázi (na stejném hřídeli), je tedy v protifázi. U silové nevyváženosti se amplituda v důsledku nevyváženosti bude zvětšovat se čtvercem otáčkové frekvence pod prvními kritickými otáčkami rotoru. U momentové nevyváženosti se amplituda mění se čtvercem otáčkové frekvence pod prvními kritickými otáčkami. Silovou nevyváženost lze korigovat umístěním pouze jednoho vyvažovacího korekčního závaží v jedné rovině, naproti tomu u momentové nevyváženosti lze provádět korekce umístěním vyvažovacího závaží nejméně ve dvou rovinách.

Cílem vyhodnocování měření v rámci této bakalářské práce je ověření faktu, že velikost vibrací je závislá na vyvážení, resp. na nevyvážení rotoru ventilátoru. Dále šlo o potvrzení skutečnosti, že s rostoucími otáčkami se zvyšuje velikost vibrací. Dále bylo snahou zjistit závislost velikosti vibrací na změně hmotnosti nevyvážku.

Příprava měření

Měření bylo realizováno na dvoustupňovém ventilátoru chlazení vozidla Škoda Roomster 1.9 TDi, jež je učební pomůckou pro Dopravní fakultu Jana Pernera. Ventilátor jsem uvedl do chodu tím, že jsem přivedl palubní napětí na svorkovnici ventilátoru (viz. obrázek č. 15). Díky tomu nebylo zapotřebí uvádět samotný motor do chodu. Připravil jsem si nevyvážek (hmotnost = 3,3 g), který jsem po změření vyváženého stavu umístil na vnější obvod ventilátoru.

Obrázek č. 15: Přivedení palubního napětí na svorkovnici ventilátoru



Zdroj: Autor

K měření jsem využil přístroj Vibrotest 41 od společnosti Schenck (obrázek č. 16). Součástí tohoto přístroje je bezkontaktní snímač otáček. Ten jsem nastavil tak, aby jeden frekvenční impuls odpovídal jedné otáčce. Dále jsem nalepil referenční značku (která je vidět na obrázku č. 17 vpravo nahoře) na vnější část ventilátoru, aby snímač otáček měl podle čeho snímat otáčky. Snímač otáček jsem připevnil cca 50 mm od vnější hrany lopatek.

Obrázek č. 16: Vibrotest Schenck 41²



Zdroj: Autor

² Vibrotest 41 společnosti Schenck – napravo od přístroje lze vidět bezkontaktní snímač otáček a nalevo snímač velikosti vibrací.

Dále jsem upevnil snímač zrychlení vibrací oboustrannou lepicí páskou do radiálního směru. Snímač nebyl umístěn přesně nad osou rotace, protože plocha nad osou rotační části ventilátoru měla kulatou plochu a snímač nebylo možné na ni přichytit. Proto je snímač připevněn co nejbližší této ose na rovinnou plochu.

Obrázek č. 17: Snímač zrychlení vibrací



Zdroj: Autor

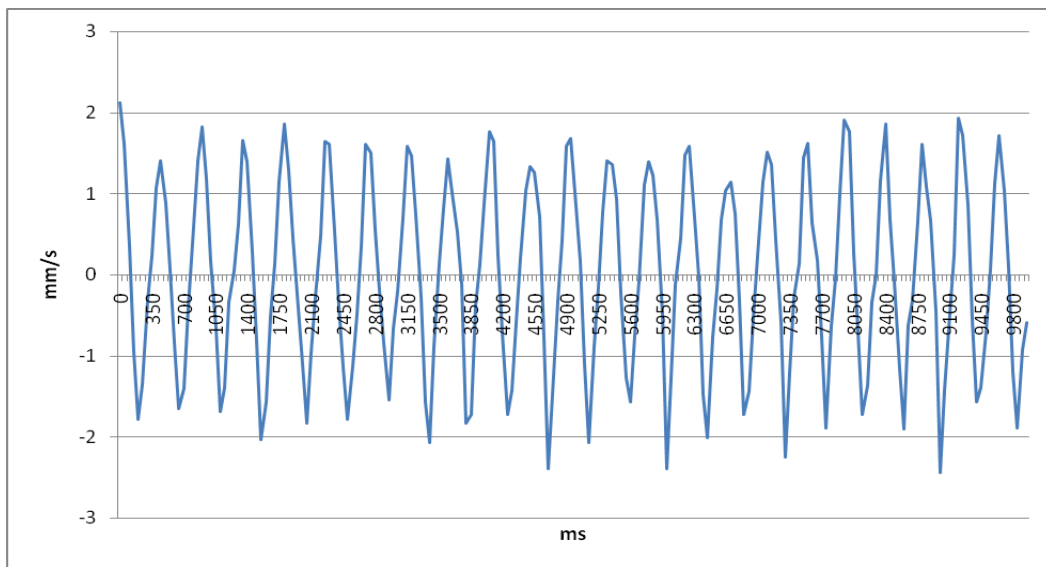
Před samotným měřením bylo třeba nastavit Vibrotest 41. Příslušné údaje k jeho nastavení jsem zjistil z katalogového listu, který je nedílnou součástí technické dokumentace ke snímači. Nejprve jsem nastavil první vstup vibrotestu na aktivní. Dále jsem zvolil jako typ snímače snímač zrychlení. Poté jsem nastavil citlivost na 100mV/g a jednotky na mm/s, protože amplitudou byla rychlost vibrací. Jelikož se jedná o snímač zrychlení, tak se rychlost vypočítala z průběhu zrychlení a jeho následné integrace. Výpočet byl realizován přímo vibrotestem. Měřítka osy y jsem zvolil 20 případně 200 jednotek. Frekvenční spektrum jsem nastavil od 0 do 1 kHz, více nebylo z hlediska oblasti otáček a zjišťování pouze nevyváhy třeba. V případě zjišťování technického stavu valivých ložisek by bylo třeba příslušný rozsah zvětšit dle parametru daného ložiska. Počet bodů měření jsem zvolil 800.

Samotné měření

Vlastní měření jsem rozdělil na měření vyváženého a nevyváženého rotoru. Dále jsem jej doplnil o poloviční nevyváhu. Měřil jsem při obou provozních rychlostech ventilátoru. První rychlost 1368 ot/min odpovídá 22,8 Hz a druhá rychlost 2030 ot/min odpovídá 33,8 Hz. U každého rychlostního stupně jsem změřil časový průběh a frekvenční spektrum.

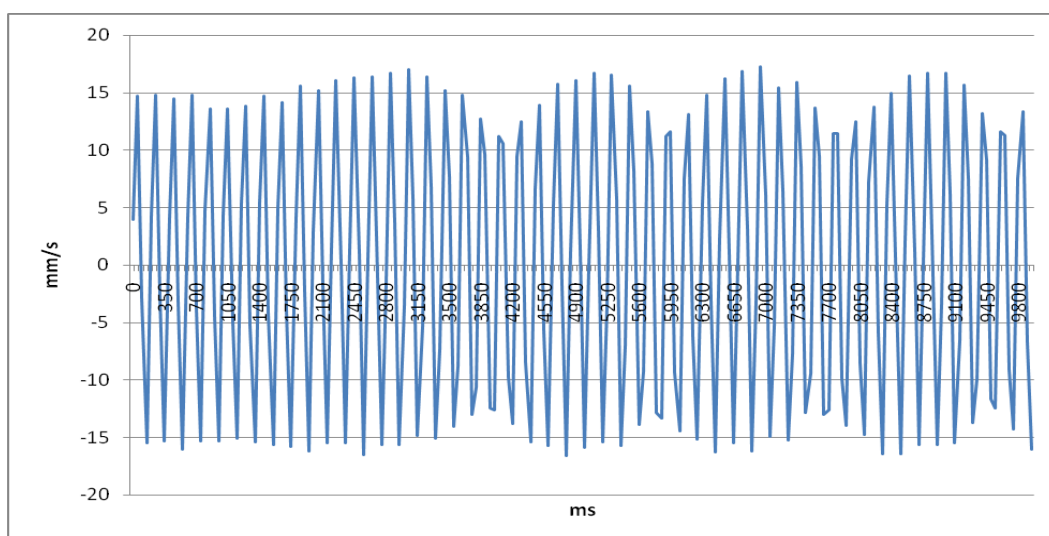
4.1 Měření vyváženého stavu

Obrázek č. 18: Časový průběh 1. rychlostního stupně



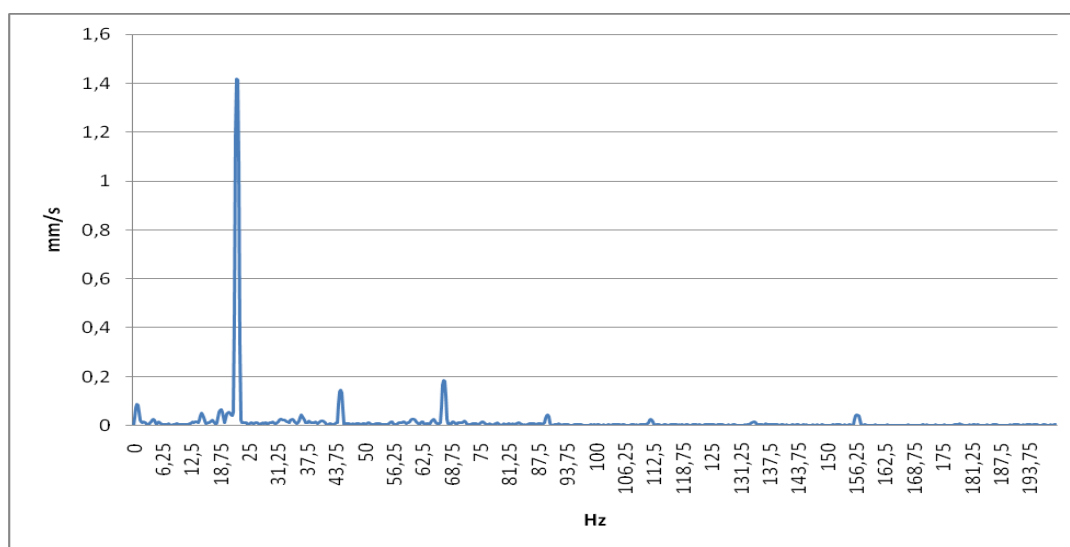
Zdroj: Autor

Obrázek č. 19: Časový průběh 2. rychlostního stupně



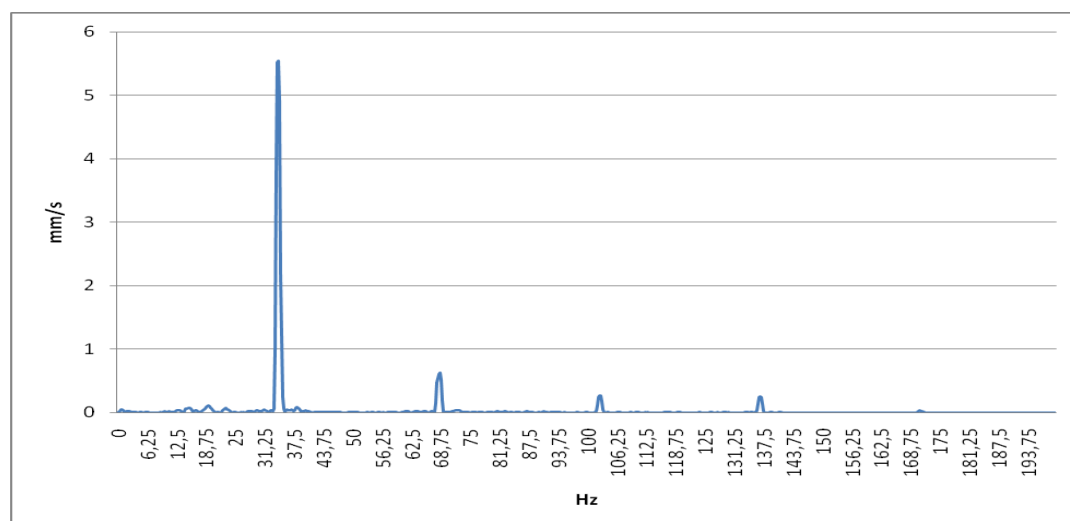
Zdroj: Autor

Obrázek č. 20: Frekvenční spektrum 1. rychlostního stupně



Zdroj: Autor

Obrázek č. 21: Frekvenční spektrum 2. rychlostního stupně



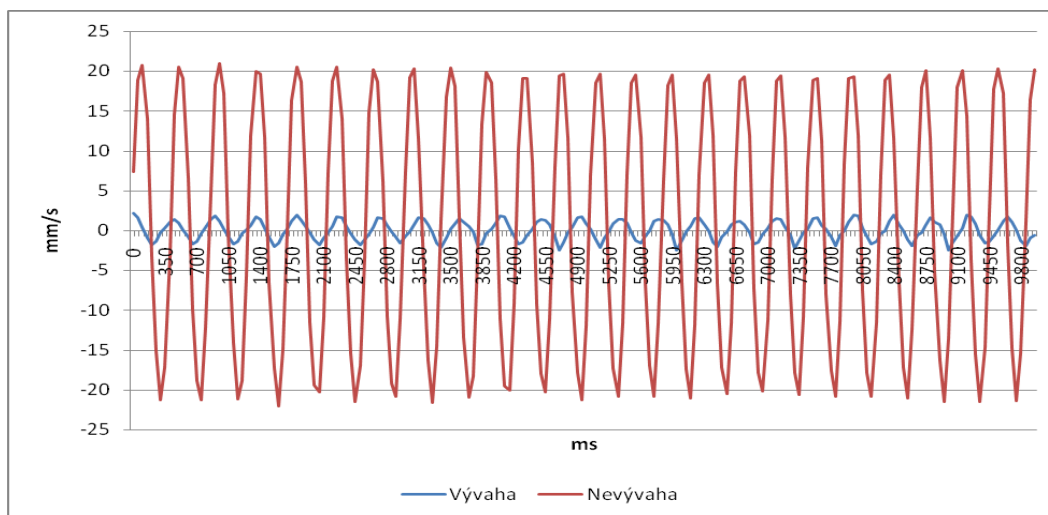
Zdroj: Autor

Z daných časových průběhů a frekvenčních spekter je vidět zřejmý fakt, že se zvyšujícími se otáčkami (z prvního na druhý rychlostní stupeň) se velikost vibrací zvětšuje. I samotný ventilátor není plně vyvážený, což je dáno nepřesností výroby. Jeho samostatná nevyváha je patrná na obou frekvenčních spektrech. Nejvíce se projevuje na otáčkové frekvenci, která je u prvního rychlostního stupně 22,8 Hz a u druhého rychlostního stupně 33,8 Hz, což odpovídá v prvním případě hodnotě 1,4 mm/s a v druhém případě hodnotě 5,5 mm/s. Tato nevyváha však není tak velká jako po umístění nevyvážku na vnější obvod ventilátoru.

4.2 Měření s nevyváhou

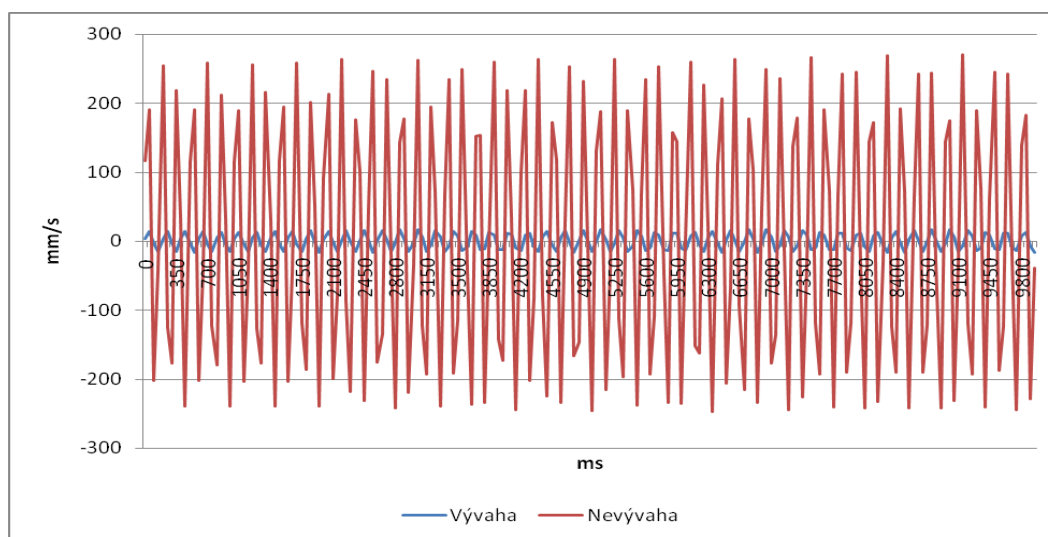
Po změření vyváženého stavu jsem umístil nevyvážek o hmotnosti 3,3 g na vnější obvod ventilátoru. Aby byl rozdíl v naměřených průbězích mezi vyváženým a nevyváženým stavem co nejpatrnější, tak jsem oba průběhy spojil do jednoho grafu (viz obrázek č. 22, 23, 24 a 25).

Obrázek č. 22: Časové průběhy 1. rychlostního stupně (vývaha ve srovnání s nevyváhou)



Zdroj: Autor

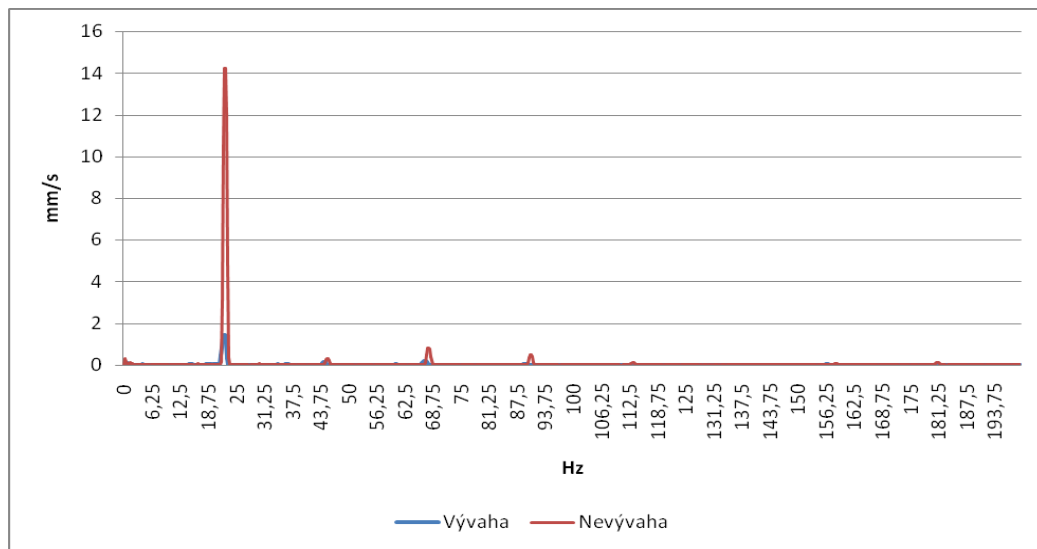
Obrázek č. 23: Časové průběhy 2. rychlostního stupně (vývaha ve srovnání s nevyváhou)



Zdroj: Autor

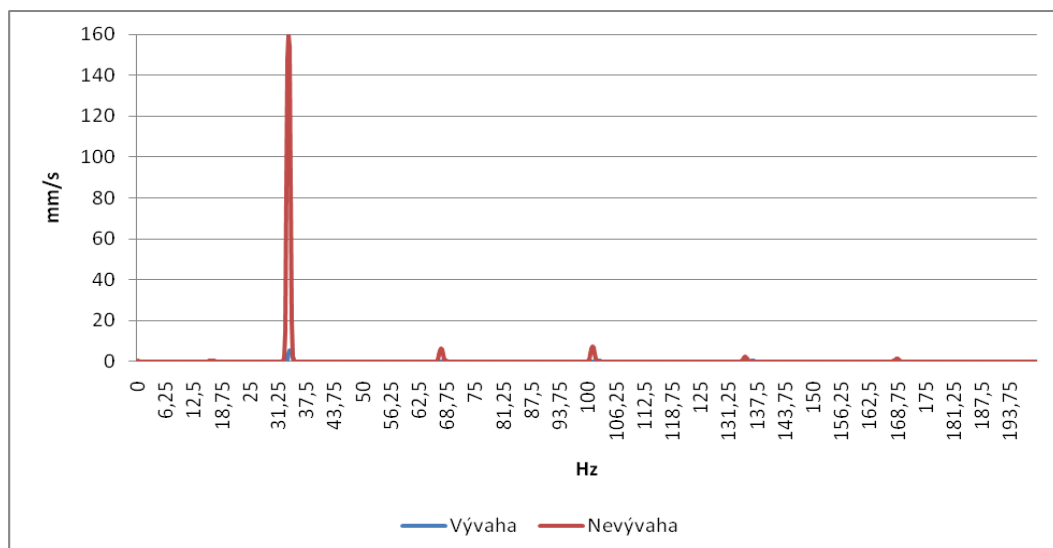
V časovém průběhu u prvního rychlostního stupně se maximum pohybuje kolem 20 mm/s, což je až desetinásobně více než u stavu vyváženého. U druhého rychlostního stupně je tento rozdíl ještě znatelnější. Tím lze potvrdit skutečnost, že po umístění nevývažku velikost vibrací dramaticky vzrostla, protože na nevývažek působila vyšší odstředivá síla při vyšších otáčkách. Po srovnání obou časových průběhů lze dále pozorovat, že se zvyšujícími se otáčkami se zvyšuje velikost vibrací.

Obrázek č. 24: Frekvenční spektra 1. rychlostního stupně (vývaha ve srovnání s nevývahou)



Zdroj: Autor

Obrázek č. 25: Frekvenční spektra 2. rychlostního stupně (vývaha ve srovnání s nevývahou)



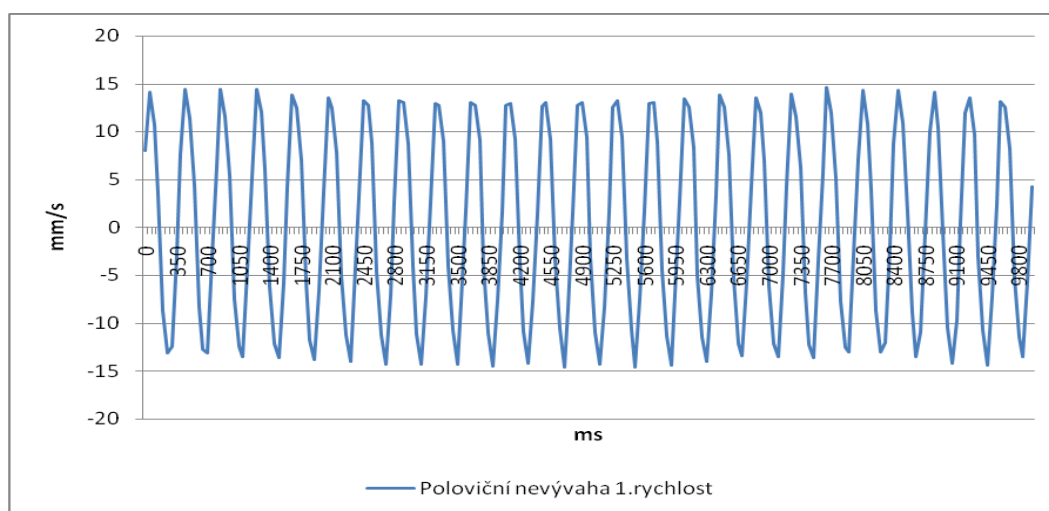
Zdroj: Autor

Z obou frekvenčních spekter je zřejmé, že nevyváha se nejvíce projevuje na otáčkové frekvenci, která je u prvního rychlostního stupně 22,8 Hz a u druhého rychlostního stupně 33,8 Hz. Maximální hodnota rychlosti vibrací ve frekvenčním spektru se u prvního rychlostního stupně pohybuje kolem 14 mm/s a u druhého rychlostního stupně kolem 160 mm/s, což je o mnoho více než u vyváženého stavu. Je zde vidět také velmi velký rozdíl mezi prvním a druhým rychlostním stupněm a tím lze opět potvrdit skutečnost, že se zvyšujícími se otáčkami se zvyšuje velikost vibrací.

4.3 Měření s poloviční nevyváhou

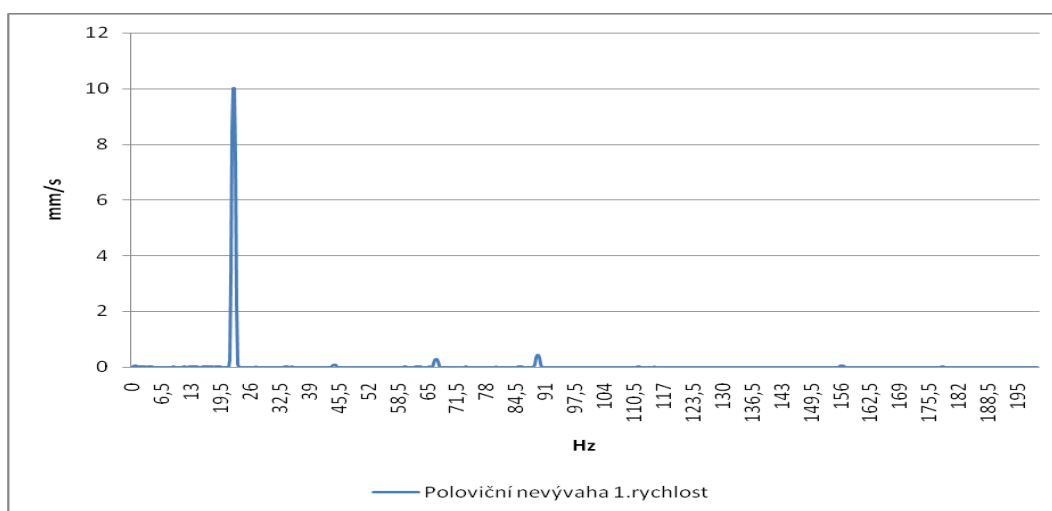
Po změření nevyváženého stavu jsem daný nevyvážek sejmul a na vnější obvod ventilátoru umístil nevyvážek o polovinu lehčí. Hmotnost nového nevyvážku byla 1,65 g. Pro představu je uveden jak časový průběh, tak frekvenční spektrum u prvního rychlostního stupně. Druhý rychlostní stupeň je uveden v Příloze č. 1.

Obrázek č. 26: Časový průběh 1. rychlostního stupně u poloviční nevyváhy



Zdroj: Autor

Obrázek č. 27: Frekvenční spektrum 1. rychlostního stupně u poloviční nevývahy



Zdroj: Autor

Po srovnání jak časového průběhu, tak frekvenčního spektra mezi poloviční nevývahou a plnou nevývahou lze pozorovat, že velikost vibrací je také závislá na hmotnosti nevyváženky. U časového průběhu je rozdíl mezi plnou a poloviční nevývahou asi 6 mm/s a u frekvenčního spektra se tento rozdíl pohybuje kolem 4 mm/s. Tyto rozdíly jsou ještě více znatelnější u druhého rychlostního stupně, který je umístěn v Příloze č.1. Jako u ostatních průběhů zde platí, že nevývaha se nejvíce projevuje na otáčkové frekvenci, v tomto případě na frekvenci 22,8 Hz a v případě Přílohy č.1 na frekvenci 33,8 Hz.

Dále jsem se snažil naměřit průběhy v přechodové oblasti při zapnutí a vypnutí ventilátoru. Při zapnutí se však ventilátor rozběhl příliš rychle, že vibrotest nestihl přechodovou oblast zaznamenat do frekvenčního spektra. Proto se v Přílohách č. 2 a 3 nachází pouze doběhy. Doběhem je myšleno měření frekvenčního spektra, případně časového průběhu při vypnutí napájení ventilátoru. Tím se rychlost rotoru vlivem setrvačnosti a odporu prostředí postupně snižuje až do úplného zastavení. Při doběhu a postupném snižování otáček rotor přešel přes rezonanční oblast, která se projeví náhlým nárůstem amplitudy. Z tohoto průběhu lze dedukovat, že ventilátor ve stavu poloviční nevývahy pracuje v nadrezonanční oblasti.

Vzhledem k tomu, že ventilátor je konstruován s převislým rotorem je nutné při analýze nevyváženosti měřit i vibrace v axiálním směru - viz Příloha č. 4. Z daného frekvenčního spektra lze pozorovat, že vibrace v axiálním směru jsou o poznání menší. Zároveň také platí, že největší amplituda je 55 mm/s a to na otáčkové frekvenci.

5 Závěr

V první části mé bakalářské práce jsem se zabýval obecně vibrodiagnostikou. Od základních definic až po metody využití vibrodiagnostiky jsem se snažil tuto problematiku rozebrat a vysvětlit i pro člověka neznalého v tomto oboru. Byly zde také uvedeny typy snímačů vibrací, které jsou nedílnou součástí vibrodiagnostiky. V kapitole 3 Metody využití vibrodiagnostiky jsem uvedl základní a nejpoužívanější metody využití vibrodiagnostiky. Ale samozřejmě existují i další metody vibrodiagnostiky jako jsou například modální analýza nebo metoda zviditelnění provozních tvarů kmitů a mnoho dalších metod, což však nebylo hlavním cílem mé bakalářské práce.

Hlavní náplní mé bakalářské práce bylo změření a vyhodnocení časových průběhů a frekvenčních spekter z nevyváženého rotoru. Jako první byl fakt, že při zvyšujících se otáčkách roste amplituda vibrací. Tato skutečnost je zřejmá u časových průběhů i u frekvenčních spekter nejen u vyváženého, ale také u nevyváženého stavu objektu. Změnu otáček jsem prováděl přepínáním mezi rychlostními stupni daného objektu, v tomto případě ventilátoru. Dále jsem zjistil, že při zvětšování nevyváhy (její hmotnosti) roste amplituda vibrací, což jsem potvrdil umístěním poloviny předešlého nevyvážku na sledovaný objekt. Ověřil jsem také, že nevyváha se nejvíce projevuje na otáčkové frekvenci, v tomto případě na dvou otáčkových frekvencích.

Použitá literatura

- [1] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [2] KREIDL, Marcel; kolektiv. *Diagnostické systémy*. Praha: ČVUT, 2001.
- [3] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1998.
- [4] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálu získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika*. Praha, 1997.
- [5] Měření vibrací ve vibrodiagnostice [online]. Dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [6] Prezentace Vibrace a rázy - Úvod do problematiky. Univerzita Pardubice.

Seznam příloh

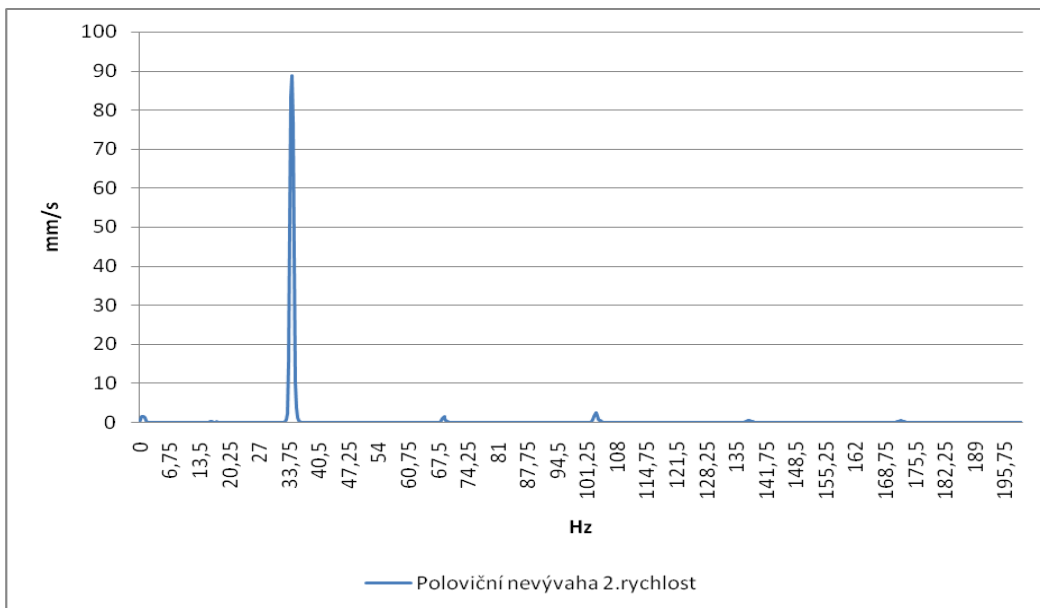
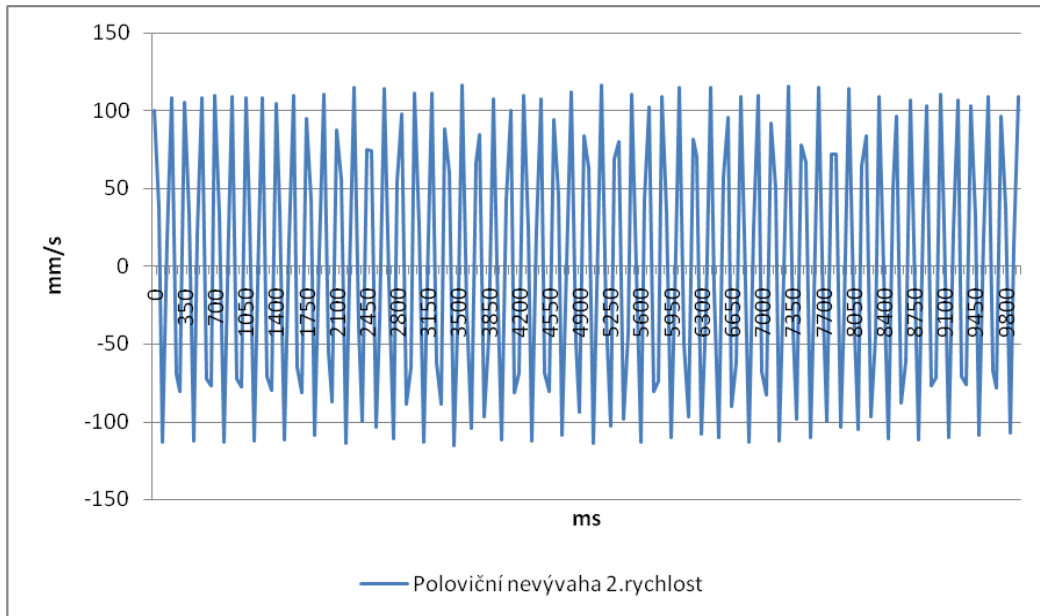
Příloha č. 1 – Časový průběh a frekvenční spektrum u poloviční nevyváhy 2. rychlostního stupně

Příloha č. 2 – Časové průběhy při doběhu u poloviční nevyváhy – 1. i 2. rychlostní stupeň

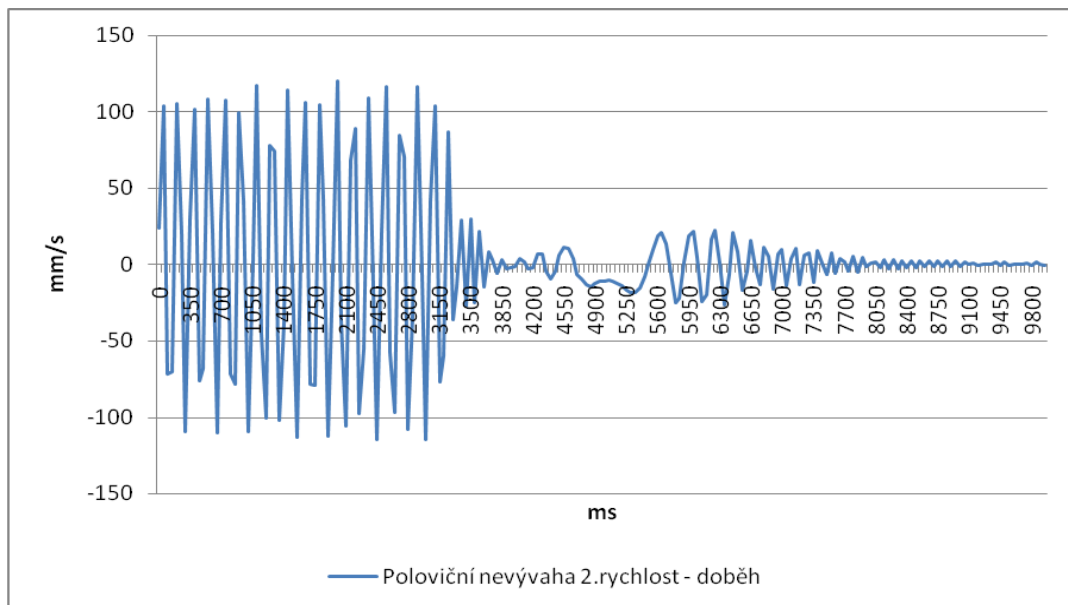
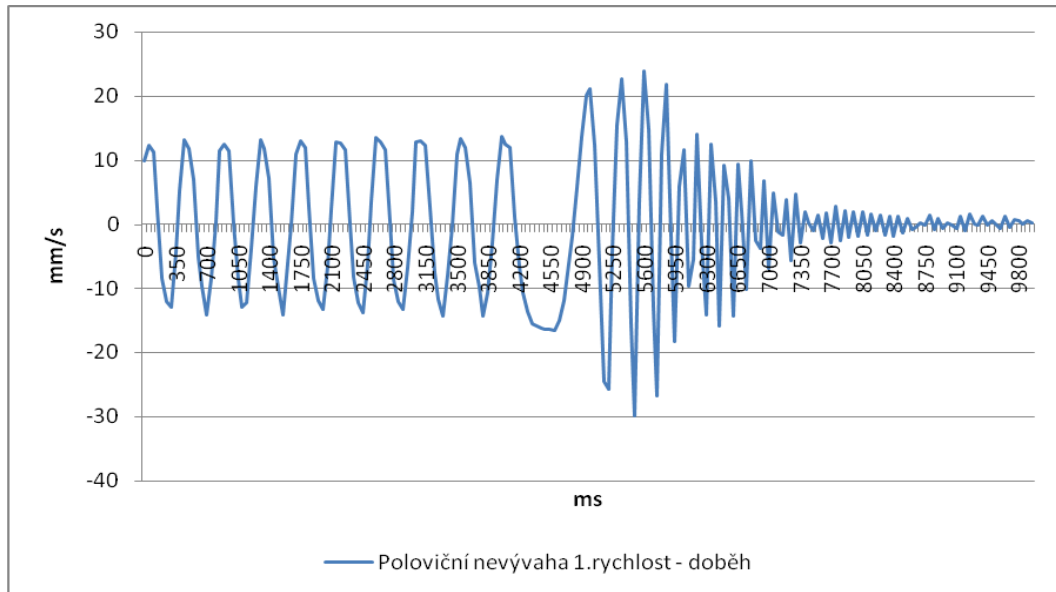
Příloha č. 3 – Frekvenční spektra při doběhu u poloviční nevyváhy – 1. i 2. rychlostní stupeň

Příloha č. 4 – Frekvenční spektrum u poloviční nevyváhy v axiálním směru – 2. rychlostní stupeň

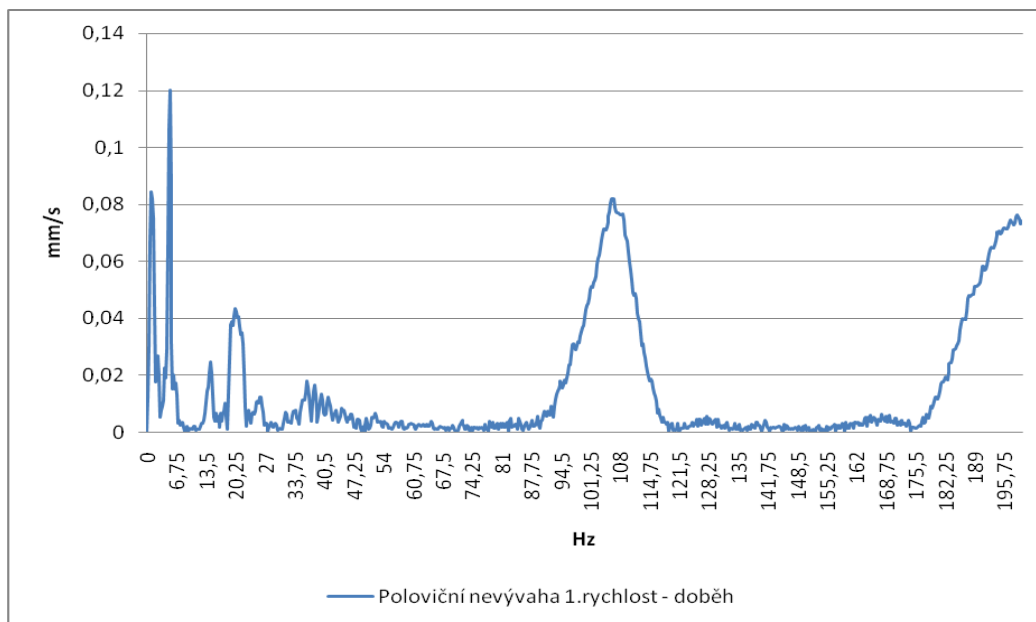
Příloha č. 1 – Časový průběh a frekvenční spektrum u poloviční nevývahy 2. rychlostního stupně



Příloha č. 2 – Časové průběhy při doběhu u poloviční nevývahy – 1. i 2. rychlostní stupeň



Příloha č. 3 – Frekvenční spektra při doběhu u poloviční nevyváhy – 1. i 2. rychlostní stupeň



Příloha č. 4 – Frekvenční spektrum u poloviční nevyváhy v axiálním směru -
2. rychlostní stupeň

