

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ A ANALÝZA DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ ROTUJÍCÍCH ČÁSTÍ STROJŮ

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF DYNAMIC PROPERTIES OF ROTATING MACHINE
PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VOJTĚCH GOFROŇ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vojtěch Gofroň

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

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

Měření a analýza dynamických vlastností rotujících částí strojů

v anglickém jazyce:

Measurement and analysis of dynamic properties of rotating machine parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou měření a analýzy vlastností rotujících částí pro charakterizační a výrobní testy strojů. Budou řešeny dvě oblasti: oblast pohybu hřídele v ložisku a oblast vyhodnocování účinnosti převodových skříní.

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se s problematikou měření vibrací, úhlové rychlosti a krouticího momentu.
2. Seznamte se s problematikou vibrodiagnostiky a metodami pro vyhodnocování vibrací rotujících částí strojů.
3. Proveďte měření a navrhnete možnosti vyhodnocování pohybu hřídele v kluzném ložisku na laboratorním přípravku.
4. Proveďte měření a navrhnete možnosti vyhodnocování průběhu krouticího momentu a rychlosti na výstupu z převodovky.
5. Na zadané soustavě navrhnete rozložení snímačů a proveďte měření a vyhodnocení vibrací této soustavy.

Seznam odborné literatury:

- [1] KREIDL M., ŠMÍD R. Technická diagnostika, BEN: Praha, 2006, ISBN 80-7300-158-6
[2] MUNJAL, M. Noise and vibration control. Singapore: World Scientific, 2013, ISBN 978-981-4434-73-7
[3] NOVÝ, R. Hluk a chvění. Praha: České vysoké učení technické, 2009, ISBN 978-80-01-04347-9
[4] National Instruments. LabVIEW Sound and Vibration Toolkit User Manual [online], 2005, dostupné z www.ni.com
[5] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. LabView advanced programming techniques. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007, 499 s. ISBN 08-493-3325-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 20.11.2014




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením a analýzou pohybu hřídele, krouticího momentu, úhlové rychlosti a vibrací. První část práce je věnována obecné problematice snímání signálů v číslicové podobě. Dále se práce věnuje snímačům použitelným pro jednotlivé druhy měření a hardwaru pro sběr dat. Poslední teoretickou částí je výběr metod použitelných v oblasti analýzy měřených signálů a vibrační diagnostiky. Praktická část práce zahrnuje měření pohybu hřídele a krouticího momentu provedená na laboratorních přípravcích a měření vibrací provedené na reálné strojní soustavě. Každé měření je doplněno analýzou naměřených dat a vyhodnocením.

ABSTRACT

Diploma thesis focuses on measurement and analysis of shaft motion, torque, angular velocity and vibration. First part of the thesis deals with general issue of acquiring a digital signal. Next part describes suitable sensors for each measurement type, and data acquisition hardware. The last theoretical part describes methods for measurement data analysis and vibration diagnostics. Practical part of the thesis describes shaft motion and torque measurements made on laboratory equipment, and vibration measurement made on real machine system. Each measurement includes measurement data analysis and evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pohyb hřídele, vibrace, krouticí moment, úhlová rychlost, sběr dat, analýza signálů

KEYWORDS

Shaft motion, vibration, torque, angular velocity, data acquisition, signal analysis

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně dle pokynů a rad vedoucího a s použitím pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Brně dne 29. 5. 2015

Vojtěch Gofroň

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GOFROŇ, V. Měření a analýza dynamických vlastností rotujících částí strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a celkové vedení při vypracování diplomové práce.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	9
ÚVOD	10
1 SIGNÁLY A JEJICH SNÍMÁNÍ.....	11
1.1 Spojité a diskrétní signály.....	11
1.2 Analogově-číslicové převodníky	11
1.3 Aliasing.....	12
2 MĚŘENÍ VELIČIN ROTUJÍCÍCH ČÁSTÍ STROJŮ	15
2.1 Měření vibrací.....	16
2.1.1 Snímače zrychlení	17
2.1.2 Snímače rychlosti	19
2.1.3 Snímače výchylky	21
2.2 Měření úhlové rychlosti.....	23
2.2.1 Snímače úhlové rychlosti	23
2.2.2 Určení úhlové rychlosti z měření vibrací	24
2.3 Měření krouticího momentu	24
2.4 Hardware pro sběr dat.....	26
3 VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ A VIBRODIAGNOSTIKA	27
3.1 Analýza měřených dat	27
3.1.1 Analýza v časové oblasti	27
3.1.2 Analýza ve frekvenční oblasti	28
3.1.3 Další analytické přístupy	32
3.1.4 Softwarové nástroje.....	33
3.2 Vibrodiagnostika.....	34
3.2.1 Základní diagnostické přístupy	34
3.2.2 Závady částí strojů a jejich projevy.....	35
4 PRAKTICKÁ ČÁST	37
4.1 Měření pohybu hřídele.....	37
4.1.1 Uspořádání měření	37
4.1.2 Analýza měření	38
4.2 Měření krouticího momentu	42
4.2.1 Uspořádání měření	42
4.2.2 Analýza měření	43
4.3 Měření vibrací.....	45
4.3.1 Uspořádání měření	45
4.3.2 Analýza měření a vyhodnocení	47
ZÁVĚR.....	52
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Symbol	Jednotka
Zrychlení	a	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Výkmit zrychlení	a_p	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Rozkmit zrychlení	a_{p-p}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Efektivní hodnota zrychlení	a_{rms}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Úhel styku	β	$\text{rad}, ^\circ$
Kvefrence	q	τ
Průměr valivých elementů	d_{ve}	m
Roztečný průměr	d_r	m
Frekvence	f	Hz
Relativní frekvence	f_r	Hz
Vzorkovací frekvence	f_{vz}	$\text{Hz}, \text{S}\cdot\text{s}^{-1}$
Převodový poměr	i	-
Elektrický proud	I	A
Hladina vibrací	L	dB
Krouticí moment	M_k	Nm
Počet valivých elementů	n	-
Čas	t	s
Elektrické napětí	U	V
Rychlost	v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Výchylka	x	m
Počet zubů	z	-

ÚVOD

Tato diplomová práce pojednává o měření a analýze veličin, které popisují chování rotujících strojních součástí za provozu. Rotující strojní součásti, především hřídele, ozubená kola a ložiska, představují nejdůležitější funkční části stroje, na něž působí při provozu zatížení. Při provozu jsou rotující strojní části také zdrojem nežádoucích projevů, jako jsou vibrace a hluk.

Teoretická část práce se věnuje nejprve obecné problematice měření, která zahrnuje zejména problematiku analogově-číslicového převodu. Tato část popisuje princip analogově-číslicového převodu, uvádí používané typy analogově-číslicových převodníků a věnuje se také problému aliasingu, který převod signálů do číslicové podoby doprovází. Dále se teoretická část věnuje konkrétněji měření jednotlivých fyzikálních veličin, které se vztahují k rotujícím částem strojů. Největší pozornost je věnována měření vibrací, kde jsou uvedeny použitelné typy snímačů a rozdíly mezi nimi. Dále jsou popsány prostředky pro měření úhlové rychlosti a krouticího momentu, což jsou veličiny popisující provozní kinematické a dynamické vlastnosti. Nedílnou součástí měření je také problematika sběru dat pro účely zpracování číslicových signálů za pomoci výpočetní techniky. Třetí oblastí, které se teoretická část věnuje, je analýza signálů, zejména s ohledem na analýzu vibrací. Analýza signálů zahrnuje matematické metody, s pomocí nichž lze z měřeného signálu získat informace, které na první pohled nejsou zřejmé. Analýza signálů úzce souvisí s diagnostikou strojů, jejímž účelem je detekce a lokalizace závad strojních součástí. Moderní analytické přístupy s využitím přesných snímačů a výpočetní techniky umožňují prediktivní přístup v diagnostice, jehož cílem je včasné odhalení závady a tím i snížení nákladů na opravy a odstávky stroje.

Praktická část představuje ověření teoretických poznatků na skutečných strojních soustavách. Na laboratorních přípravcích bylo provedeno měření pohybu hřídele, měření krouticího momentu a měření úhlové rychlosti. Měření jsou doplněna analýzou provedenou s pomocí softwaru vytvořeného ve vývojovém prostředí LabVIEW. Na průmyslovém strojním zařízení pak bylo provedeno měření vibrací pro účely kontroly kvality nově vyrobených kusů. U tohoto měření byla také provedena analýza za účelem vyhodnocení vibrací soustavy.

1 SIGNÁLY A JEJICH SNÍMÁNÍ

1.1 Spojité a diskrétní signály

Pojem signál představuje funkci, která přenáší informaci o chování určitého fyzikálního systému, jedná se tedy o fyzikální vyjádření zprávy. Může se jednat o funkci libovolné fyzikální veličiny, avšak v technických aplikacích se nejčastěji setkáváme se signály v podobě časového průběhu elektrického napětí. Signály je možné rozdělit na signály spojité v čase a diskrétní v čase. Signály spojité, též nazývané analogové, jsou přirozenou formou reprezentace signálu. Z matematického hlediska se jedná se o spojité nebo po částech spojité funkce, jejichž funkční hodnota je známá v každém časovém okamžiku. Diskrétní signály jsou tvořeny posloupností hodnot, mezi kterými je funkční hodnota signálu nedefinována. Funkční hodnoty časově-diskrétních signálů mohou být vyjádřeny v číslicové reprezentaci, v takovém případě se nazývají signály číslicovými, neboli digitálními. Hlavními výhodami číslicové reprezentace je snadný přenos pomocí dvouhodnotového signálu, možnost zpracování pomocí výpočetní techniky a nízká míra ovlivnění vnějším prostředím. [1],[3],[13]

1.2 Analogově-číslicové převodníky

Pro převod spojitých analogových signálů do číslicové reprezentace slouží analogově-číslicové převodníky (A/D převodníky, angl. *Analog-to-digital converter*, ADC). A/D převodník je integrovaný obvod, který provádí diskretizaci spojitého signálu v čase (vzorkování). V každém okamžiku diskretizace se pak přiřadí amplitudě snímaného signálu odpovídající hodnota z konečné množiny hodnot (kvantování). Na závěr je digitální hodnota vyjádřena v určitém kódování, většinou v binárním kódu.

Nejdůležitějšími vlastnostmi A/D převodníků jsou: [1],[15]

- Vzorkovací frekvence

Vzorkovací frekvence udává, kolik vzorků za sekundu může daný A/D převodník provést. Vzorkovací frekvence se udává ve vzorcích za sekundu (S/s, SPS) nebo v hertzech (Hz). Hodnoty vzorkovací frekvence se mohou pohybovat v širokém rozsahu, v oblasti technických měření jsou obvyklé vzorkovací frekvence v řádu jednotek kHz až stovek MHz.
- Rozlišení

Rozlišení udává, kolik diskrétních hodnot může výstupní signál nabývat. U převodníku s rozlišením n bitů je rozsah převodníku rozdělen do 2^n úrovní. Běžné hodnoty rozlišení jsou 8 až 24 bitů. Převodníky s vysokou vzorkovací frekvencí mají obvykle nižší rozlišení a naopak.
- Dynamický rozsah

Udává, jaké nejvyšší napětí je možné přivést na vstup převodníku. Při překročení tohoto napětí může dojít k poškození převodníku. Obvyklé hodnoty se pohybují v jednotkách V.
- Počet vstupů

U A/D převodníků s více vstupy je důležité, jestli mezi pořízením vzorků z více vstupů nastává prodleva, případně jak velká. Nejčastěji se vyskytují převodníky s 1 až 8 vstupy.

Analogově-číslicový převod je vždy zatížen chybami. Nejvýznamnější z nich plyne z faktu, že hodnot amplitudy vstupního signálu může být nekonečně mnoho, avšak číslicových hodnot je omezený počet. Při kvantování signálu tak dochází k chybě, při které může být amplitudě vstupního signálu přiřazena hodnota, která se od původní amplitudy může lišit až o polovinu kvantizační úrovně. Tato chyba se ve výsledném číslicovém signálu projeví jako dodatečný šum, proto je nazývána kvantizačním šumem. Pro konkrétní převodník se udává poměr signálu k šumu (*Signal to noise ratio, SNR*) v decibelech. Dalšími chybami, které se vyskytují při analogově-číslicovém převodu, jsou chyba zesílení, chyba nuly a chyba linearity. Všechny tyto chyby způsobují, že vlastnosti skutečného analogově-číslicového převodníku se liší od převodníku ideálního. Jedním z ukazatelů, kterým je možné hodnotit vlastnosti skutečného převodníku je efektivní počet bitů (*Effective number of bits, ENOB*), který je vždy menší, než je udávané rozlišení převodníku.

Podle principu činnosti je možné analogově-digitální převodníky rozdělit na typy

- paralelní (*parallel, flash*)
- zřetězené (*pipelined*)
- postupně aproximující (*successive approximation*)
- delta-sigma ($\Delta\Sigma$)
- integrující (dvouhranový, *dual slope*)
- a další

Paralelní A/D převodníky se skládají se z $2^n - 1$ komparátorů, kde n je rozlišení převodníku v bitech. Pracují nejrychleji, jelikož pro analogově-číslicový převod je zapotřebí pouze jednoho průchodu signálu přes komparátory, avšak jejich nevýhodou je velká složitost, zejména pro vyšší rozlišení. U dalších typů probíhá analogově-číslicový převod v několika krocích, což má za následek snížení složitosti obvodu. V současné době představují nejrozšířenější princip zřetězené převodníky a postupně aproximující převodníky. Zřetězené převodníky mohou dosahovat vysokých vzorkovacích frekvencí, až 250 MHz, při rozlišení 16 bitů. Postupně aproximující převodníky při srovnatelném rozlišení dosahují vzorkovací frekvencí pouze v řádu jednotek MHz. Pro vysoká rozlišení, až 24 bitů, se používají delta-sigma převodníky. [14],[15],[16]

1.3 Aliasing

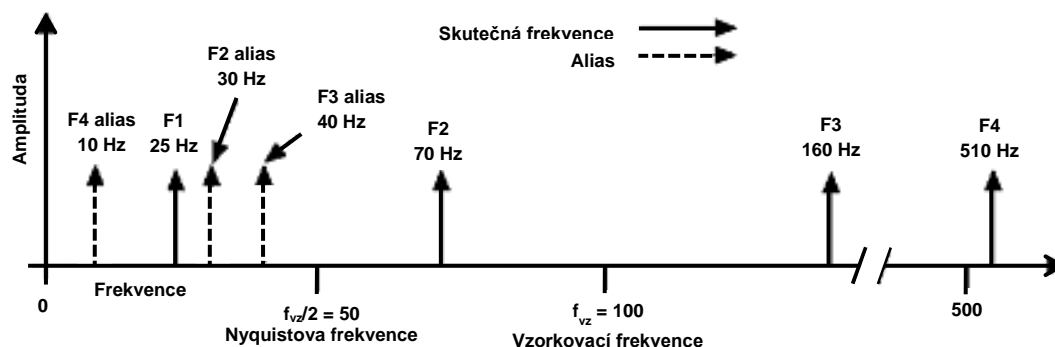
Pokud je nestacionární spojitý signál vzorkován diskrétně v čase, může se ve výsledném signálu projevit nežádoucí jev nazývaný aliasing, při kterém je výsledný signál zkrácen oproti signálu původnímu. Jak dokázal Nyquist, Shannon a další, podmínkou správného vzorkování je, aby vzorkovací frekvence byla alespoň dvakrát vyšší, než nejvyšší frekvence obsažená ve snímaném signálu. Tento poznatek je znám jako vzorkovací teorém. Hraniční frekvence snímaného signálu, nad níž nastává aliasing, se označuje jako Nyquistova frekvence. [1]

$$f_{Nyq} = \frac{f_{vz}}{2} \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

Projevem aliasingu posunutí složek signálu s frekvencí vyšší, než Nyquistova frekvence, do oblasti nižších frekvencí. V časové oblasti se aliasing projeví jako zkreslení signálu, neboť chybně určené frekvenční složky (tzv. aliasy) se sčítají se složkami správně určenými. Ve frekvenční oblasti jsou patrné chybně určené frekvence v oblasti nižších frekvencí (*Obr. 1*). Frekvence aliasu i -té frekvenční složky je dána vztahem

$$f_{alias,i} = \left| \left[\text{round} \left(\frac{f_i}{f_{vz}} \right) \cdot f_{vz} \right] - f_i \right| \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$

kde *round* značí operaci zaokrouhlení k nejbližšímu celému číslu. [17]



Obr. 1 Projev aliasingu ve frekvenční oblasti. [17]

V reálných situacích měřený signál často obsahuje složky s vyššími frekvencemi, než je frekvence užitečného signálu. V těchto případech je nutné předejít aliasingu a tím i zkreslení výsledného signálu v nižších frekvencích. Ochrana proti aliasingu spočívá v:

- Zvýšení vzorkovací frekvence.
- Použití anti-aliasingového filtru typu dolní propust', vřazeného před A/D převodník, který zpracováváný signál zbaví složek s frekvencemi, které by nebylo možné správně zaznamenat.
- Použití nerovnoměrného vzorkování, při kterém se liší časové intervaly mezi jednotlivými vzorky. Intervaly jsou stanoveny pseudonáhodně, přičemž střední hodnota intervalu odpovídá zvolené vzorkovací frekvenci. [1],[18]

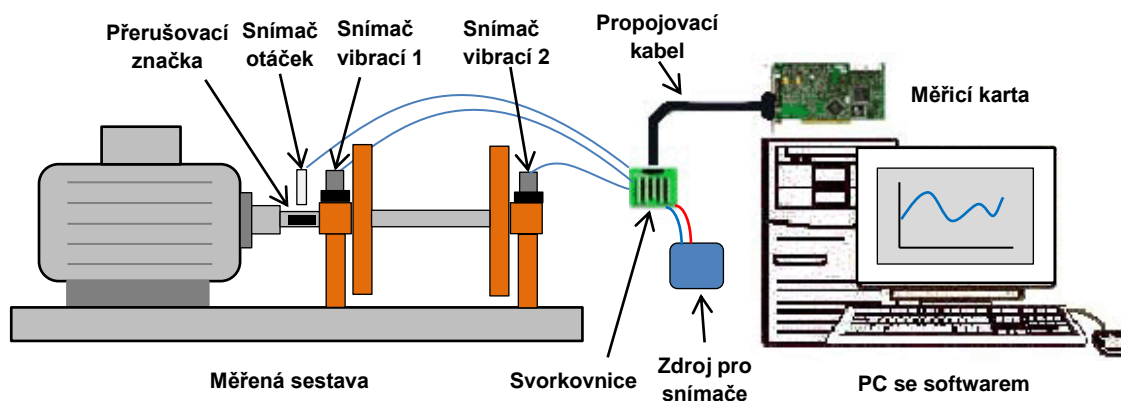
2 MĚŘENÍ VELIČIN ROTUJÍCÍCH ČÁSTÍ STROJŮ

Stroje se skládají z mnoha druhů součástí, z nichž některé za běhu vykonávají pohyb. Z pohyblivých součástí jsou nejčastější součásti vykonávající pohyb periodický. Periodickým pohybem může být pohyb posuvný (např. u pístu spalovacího motoru), ovšem nejčastěji se jedná o pohyb rotační. Strojními součástmi, které vykonávají rotační pohyb, jsou především hřídele, ozubená kola a ložiska a řemenice. U točivých elektrických strojů jsou to také rotory, které je možné považovat za samostatný celek, přestože se skládají z dalších součástí.

Rotující strojní součásti jsou zdrojem nežádoucích projevů, především vibrací. Vibrace se přenáší konstrukcí stroje a vyzářují do okolního prostoru, což je okolím vnímáno jako hluk. [2] Kromě nežádoucích projevů se měří také hodnoty některých provozních veličin rotujících částí stroje. Měření veličin rotujících částí strojů zahrnuje především měření následujících veličin:

- Výchylky, rychlosti a zrychlení,
jakožto veličin pro popis vibrací. Z hlediska fyzikálního popisu vibrací jsou to veličiny rovnocenné a lze je za pomoci integrace a derivace mezi sebou převádět. Nejčastější je měření zrychlení, což je dáno dostupností snímačů pro tuto veličinu.
- Úhlové rychlosti,
jakožto veličiny popisující provozní kinematické vlastnosti. Úhlová rychlost odpovídající otáčkám je důležitou informací při měření vibrací. Pomocí průběhu úhlové rychlosti lze také měřit a vyhodnocovat torzní vibrace hřídelů.
- Krouticího momentu,
jakožto veličiny popisující provozní dynamické vlastnosti. Krouticí moment v důsledku 2. Newtonova pohybového zákona odpovídá úhlovému zrychlení.

Pro měření výše uvedených veličin je nutné znát alespoň přibližný rozsah měřených hodnot a typ stroje, což umožní zvolit správnou metodu měření, typ použitých snímačů, jejich rozmístění a způsob upevnění ke stroji. Kromě samotných snímačů je pro sběr dat nutné použití dalšího vybavení, jako jsou měřicí karty a výpočetní technika pro ukládání dat se softwarem jejich následnou analýzu (Obr. 2).



Obr. 2 Měření vibrací a otáček při vyvažování rotorů.[32]

2.1 Měření vibrací

Vibrace stroje je možné rozdělit na vibrace absolutní, které jsou vztaženy k tíhovému poli Země a vibrace relativní, které jsou vztaženy k jiné části stroje nebo jeho okolí. Podle tohoto principu rozeznáváme snímače absolutních vibrací a relativních vibrací. U snímačů absolutních vibrací je setrvačná hmota snímače spojena článkem s určitou tuhostí a tlumením s pouzdem snímače a tím i s měřeným objektem. U snímačů relativních vibrací je setrvačná hmota spojena s měřeným objektem a pouzdro snímače je spojeno s jinou částí stroje nebo okolí. Jako snímače relativních vibrací jsou obvykle provedeny bezdotykové snímače a ruční vibrometry. Častějším případem jsou ovšem snímače absolutních vibrací, proto pokud v následujících kapitolách nebude uvedeno jinak, jedná se o snímače absolutních vibrací. [1],[19]

Podle měřené fyzikální veličiny můžeme snímače vibrací rozdělit na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. U prvního typu je výsledkem měření popis vibrací pomocí časového průběhu výchylky měřeného bodu. Numerickou derivací je možné vypočítat průběhy rychlosti a zrychlení. U snímačů zrychlení je výsledkem naopak průběh zrychlení, jehož integrací lze získat rychlost a výchylku.

Podle fyzikálního principu lze snímače vibrací rozdělit na

- piezoelektrické
- piezorezistivní
- tenzometrické
- elektrodynamické (indukční)
- indukčnostní
- kapacitní
- a další [1],[19]

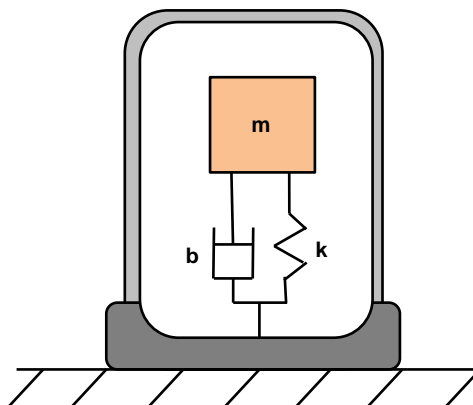
Setrvačná hmota uvnitř jednoduchého snímače vibrací se může pohybovat pouze v jednom směru, obvykle kolmém na měřený povrch. Snímač tak vykazuje směrovost, kdy vibrace v jiném než zvoleném směru jsou částečně nebo úplně potlačeny. Toto je žádoucí jev, neboť na měřeném stroji se mohou skládat vibrace z různých směrů, z nichž každý je třeba zachytit zvlášť. Pro měření ve více osách se používá několika jednoosých snímačů umístěných kolmo na sebe, nebo jednoho snímače víceosého, který v sobě integruje několik jednoosých snímačů.

Základními vlastnostmi snímačů vibrací jsou dynamický rozsah, udávaný v m/s^2 nebo násobcích tíhového zrychlení g , frekvenční rozsah, udávající horní a dolní mez měřitelných frekvencí, citlivost, směrová charakteristika a odolnost proti vlivům prostředí, zejména odolnost proti teplotě a vlhkosti. Důležité jsou také rozměry a hmotnost snímače, které mohou být v některých aplikacích limitujícím faktorem.

Při umístění snímačů je nutné dbát na to, aby byl snímač co nejbližší měřenému oblasti (např. ložisku). Ve větší vzdálenosti by se již projevilo tlumení vyplývající z konstrukce stroje a vibrace pocházející z určené oblasti by již byly velmi obtížně měřitelné. Z tohoto důvodu nestačí na měřený stroj umístit pouze jeden snímač ve zvoleném směru, ale je vždy nutné použití tolika snímačů, kolik je na stroji měřených oblastí.

2.1.1 Snímače zrychlení

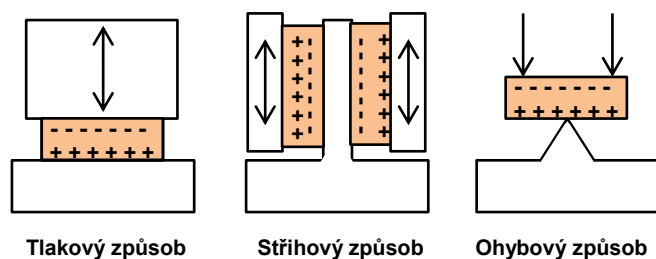
Snímače zrychlení (akcelerometry) jsou nejčastěji používanými typy snímačů pro měření vibrací. Obecná konstrukce snímače zrychlení je patrná na *Obr. 3*. Snímač se skládá ze seismické hmoty, které je článkem s určitou tuhostí a tlumením spojena s pouzdrem, které se připevňuje k měřenému objektu.



Obr. 3 Obecné schéma akcelerometru.

Jak plyne z řešení pohybové rovnice setrvačné hmoty, v podrezonanční oblasti je výchylka seismické hmoty z rovnovážné polohy proporcionální ke zrychlení. Tuto výchylku je třeba převést na měřitelný elektrický signál. Podle principu převodu výchylky na elektrický signál rozeznáváme různé druhy snímačů zrychlení. Jedná se o snímače piezoelektrické, piezorezistivní a kapacitní a tenzometrické. [1],[20]

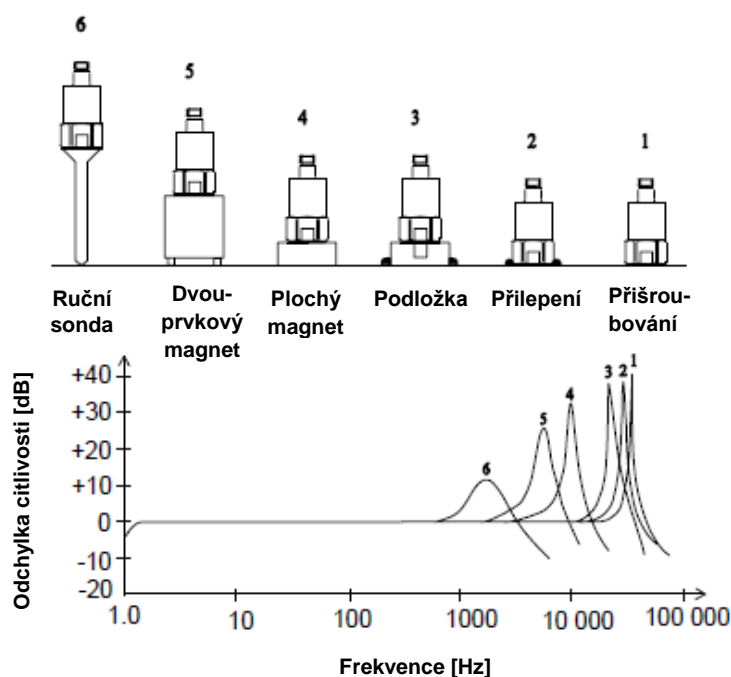
V oblasti měření vibrací se uplatňují především piezoelektrické snímače zrychlení, které jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Při tomto jevu dochází při vychýlení seismické hmoty k mechanické deformaci piezoelektrického materiálu, nejčastěji monokrystalu, na jehož elektrodách se objeví elektrický náboj. Základní způsob zatěžování piezoelektrického elementu je způsob tlakový, stříhový a ohybový. [21]



Obr. 4 Způsoby zatěžování piezoelektrických elementů. [21]

Při praktické realizaci akcelerometru se z těchto způsobů nejčastěji využívá jev stříhový, při kterém deformace elementu probíhá ve dvou osách současně, a tlakový, při kterém deformace probíhá pouze v jedné ose. Výhodou tlakového způsobu zatěžování je jednoduchost konstrukce snímače, ve kterém seismická hmota působí na piezoelektrický element pouze tahem a tlakem. Nevýhodou snímačů této konstrukce je citlivost na příčný směr zatěžování, což omezuje použití těchto snímačů na méně náročné aplikace, kde se příčné vibrace nevyskytují, nebo lze jejich působení zanedbat. Piezoelektrické snímače se stříhovým jevem jsou naproti tomu velmi málo citlivé na příčné vibrace. Díky této výhodě jsou snímače se stříhovým jevem nejrozšířenějším typem piezoelektrických snímačů zrychlení.

Pro správnou funkci snímače zrychlení je nutné, aby snímaná frekvence byla mnohem nižší, než je jeho rezonanční frekvence. Tento požadavek představuje horní omezení frekvenčního rozsahu snímače. Dolní limit by byl v případě ideálního snímače roven 0 Hz, ovšem v praxi je vlivem měřicího řetězce nenulový. Hodnoty frekvenčního rozsahu udávané v technické dokumentaci snímačů platí pro případ dokonale pevného upevnění snímače k měřenému objektu. Na tuhosti upevnění závisí rezonanční frekvence snímače a tím i horní hranice frekvenčního rozsahu. Podle tuhosti můžeme způsoby upevnění seřadit následovně: dotyková sonda, připevnění pomocí magnetu, připevnění voskem, přilepení a přišroubování. [1]



Obr. 5 Vliv upevnění na rezonanční frekvenci.[22]

Dynamický rozsah vyráběných piezoelektrických akcelerometrů je až 10000 g, nejčastější jsou však hodnoty v řádu desítek až stovek g. Resonanční frekvence se pohybuje v desítkách kHz. Snímače větší velikosti mají obvykle vyšší citlivost, ale nižší frekvenční rozsah vyplývající z vyšší hmotnosti.

Následující údaje platí pro snímač ACC797 od firmy Omega:

Dynamický rozsah [g]	50
Frekvenční rozsah [Hz]	3 až 5000
Resonanční frekvence [Hz]	26000
Citlivost [$\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$]	100
Citlivost na příčné vibrace [%]	5
Linearita [%]	1
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-50 až 120
Hmotnost [kg]	0,135

Tab. 2-1 Parametry snímače ACC797.[4]

Piezorezistivní akcelerometry jsou založeny na piezorezistivním jevu, při kterém dochází ke změně měrného elektrického odporu materiálu při mechanickém zatěžování. Seismická hmotnost piezorezistivního snímače je spojena s pouzdrům prostřednictvím článku, na němž jsou umístěny piezorezistivní elementy. Při pohybu seismické hmoty dochází k ohybovému zatěžování snímače a tím i piezorezistivních elementů a ke změně jejich odporu. [1]

Ve srovnání s piezoelektrickými akcelerometry jsou akcelerometry piezorezistivní schopny dosahovat většího dynamického rozsahu, proto se používají pro snímání dějů, které mají charakter rázu. Nevýhodou těchto snímačů je teplotní závislost odporu piezoelektrického elementu.

Následující údaje platí pro snímač 2262A-2000 od firmy Meggitt:

Dynamický rozsah [g]	2000
Frekvenční rozsah [Hz]	0 až 3000
Citlivost [$\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$]	0,25
Linearita [%]	2
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-18 až 93
Hmotnost [kg]	0,028

Tab. 2-2 Parametry snímače 2262A-2000.[5]

Kapacitní akcelerometry se skládají ze dvou elektrod, z nichž jedna je pohyblivá a působí jako setrvačná hmota. Při pohybu dochází k přibližování a vzdalování elektrod, což má za následek změnu kapacity kondenzátoru, tvořeného těmito elektrodami a vzduchovou mezerou. Tento druh akcelerometru je často realizován jako mikro-elektro-mechanický systém (MEMS). [1]

Kapacitní akcelerometry mají oproti předešlým typům řádově nižší dynamický i frekvenční rozsah. Jejich výhodou je vysoká citlivost a přesnost.

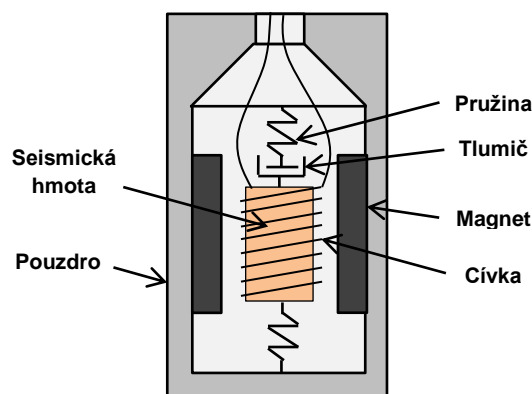
Následující údaje platí pro snímač ASC 3421-010 od firmy ASC:

Dynamický rozsah [g]	10
Frekvenční rozsah [Hz]	0 až 800
Citlivost [$\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$]	200
Linearita [%]	0,8
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-20 až 100
Hmotnost [kg]	0,005

Tab. 2-3 Parametry snímače ASC 3421.[6]

2.1.2 Snímače rychlosti

V případě elektrodynamického snímače konstrukce podle Obr. 6 je mechanická veličina převáděna na elektrickou pomocí elektromagnetické indukce. Snímač se skládá z pouzdra, ve kterém je uložen permanentní magnet a seismické hmoty s cívkou, na které se při relativním pohybu magnetu a cívky indukuje elektrické napětí. Seismická hmota je s pouzdrům spojena pružným a tlumícím článkem, tlumení může být realizováno také plynem nebo kapalinou. Možná je také obrácená konstrukce, kdy permanentní magnet tvoří seismickou hmotu. Elektrodynamický snímač rychlosti pracuje v nadrezonanční oblasti, takže výchylka seismické hmoty je proporcionální k výchylce měřeného objektu. Indukované napětí je přímo úměrné velikosti změny výchylky, tedy rychlosti. [1]



Obr. 6 Schéma snímače rychlosti.[33]

Výhodou elektrodynamického snímače zrychlení je vysoká citlivost, která umožňuje jeho použití bez zesilovačů. Nevýhodou je omezený frekvenční rozsah do 2 až 3 kHz a vysoké zkreslení v oblasti nízkých frekvencí (kolem rezonanční frekvence). Nevýhodou je také nežádoucí směrovost, vysoká hmotnost snímače a citlivost na vnější elektromagnetická pole.

Následující údaje platí pro snímač VS-068 od firmy Brüel & Kjaer Vibro:

Rozsah výchylky [mm]	1
Frekvenční rozsah [Hz]	5 až 2000
Rezananční frekvence [Hz]	8
Citlivost [$\text{mV} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}$]	100
Citlivost na příčné vibrace [%]	7
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-40 až 80
Hmotnost [kg]	1,5

Tab. 2-4 Parametry snímače VS-068.[6]

Dalším způsobem, jakým lze měřit rychlost vibrací je použití laserového interferometrického vibrometru. Tento přístroj umožňuje bezkontaktní měření rychlosti vibrací a to do velmi vysokých frekvencí s vysokou přesností. Využívá Dopplerova jevu, který způsobuje změnu vlnové délky laserového záření, které dopadá na pohybující se odraznou plochu. Odražený laserový paprsek interferuje s paprskem vyslaným, přičemž projevy interference je možné využít pro určení rychlosti snímaného povrchu. Vibrometr se obvykle skládá z jedné nebo více laserových hlavic, které obsahují laserový zdroj a snímací optiku, a vyhodnocovací jednotky. Použití jedné laserové hlavičky umožňuje měřit rychlost vibrací ve směru dopadajícího paprsku, použití dvou hlavic umožňuje měření vibrací ve směru kolmém na dopadající paprsek nebo měření úhlové rychlosti otáčejícího se hřídele (viz *Kap. 2.2*). Rychlost je vždy měřena vůči laserové hlavičce, jedná se tedy o měření relativních vibrací.

Laserový vibrometr je možné použít pro měření širokého rozsahu rychlostí (přibližně od $0,05 \mu\text{m/s}$ do 10 m/s) a frekvencí (přibližně od 1 Hz do 30 MHz). Použití laserového vibrometru však limituje jeho značná pořizovací cena. Používá se tam, kde běžné snímače nedostačují svými parametry nebo tam, kde je vyžadováno bezkontaktní měření. [1],[7]

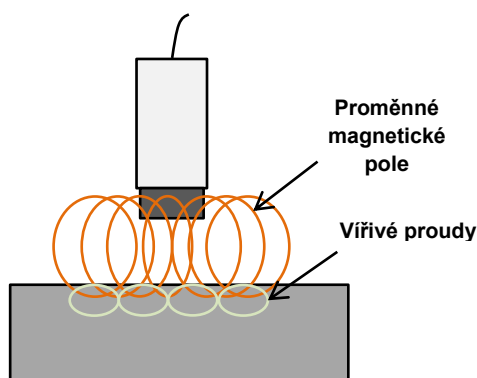


Obr. 7 Laserový interferometrický vibrometr. [7]

2.1.3 Snímače výchylky

Měření výchylky lze realizovat pomocí snímačů založených na indukčném, indukčním, kapacitním, magnetickém nebo optickém principu. V oblasti měření vibrací jsou nejčastější bezkontaktní snímače založené na principu indukčném a kapacitním. Jelikož se výchylka stanovuje vůči pozici jiné části stroje nebo okolí, jedná se o měření relativních vibrací.

Indukčností snímače jsou založeny na snímání změny indukčnosti cívky, umístěné na měřicím konci snímače, v závislosti na přiblížení předmětu z elektricky vodivého materiálu. Cívka je buzena střídavým elektrickým napětím, které v okolí cívky vytváří proměnné magnetické pole. Toto magnetické pole v blízkých kovových předmětech indukuje vířivé proudy. Vířivé proudy působí proti změně, která je vyvolala, tedy proti magnetickému poli cívky snímače. Účinek vířivých proudů se projeví změnou indukčnosti cívky snímače, která je vyhodnocena elektronikou snímače a převedena na napěťový signál, který je proporcionální k výchylce měřeného předmětu. [1],[8]



Obr. 8 Schéma činnosti indukčností snímače.[8]

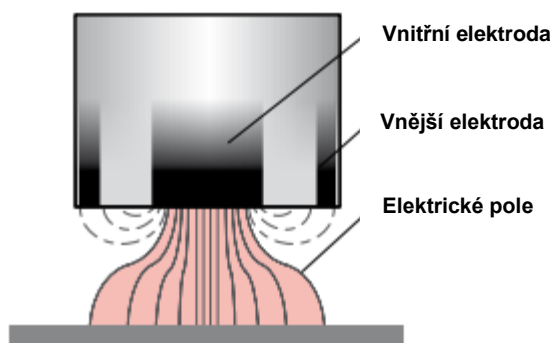
Indukčností snímače se vyznačují poměrně velkým frekvenčním rozsahem, malými rozměry, necitlivostí na znečištění a nízkou cenou. Jejich nevýhodou je malý rozsah snímané výchylky a nižší přesnost v porovnání s kapacitními snímači.

Následující údaje platí pro snímač ECL202-U5 od firmy Lion Precision:

Rozsah výchylky [mm]	0,25 až 1,25
Frekvenční rozsah [Hz]	0 až 15000
Rozlišení při 15 kHz [μm]	0,26
Linearita [%]	0,2
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-25 až 125
Průměr sondy [mm]	5

Tab. 2-5 Parametry snímače ECL202-U5.[8]

Kapacitní snímač výchylky se skládá ze dvou elektrod a dielektrika. Vnější elektroda má tvar dutého válce, uvnitř kterého se nachází vnitřní elektroda. V blízkosti měřicího konce snímače je dielektrikem vzduchová mezera. Při přiblížení měřeného předmětu do blízkosti měřicího konce se předmět stane dielektrikem a změní kapacitu snímače. Tato změna je vyhodnocována elektronikou snímače a převáděna na napěťový signál. [1],[8]



Obr. 9 Schéma činnosti kapacitního snímače.[9]

Výhodou kapacitního snímače výchylky je především velmi vysoká přesnost měření, umožňující měřit výchylky v řádu nanometrů. Nevýhodami je malý rozsah snímané výchylky, citlivost na znečištění a vyšší cena.

Následující údaje platí pro snímač CS08 od firmy Micro Epsilon:

Rozsah výchylky [mm]	max. 0,8
Frekvenční rozsah [Hz]	0 až 8500
Rozlišení při 8,5 kHz [μm]	0,016
Linearita [%]	0,2
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-50 až 200
Průměr sondy [mm]	10

Tab. 2-6 Parametry snímače CS08.[9]

2.2 Měření úhlové rychlosti

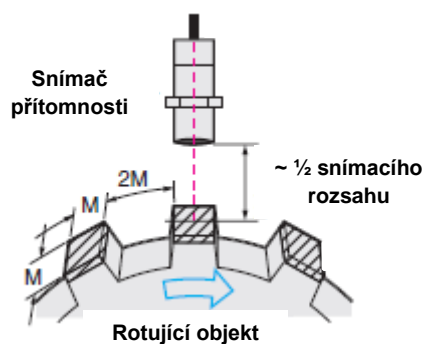
Účel měření úhlové rychlosti je především stanovení otáček rotujících částí stroje po dobu měření jiných veličin. Otáčky a úhlovou rychlost je možné považovat za stejnou veličinu, zvýšenou pozornost je však nutné věnovat přepočtu jednotek (rad/s, ot./s, Hz, ot./min). Informace o otáčkách je důležitá zejména při měřeních, kdy je nutné zjistit chování stroje v celém rozsahu otáček (typicky měření vibrací).

2.2.1 Snímače úhlové rychlosti

Pro nepřímé měření úhlové rychlosti se využívají zejména bezdotykové snímače přítomnosti, pracující na principu indukčném, kapacitním nebo optickém. Pro použití těchto snímačů musí být na rotující části stroje (většinou hřídeli) umístěn disk s výstupky, nebo alespoň přerušovací značka, jejíž přiblížení bude snímač přítomnosti detekovat. Možné je též využití zubů na ozubených kolech. Každý průchod výstupku kolem snímače se projeví jako impulz. Z počtu impulzů za určitý čas je možné získat otáčky snímané části stroje. [1]

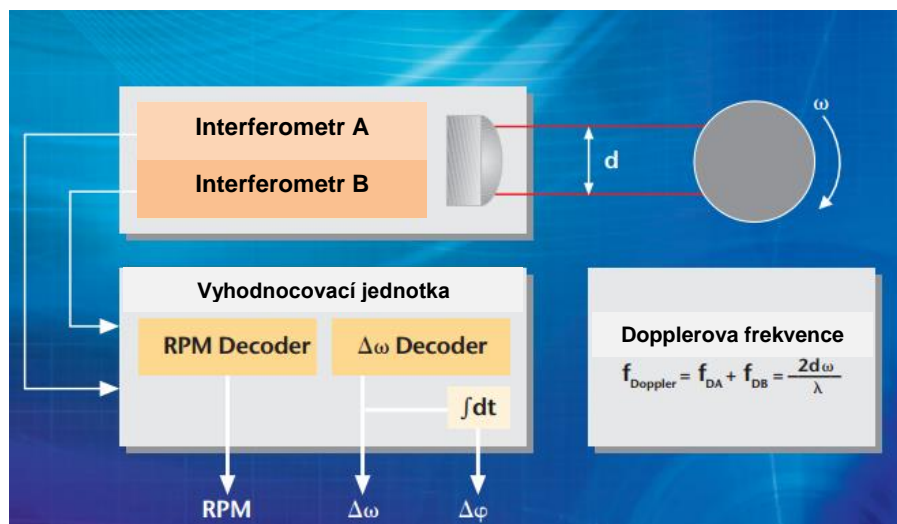
Indukčností a kapacitní snímače přítomnosti pracují na stejném principu, jako indukčností snímač polohy, pouze jsou na ně kladeny nižší nároky na přesnost, což se projevuje na jejich nižší ceně. Zpracovaný signál však není proporcionální k poloze, ale má charakter impulzů.

Optické senzory využívají odrazu záření (většinou v infračerveném spektru) od měřeného povrchu. Změny v odrazu záření v důsledku přiblížení výstupku nebo průchodu přerušovací značky s jinou odrazivostí, jsou detekovány fotodiodou a dále zpracovány do podoby elektrických impulzů. Možné je také použití zdroje a detektoru záření jako optozávory, při tomto uspořádání je ale nutné mít přístup k disku s výstupky nebo ozubenému kolu z obou stran.



Obr. 10 Měření otáček pomocí snímače přítomnosti.[10]

Pro měření úhlové rychlosti lze dále využít laserový interferometrický vibrometr a to v uspořádání se dvěma laserovými hlavicemi (nebo jedné hlavice se dvěma paprsky). Laserové paprsky musí být na hřídel rovnoběžně nasměrovány tím způsobem, že každý z nich dopadá do jedné poloviny hřídele. Při této konfiguraci mají vektory rychlostí v příčném směru opačné znaménko a lze je odečíst. Dopplerův posuv je pak dán pouze rotační složkou pohybu, z níž lze po vyhodnocení obdržet úhlovou rychlost. [11]



Obr 11. Měření úhlové rychlosti laserovým vibrometrem. [11]

Pomocí interferometrického vibrometru je možné měřit úhlovou rychlost při vysoké vzorkovací frekvenci, což umožňuje také využití průběhu úhlové frekvence pro měření a analýzu torzních kmitů hřídelí.

2.2.2 Určení úhlové rychlosti z měření vibrací

Pokud během měření vibrací nebylo provedeno měření úhlové rychlosti, existuje ještě možnost odhadu úhlové rychlosti na základě frekvenční analýzy časového průběhu veličin popisujících vibrace. Ve frekvenčním spektru jsou zpravidla zřetelné frekvence odpovídající otáčkám hřídelů a jiných rotujících součástí, nebo frekvence odpovídající otáčkám hnacího stroje. Této skutečnosti se využívá jednak při identifikaci jednotlivých frekvenčních složek ve vibrodiagnostice (viz *Kap. 3.2*), ale lze jí využít i obráceným způsobem pro určení úhlové rychlosti. Výhodou tohoto způsobu je možnost zjištění úhlové rychlosti tam, kde nelze použít snímač a možnost zpětné rekonstrukce úhlové rychlosti z naměřených dat. Nevýhodou může být nižší přesnost, která závisí na rozlišení frekvenčního spektra. V některých případech může také nastat situace, kdy ve frekvenčním spektru nebude žádná z frekvenčních složek natolik výrazná, aby ji šlo použít pro odhad úhlové rychlosti. Pro zvýšení přesnosti určení úhlové rychlosti lze využít dalších znalostí o předpokládané poloze příslušných frekvenčních složek, s využitím Bayesovského přístupu. [1]

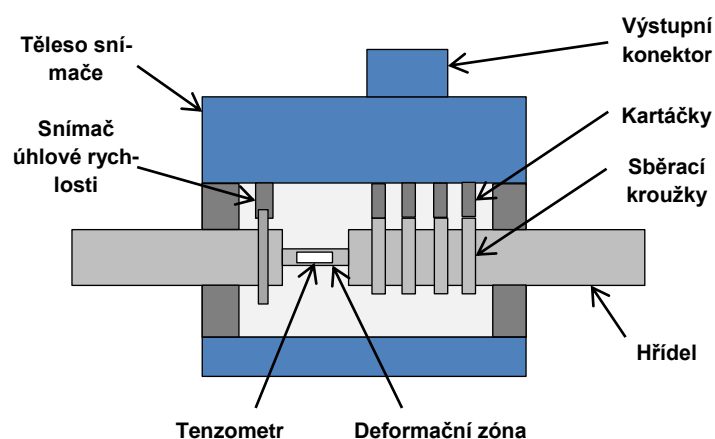
2.3 Měření krouticího momentu

Krouticí moment je možné rozdělit na statický a dynamický, přičemž měření statického momentu se odehrává za klidu, zatímco měření dynamického momentu vyžaduje úhlové zrychlení a odehrává se za provozu. [22] Při měření rotujících částí strojů jde tedy především o měření dynamického momentu. Dynamický krouticí moment reprezentuje u rotujících částí stroje jejich zatížení. Současným měřením momentu a otáček lze stanovit přenášený výkon. U složitějších strojních soustav, jako například u převodovek, je možné měřením momentu na vstupu a výstupu stanovit také účinnost.

Při zatížení hřídele krouticím momentem dojde k úhlovému posuvu sousedních průřezů hřídele a k deformaci povrchových křivek. Toho využívají snímače krouticího momentu, které lze podle principu rozdělit na snímače tenzometrické, snímače s převodem momentu na úhel a snímače magnetické. Nejčastěji používaným typem jsou

snímače tenzometrické, které využívají deformace povrchu tělesa namáhaného krouticím momentem, která se za pomoci tenzometrů převádí na elektrický signál. Snímače s převodem momentu na úhel využívají natočení sousedních průřezů hřídele. Převod natočení na elektrickou veličinu je možné realizovat na principu optickém, kapacitním, indukčností nebo indukčním. Magnetické snímače využívají změny magnetických vlastností hřídele při zatížení krouticím momentem, nejčastěji pomocí magnetoelastického jevu. [19]

Schéma jednoho z možných provedení snímače krouticího momentu je na *Obr. 12*. Snímač se skládá ze vstupní a výstupní hřídele, které jsou spojeny deformačním členem. Na deformačním členu je umístěno čidlo krouticího momentu, v tomto případě tenzometr. Signály z čidla jsou z rotující hřídele přenášeny pomocí soustavy sběracích kroužků a kartáčků. Hřídele jsou uloženy v ložiscích ve vnějším pouzdru snímače. V pouzdru se dále nachází elektronika, která vyhodnocuje signály ze sběracích kroužků, a výstupní rozhraní. Snímač krouticího momentu je v tomto případě také kombinován se snímačem úhlové rychlosti.



Obr. 12 Schéma snímače krouticího momentu.[12]

Technický problém představuje přenos signálů z rotující hřídele. Pro nízké a střední úhlové rychlosti se často používá kontaktní přenos pomocí sběracích kroužků a kartáčků. Nevýhodou tohoto způsobu je opotřebení kartáčků, vyžadující pravidelnou údržbu, a nedokonalý kontakt kartáčků způsobující dodatečný šum v měřeném signálu, vibrace a elektrické rušení. Pro vyšší úhlové rychlosti se používá bezkontaktní přenos signálů. Napájení čidla bývá realizováno na principu rotačního transformátoru, přenos signálu pak na infračerveném optickém přenosu, rádiovém přenosu, kapacitním snímání a dalších principech.

Rozsah použití snímačů krouticího momentu určuje především provedení deformačního členu a způsob přenosu signálů z rotující části. Komerčně vyráběné snímače mohou měřit momenty od řádu tisíců Nm po desítky tisíc Nm. Snímače s bezkontaktním přenosem signálů mohou být použity pro otáčky do 50000 min^{-1} . Přesnost snímačů se nejčastěji pohybuje kolem 0,1% měřené hodnoty. [12],[23]

2.4 Hardware pro sběr dat

Pro účely zpracování signálů za pomoci výpočetní techniky je nutné provést jejich vzorkování a zapsat data do strojově čitelného formátu. Před samotným vzorkováním je však v řadě případů třeba provést nejprve zesílení signálu a případně také filtraci.

Snímače se k zařízením pro sběr dat připojují zpravidla koaxiálními kabely. V případě snímačů, které generují signály o velmi nízké napěťové úrovni (například piezoelektrické akcelerometry), jsou na propojovací kabely kladeny vysoké požadavky. Tyto kabely musí mít vysokou úroveň stínění a musí být odolné proti triboelektrickému jevu, který by mohl znehodnotit měřený signál. Oproti tomu snímače generující vyšší napěťové úrovně (například snímače rychlosti nebo snímače zrychlení s integrovaným zesilovačem) je možné připojit relativně běžným koaxiálním kabelem. [1]

Pro účely sběru dat je možné využít širokou škálu měřicích zařízení od řady výrobců. Příkladem uceleného systému pro sběr dat je systém CompactDAQ od firmy National Instruments. Jádrem tohoto systému je pouzdro (*chasis*) s kontrolérem, který poskytuje rozhraní mezi měřicími moduly a počítačem. Pro systém CompactDAQ je k dispozici řada měřicích modulů. Pro měření analogových vstupů prostřednictvím koaxiálních kabelů je vhodná měřicí karta NI 9234, která disponuje 4 měřicími kanály s rozlišením 24 bitů. Těchto karet lze do pouzdra vložit několik a zvýšit tak počet současně měřených kanálů. Systém CompactDAQ se připojuje k počítači pomocí sběrnice USB nebo Ethernet, případně za pomoci bezdrátového wi-fi spojení. Pro účely komunikace je zapotřebí speciálního softwaru integrovaného do vývojového prostředí LabVIEW. [24]



Obr. 13 Různá provedení systému CompactDAQ s měřicími kartami.[24]

Pro účely sběru dat je kromě mobilních systémů typu CompactDAQ možné využít také měřicích karet do PC s rozhraním PCI nebo PCIe, USB karet nebo systému na platformě PXI. U měřicích karet do PC je však navíc nutné vyřešit připojení snímačů na vstupy karty. Platforma PXI je vhodná pro náročné aplikace, které vyžadují vysoký počet měřicích vstupů a vysokou odolnost pro použití v průmyslu. Jako příklad jiných výrobců je možné uvést firmu Brüel and Kjaer, která vyrábí systém LAN-XI určený pro měření vibrací, příkladem výrobce hardwaru určeného obecně pro sběr dat může být firma ADLINK. [25],[26]

3 VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ A VIBRODIAGNOSTIKA

Měřením veličin vibrací získáme jejich časový průběh v diskrétní podobě. Z časového průběhu vibrací však nelze učinit žádné komplexní závěry, proto je nutné pro účely vyhodnocení naměřených dat provést jejich analýzu. Analýza zahrnuje aplikaci matematických operací na data za účelem získání informací, které nejsou z původních dat zřejmé. Analýzu naměřených dat lze provádět i v časové oblasti, která však poskytuje pouze základní informace o průběhu kmitání. Klasickým přístupem analýzy vibrací je pak analýza ve frekvenční oblasti založená na Fourierově transformaci. Pomocí Fourierovy transformace lze získat frekvenční spektrum kmitání, které poskytne informace o složkách kmitání. Kromě Fourierovy transformace lze pro analýzu vibrací uplatnit i další přístupy, z nichž byla pro účely této práce vybrána kepsrální analýza a vlnková transformace. Výsledky analýzy lze použít pro obecný popis vibrací stroje, například pro účely kontroly kvality. S využitím empirických znalostí o charakteristických projevech závad rotujících strojních součástí lze pak z výsledků analýzy provést diagnostiku dané strojní soustavy, zaměřenou na zjišťování závad a jejich předcházení.

3.1 Analýza měřených dat

3.1.1 Analýza v časové oblasti

V časové oblasti je diskrétní signál popsán posloupností hodnot, které reprezentují funkční hodnotu (amplitudu) veličiny v určitých časových okamžicích. Mezi těmito okamžiky je funkční hodnota nedefinována. Z posloupnosti $x_i(i)$ reprezentující určitý časový úsek měřeného signálu je možné určit několik charakteristik dané veličiny vibrací, sloužících pro získání základní představy o velikosti vibrací. Jedná se o výkmit (angl. *peak*), reprezentující maximální absolutní hodnotu na daném časovém úseku, rozkmit (*peak to peak*), reprezentující velikost mezi minimem a maximem a dále charakteristiky popisující průměrnou a efektivní hodnotu kmitání. Průměrná hodnota (*mean value*) diskrétního signálu je definována vztahem

$$x_{stř} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (3.1)$$

a efektivní hodnota (angl. *root mean square* - RMS) vztahem

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.2)$$

Velikost efektivní hodnoty v poměru k ostatním charakteristikám záleží na průběhu měřené veličiny, pro sinusový průběh je efektivní hodnota rovna $1/\sqrt{2}$ násobku amplitudy. Z poměru výkmitu a efektivní hodnoty je možné dále určit tzv. *crest factor*

$$CF = \frac{\max(|x_i|)}{x_{ef}} \quad (3.3)$$

Z posloupnosti hodnot popisujících amplitudu kmitání je možné vypočítat posloupnost výkonovou. Pro okamžitou hodnotu výkonu signálu v intervalu i platí vztah

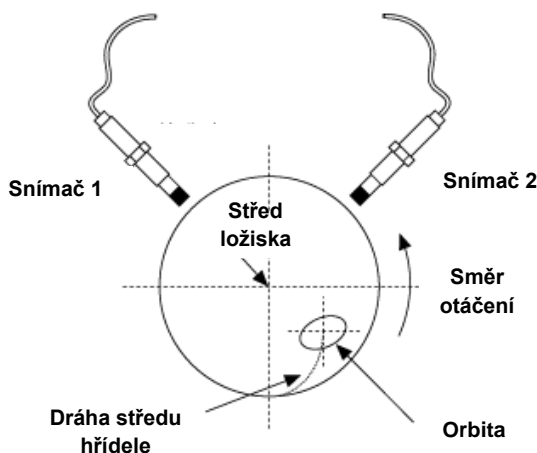
$$P_i = x_i^2 \quad (3.4)$$

Pro analýzu vibrací s velkým dynamickým rozsahem je vhodné použít namísto lineárních jednotek měřené veličiny jednotky logaritmické. Hodnoty v logaritmických jednotkách lze nazvat hladinou vibrací, jejíž jednotkou je decibel (dB). Platí vztah

$$L_i = 20 \log \left(\frac{x_i}{x_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.5)$$

kde x_0 je referenční hodnota vibrací. Referenční hodnota má velikost 10^{-12} m pro amplitudu, 10^{-8} m/s pro rychlost a 10^{-5} m/s² pro zrychlení. [1],[13]

Zvláštní význam má analýza v časové oblasti při měření pohybu hřídele v ložisku. Tento druh měření se provádí za pomoci dvou snímačů výchylky umístěných kolmo na sebe. Výsledkem měření jsou dva časové průběhy výchylky, které jsou fázově posunuté o 90°.



Obr. 14 Měření pohybu hřídele v ložisku.[27]

Průběhy výchylky se obvykle zobrazují do dvourozměrného grafu, kde každému snímači odpovídá jedna osa. Výsledkem je grafické znázornění výchylky zvané orbita. Orbita odpovídá dráze středu hřídele, zpravidla během jedné otáčky. Orbita za běhu stroje mění svůj tvar, velikost i polohu. Na tvar orbity mají vliv frekvenční složky kmitání v jednotlivých směrech, amplituda kmitání má vliv na její velikost. Střed orbity určuje přibližný střed hřídele v dané otáčce. Během zvyšování a snižování otáček se střed orbity mění oproti výchozímu bodu, kterým je střed hřídele za klidu. Z časového průběhu středů orbit lze stanovit průběh výchylky středu hřídele za běhu stroje. [1],[27]

3.1.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Fourierova transformace

Analýza ve frekvenční oblasti je založena na poznatku, že jakoukoli po částech spojitou periodickou funkci lze nahradit nekonečnou řadou harmonických funkcí, nazývanou Fourierovou řadou. Pro převod spojitě funkce z časové oblasti do frekvenční oblasti slouží přímá Fourierova transformace definovaná vztahem

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.6)$$

Zpětná Fourierova transformace je pak definována vztahem

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.7)$$

Výsledkem Fourierovy transformace spojité funkce je spojité frekvenční spektrum, které je v komplexní rovině možné vyjádřit jako

$$F(f) = \text{Re}(f) + j\text{Im}(f) = |F(f)|e^{j\varphi(f)} \quad (3.8)$$

přičemž $|F(f)|$ se označuje jako amplitudové spektrum a $\varphi(f)$ se označuje jako fázové spektrum.

Fourierovu transformaci je možné použít také na diskrétní signály, jejím výsledkem je ovšem opět spojité spektrum. Tato Verze Fourierovy transformace se označuje jako DTFT (*Discrete Time Fourier Transform*) a je definována vztahem [1]

$$F(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi fn} \quad (3.9)$$

Diskrétní Fourierova transformace

V případě analýzy signálů pomocí výpočetní techniky je třeba získat z diskrétního časového signálu diskrétní spektrum. Tato varianta Fourierovy transformace se nazývá diskrétní Fourierovou transformací (DFT). Definiční vztah přímé DFT je

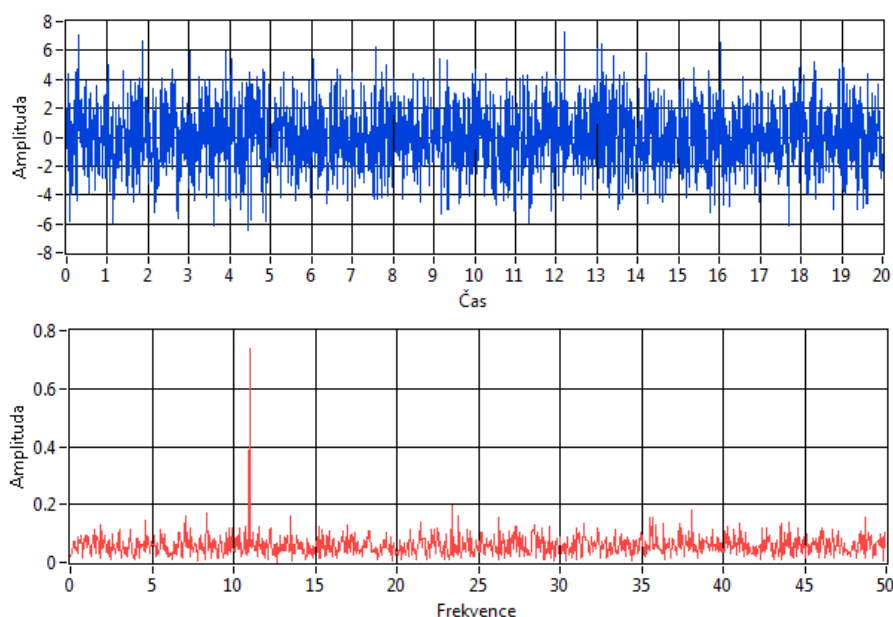
$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.10)$$

a zpětné DFT

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k)e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.11)$$

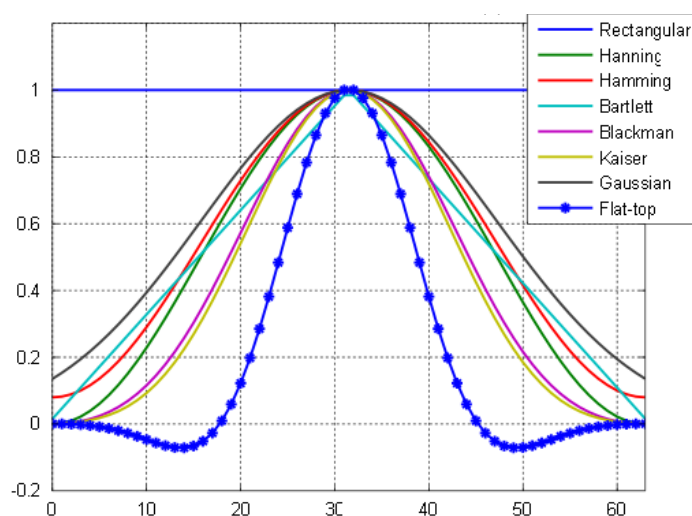
kde $n = 1, 2, \dots, N-1$.

Výsledkem přímé DFT je diskrétní frekvenční spektrum. Toto spektrum je souměrné podle osy y , která jej rozděluje na pravou a levou část. Obě části obsahují stejná data, proto se v praxi využívá pouze pravá část. Hodnota v nulovém bodě se označuje jako stejnosměrná (DC) složka signálu, která vyjadřuje posuv signálu na ose y po odečtení všech harmonických složek. [1],[3] U signálu na Obr. 15 je DC složka blízká nule, jelikož střední hodnota všech harmonických složek je také blízká nule.



Obr. 15 Signál v časové oblasti a jeho frekvenční spektrum.

Lze dokázat, že při splnění Nyquistovy podmínky vzorkování, předpokladu frekvenčního omezení vzorkovaného signálu a předpokladu, že perioda vzorkovaného signálu je celistvým násobkem vzorkovací frekvence, bude diskrétní frekvenční spektrum obsahovat konečný počet hodnot a vypočtené hodnoty budou určeny přesně. V praxi však nebývá dodržena zejména poslední podmínka, jelikož u složitých signálů je prakticky nemožné zvolit takový časový úsek vzorkování, který by odpovídal celistvému násobku periody všech harmonických složek signálu. V důsledku toho dochází k nežádoucímu zkreslení frekvenčního spektra zvanému prosakování (angl. *leakage*), při kterém dojde se snížení amplitudy určitých frekvencí a naopak ke zvýšení amplitudy frekvencí sousedních. Pro omezení tohoto jevu se používají časová okna, která snižují amplitudu časového signálu, zejména v blízkosti jeho okrajů. Okna jsou konstruována tak, aby zmírnila nespojitosti na okrajích časových vzorků a tím i nežádoucí projevy ve frekvenčním spektru. Běžně používanými okny jsou Hammingovo, Hannovo, Blackman-Harrisovo, trojúhelníkové, Gaussovské a další. Použití dat bez úpravy je obdobou aplikace obdélníkového okna – amplituda všech hodnot zůstává stejná.



Obr. 16 Běžně používaná časová okna.[34]

Frekvenční spektrum získané DFT má rozlišení dané rozestupem jednotlivých diskrétních hodnot podle vztahu

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} \quad [\text{Hz}] \quad (3.12)$$

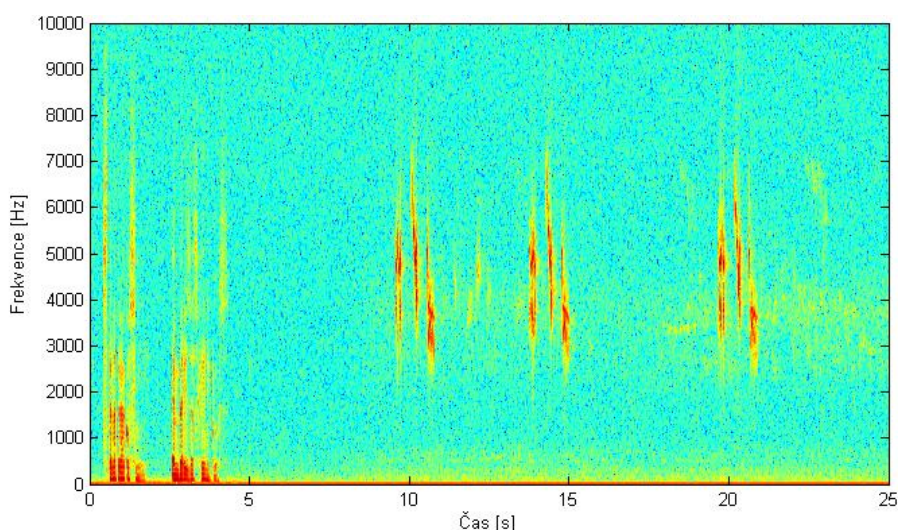
kde N je počet vzorků vstupního signálu DFT. Zvýšení rozlišení frekvenčního spektra je tedy možné docílit snížením vzorkovací frekvence, přičemž dojde ke snížení Nyquistovy frekvence, nebo zvýšením počtu vzorků, přičemž dojde k prodloužení měření. [1],[3]

Diskrétní Fourierovu transformaci je možné efektivně provést za pomoci několika algoritmů, které se souhrnně označují jako rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform, FFT). Zatímco výpočet DFT pomocí definičního vztahu má časovou složitost třídy $O(n^2)$, algoritmy označované jako FFT mají časovou složitost pouze $O(n \log(n))$. Nejznámější z FFT algoritmů je Cooleyho-Tukeyho algoritmus, který pracuje rekurzivní metodou půlení intervalů.

Krátkodobá Fourierova transformace

Jedním z předpokladů Fourierovy transformace je periodicitu vstupního signálu, tedy neměnnost parametrů signálu za celý vzorkovací čas. Pokud je výpočet diskrétní Fourierovy transformace aplikován na signál, který v průběhu vzorkování mění své parametry, dojde jednak k efektu zkreslení frekvenčních složek, a také ke ztrátě informace o změnách, které v průběhu vzorkování v signálu nastaly. Tento nedostatek je možné částečně odstranit rozdělením vzorkovacího intervalu na několik kratších intervalů a výpočtu DFT pro každý interval zvlášť. Tuto metodu nazýváme krátkodobou Fourierovou transformací (*Short Time Fourier Transform*, STFT). [1],[3]

Pro výběr intervalů se využívají časová okna popsána v předchozí kapitole, přičemž v tomto případě nemají okna šířku celého vzorkovacího času, ale jen intervalu vybrané šířky. Časové okno se posunuje (obvykle s překrýváním) tak, aby postupně byl pokryt celý vzorkovací čas. Běžně používanými okny jsou Hannovo a Kaiserovo. Výsledkem STFT je množina frekvenčních spekter, kterou je možné vykreslit do grafu zvaného spektrogram. Ten se obvykle zobrazuje jako dvourozměrný graf, přičemž amplituda frekvenčních složek je vyjádřena barevnou škálou. Lze jej také zobrazit jako trojrozměrný graf, kde amplituda odpovídá výšce v ose z . Tento typ grafu se v anglické literatuře označuje také jako *waterfall graph*.



Obr. 17 Spektrogram zvukového záznamu.

Obdobně jako u běžné DFT lze zvýšit rozlišení na frekvenční ose zvýšením počtu vzorků použitých pro výpočet jednoho frekvenčního spektra. Pokud ale pracujeme s naměřenými daty, obsahujícími určitý počet vzorků, dojde současně ke snížení počtu intervalů, pro něž lze DFT provést, což má za následek snížení rozlišení na časové ose. Lze dokázat, že součin rozlišení na časové a frekvenční ose je konstantní, proto je třeba vždy volit takovou šířku časového okna, aby počet vzorků v jednom intervalu zajišťoval přijatelné rozlišení jak na časové, tak i frekvenční ose.

3.1.3 Další analytické přístupy

Kepstrální analýza

Pojem kepstrum zahrnuje několik funkcí založených na Fourierově transformaci logaritmu frekvenčního spektra. Nejstarší definice kepstra je tzv. výkonové kepstrum definované podle vztahu

$$C_p(\tau) = |F\{\log|F\{f(t)\}|^2\}|^2 \quad [\tau] \quad (3.13)$$

V technické diagnostice se však nejvíce uplatňuje reálné kepstrum definované vztahem

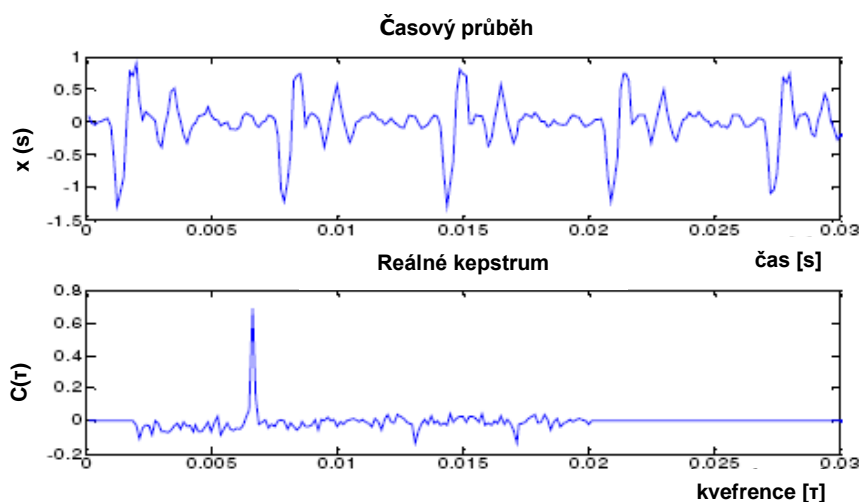
$$C(\tau) = F^{-1}\{\log|F\{f(t)\}|^2\} \quad [\tau] \quad (3.14)$$

Tento vztah je možné upravit do tvaru

$$C(\tau) = F\{\log S(f)\} \quad [\tau] \quad (3.15)$$

kde $S(f)$ je výkonová spektrální hustota.

Výsledkem výpočtu kepstra je funkce, jejíž charakteristická veličina se nazývá kvefrence. Jednotlivé kvefrenční složky se pak nazývají rahmonické. [1] Na *Obr. 18* níže je signál a jeho reálné kepstrum, obsahující jednu výraznou rahmonickou.



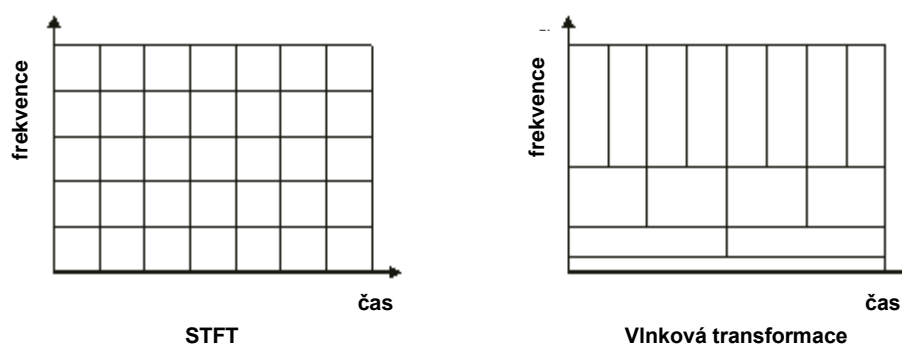
Obr. 18 Signál a jeho reálné kepstrum.[35]

Kepstrální analýzu lze užít pro detekci opakovaných vzorů ve spektru, které ze samotného spektra nejsou patrné. Jedná se zejména o skupiny harmonických frekvencí, které se ve frekvenčním spektru mohou překrývat. Kepstrální analýza se používá zejména v oblasti diagnostiky převodovek, zjišťování vad ložisek a také v oblasti analýzy řeči.

Analýza pomocí vlnkové transformace

Vlnková transformace je prostředkem pro časově-frekvenční popis signálu. Pro účely analýzy číslicových signálů má význam především diskrétní vlnková transformace (*Discrete wavelet transform, DWT*).

Výsledek diskrétní vlnkové transformace vyjadřuje podobnou informaci jako výsledek STFT, avšak odstraňuje některé její nedostatky. Nedostatkem STFT je především konstantní časové a frekvenční rozlišení napříč celou oblastí grafu. To je velmi nevýhodné, protože v oblasti nižších frekvencí je často zapotřebí vyššího frekvenčního rozlišení a v oblasti vysokých frekvencí naopak postačuje rozlišení menší. Vlnková transformace pracuje s časově-frekvenčním oknem proměnné šířky tak, aby bylo dosaženo vhodného rozlišení v celém rozsahu frekvencí. Srovnání časově-frekvenčních oken STFT a DWT je patrný z *Obr. 19*. Další výhodou oproti STFT je existence rychlých algoritmů pro výpočet DWT, které mají časovou složitost pouze $O(n)$. Výsledek vlnkové transformace (někdy nazývaný škálogram) je však méně názorný a obtížněji analyzovatelný, než běžný spektrogram. [1],[3]



Obr. 19 Srovnání STFT a vlnkové transformace.[36]

3.1.4 Softwarové nástroje

Pro praktické provedení analýzy vibrací jsou zapotřebí softwarové nástroje, které implementují metody analýzy popsané v předchozích kapitolách. Vývoj analytického softwaru je možné realizovat v obecných vývojových prostředích, ve speciálních vývojových prostředích a také je možné využít komerčně nabízených softwarových produktů.

Vývoj v obecných programovacích prostředích (např. pro jazyky C, C++, Java, Python) je nejnáročnější na čas i schopnosti vývojáře. Jeho výhodou však je maximální míra znalosti o činnosti výsledného softwaru, možnost maximálního přizpůsobení danému účelu, možnost provádět v softwaru libovolné změny a potenciální úspora prostředků za licence ke komerčním produktům.

Vývoj ve speciálních programových prostředích je charakterizován použitím velkého množství předpřipravených funkcí, které jsou integrovány ve vývojovém prostředí, nebo do něj mohou být přidány v podobě sad funkcí (tzv. toolboxů). Každý toolbox obsahuje paletu funkcí, které slouží k řešení úloh v určité oblasti. Příkladem speciálního vývojového prostředí, které je možné využít pro analýzu vibrací je MATLAB se sadou funkcí Signal Processing Toolbox, který obsahuje nástroje pro předzpracování měřeného signálu, jeho analýzu v časové a frekvenční oblasti a další nástroje. Pro analýzu pomocí vlnkové transformace je možné využít Wavelet Toolbox. Dalším vývojovým prostředím vhodným pro analýzu vibrací je LabVIEW, které již ve své základní konfiguraci obsahuje sadu funkcí pro generování a analýzu signálů.

Kromě této základní sady byl vytvořen speciálně pro účely analýzy vibrací a zvuku Sound and Vibration Toolbox. Tento toolbox poskytuje paletu funkcí, jejímž základem jsou většinou běžné funkce obsažené v základní konfiguraci LabVIEW, avšak jako celek tvoří sadu nástrojů přizpůsobenou pro analýzu vibrací a zvuku. Tato sada funkcí umožňuje další zkrácení času na vývoj a snížení nároků na vývojáře.

Vývoj ve speciálních programových prostředích je charakterizován nižšími nároky na čas a znalosti vývojáře v porovnání s obecnými prostředími, ovšem přináší nevýhody v podobě nižší kontroly nad činností předpřipravených funkcí a také náklady na licence k samotnému vývojovému prostředí i toolboxům.

Poslední možností je využití již hotového softwaru pro analýzu vibrací, nebo obecně analýzu signálů. Příkladem firmy, která ke svým produktům z oblasti měření vibrací dodává také software, je firma Brüel and Kjaer, která nabízí software pro analýzu měřených signálů v časové a frekvenční oblasti, keprstrální analýzu i vibrační diagnostiku. Výhodou tohoto řešení jsou nulové náklady na vývoj, nevýhodou je nižší přehled o funkci softwaru, nemožnost přizpůsobení a také značné pořizovací náklady.

3.2 Vibrodiagnostika

3.2.1 Základní diagnostické přístupy

Technická diagnostika se zabývá bezdemontážním a nedestruktivním zjišťováním technického stavu stroje, jehož účelem diagnostiky je zjištění poruchy strojní součásti a její lokalizace. Diagnostika strojů úzce souvisí s jejich údržbou. Historicky nejstarším přístupem údržby byla údržba po poruše, která s sebou přinášela nevýhody dlouhých odstávek strojů kvůli poruše a vysokých nákladů na opravy. Později se v souvislosti s predikcí živostnosti jednotlivých součástí prosadil přístup preventivní údržby dle časového plánu, při kterém byly součásti na konci své teoretické životnosti měněny, aniž by se zjišťoval jejich skutečný technický stav. I tento přístup s sebou nesl zvýšené náklady, v tomto případě na náhradní díly. V moderní diagnostice se nejvíce uplatňuje přístup prediktivní, při kterém údržba strojního objektu probíhá podle skutečného technického stavu, zjištěného diagnostickými metodami. Při tomto přístupu lze předcházet poruchám stroje a tím šetřit náklady vyplývající z odstávek stroje, a zároveň nedochází ke zbytečné výměně provozuschopných součástí. Tento přístup s sebou však přináší vysoké pořizovací náklady na diagnostické prostředky a jejich provoz. [1],[28]

Diagnostické přístupy je možné rozdělit na on-line (prováděné v reálném čase) a off-line (prováděné s časovým odstupem). On-line diagnostické systémy provádí v periodických intervalech měření diagnosticky významných veličin stroje a jejich vyhodnocování. Při vyhodnocování je možné s výhodou využít automatických systémů založených na prostředcích umělé inteligence, jako jsou expertní systémy. U off-line diagnostických systémů jsou data nejprve naměřena a s časovým odstupem vyhodnocena, dochází tedy k prodlevě mezi měřením a zjištěním technického stavu. Toto zpoždění s sebou přináší riziko pozdního odhalení blížící se poruchy, avšak náklady na off-line diagnostické přístupy jsou zpravidla nižší.

V moderních přístupech prediktivní údržby se uplatňují především tyto diagnostické obory: [28]

- Vibrodiagnostika
- Akustická (hluková) diagnostika
- Termodiagnostika
- Tribodiagnostika
- Elektrodiagnostika

Vibrodiagnostika se uplatňuje především u strojních objektů obsahujících rotující součásti. Prostředky vibrodiagnostiky jsou podobné, jako prostředky hlukové diagnostiky, neboť hluk je jen projevem mechanických vibrací stroje. Vibrodiagnostika i hluková diagnostika využívá prostředků pro měření a analýzu dat, popsanych v předchozích kapitolách. Pro vyhodnocení výsledků analýzy z hlediska technického stavu částí strojů je navíc zapotřebí empirických znalostí v podobě charakteristických projevů rotujících částí strojů a jejich závad.

3.2.2 Závady částí strojů a jejich projevy

Nejobecnější informace o stavu stroje poskytuje měření celkových vibrací stroje podle normy ČSN ISO 10816. Při tomto měření se vyhodnocuje efektivní hodnota rychlosti vibrací, jedná se tedy o měření v časové oblasti. Podle celkových vibrací stroje lze ve srovnání s vibracemi v bezporuchovém stavu usuzovat na celkový technický stav stroje a jeho provozuschopnost. Tento druh měření však není schopen lokalizovat poruchu, proto se používá jen pro orientační zjištění technického stavu.

Pro zjištění a lokalizaci konkrétní poruchy je zapotřebí z měřeného signálu oddělit složky pocházející z vibrací z různých částí stroje. Toto se provádí za pomoci frekvenční analýzy realizované za pomoci algoritmů FFT, případně v časově-frekvenční oblasti za pomoci algoritmů STFT. Pro účely analýzy je možné využít amplitudové, fázové i výkonové spektrum, základní údaje o frekvenčních složkách signálu však plynou z amplitudového spektra. Amplitudové spektrum lze rozdělit na několik oblastí podle charakteristických projevů určitých strojních součástí. Jsou to oblasti

- a) nízkých frekvencí,
kde se projevují především nevyváženosti a jiné závady hřídelů,
- b) středních frekvencí,
kde se projevují především ozubená kola a jejich závady,
- c) vysokých frekvencí,
kde se projevují především závady ložisek.

U hřídelů lze z frekvenčního spektra detekovat nevyváženost, která je zpravidla dynamická, a projevuje se vibracemi na frekvenci odpovídající otáčkám hřídele a dvojnásobku této frekvence. Úhlová nesouosost spojených hřídelů se projeví zvýšením amplitudy vibrací na otáčkové frekvenci a dalších harmonických, u paralelní nesouososti je zvýšení amplitudy nejvíce patrné u druhé harmonické frekvence. Prohnutí hřídele se projevuje zvýšením amplitudy na otáčkové frekvenci a jejím dvojnásobku. Trhlina v hřídeli je detekovatelná za pomoci fázového spektra při rozběhu nebo doběhu, za pomoci srovnání s fázovým spektrem v bezporuchovém stavu. [1]

U ozubených kol lze z frekvenčního spektra patrná zubová frekvence daná vztahem

$$f_z = f_1 z_1 = f_2 z_2 \quad [\text{Hz}] \quad (3.16)$$

kde f_1, f_2 jsou frekvence otáčení ozubených kol a z_1, z_2 jsou počty zubu příslušného kola. Zubová frekvence je patrná i u nově vyrobených ozubených soukolí bez závad. Kromě základní frekvence jsou ve frekvenčním spektru patrné také vyšší harmonické frekvence s bočními pásmy. U soukolí bez poškození je dominantní první harmonická frekvence, při narůstajícím opotřebení boku zubů dochází k nárůstu amplitudy u druhé a třetí harmonické frekvence a jejich bočních pásmech. Odchytky v úhlu svíraném osami hřídelů ozubených kol se projeví nárůstem druhé harmonické frekvence a různou výškou pravého a levého bočního pásma. Dominantní druhá harmonická frekvence může indikovat axiální vůli ozubeného kola na hřídeli. Vyštípnutí zubu se projeví periodickými změnami ve frekvenčním spektru, pro jejichž detekci se používá kempstrální analýza. [1]

Ložiska již z výroby obsahují drobné nedokonalosti tvarů styčných ploch, které způsobují vibrace o velmi vysokých frekvencích a které způsobují akustické projevy ložiska. Tyto vibrace o malé amplitudě a vysoké frekvenci jsou detekovatelné pouze za pomoci speciálních diagnostických metod. Projevy makroskopického poškození jednotlivých částí ložiska, které spadají do oblasti vysokých frekvencí, jsou zpočátku maskovány jinými frekvenčními složkami (např. vyššími harmonickými frekvencemi od ozubených kol). V pokročilém stádiu poškození jsou pak ve frekvenčním spektru patrné frekvenční složky, které odpovídají následujícím závadám částí ložiska:

Závada na vnějším kroužku

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d_{ve}}{d_r} \cos \beta \right) \quad [\text{Hz}] \quad (3.17)$$

Závada na vnitřním kroužku

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{ve}}{d_r} \cos \beta \right) \quad [\text{Hz}] \quad (3.18)$$

Závada na kleci

$$f = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{ve}}{d_r} \cos \beta \right) \quad [\text{Hz}] \quad (3.19)$$

Závada valivého elementu

$$f = \frac{d_r}{2d_{ve}} f_r \left[1 - \left(\frac{d_{ve}}{d_r} \cos \beta \right)^2 \right] \quad [\text{Hz}] \quad (3.20)$$

kde d_r je roztečný průměr valivých elementů, d_{ve} je průměr valivého elementu, n je počet valivých elementů, f_r je relativní frekvence otáčení kroužků a β je úhel styku valivých elementů. [1]

Kromě rotujících částí strojů existují také jiné zdroje vibrací, jako například mechanické vůle, nebo víření provozních kapalin stroje. Mechanické vůle se projevují vibracemi o frekvenci několikanásobku otáčkové frekvence hřídele nebo jejich subharmonických frekvencí. Víření oleje v kluzném ložisku je zdrojem vibrací o frekvenci odpovídající 0,4- až 0,48-násobku otáčkové frekvence hřídele. [1],[29]

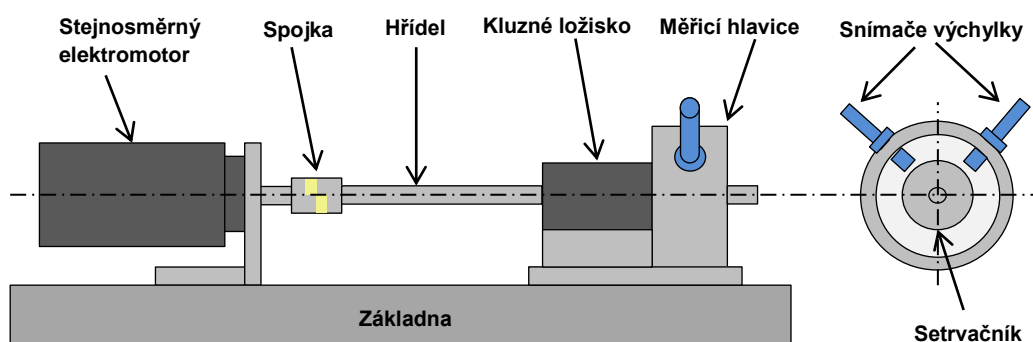
4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Měření pohybu hřídele

Cílem měření pohybu hřídele je stanovení dynamických účinků rotačního pohybu na polohu hřídele vůči ostatním částem stroje, zejména vůči ložisku. Vyhodnocována je změna polohy hřídele vůči poloze za klidového stavu. Pohyb hřídele je možné rozložit do dvou složek, a to složky stejnosměrné (DC) a střídavé (AC). Zdrojem střídavé složky je především házení hřídele způsobené tvarovými nedokonalostmi a z nich plynoucími nevyváhami. Stejnosměrná složka je dána posuvem přibližného středu hřídele. Tento posuv je významný zejména u hydrodynamicky mazaných kluzných ložisek.

4.1.1 Uspořádání měření

Měření bylo provedeno na laboratorním přípravku, jehož schéma je na *Obr. 20*.



Obr. 20 Schéma měření pohybu hřídele.

Pro pohon hřídele byl použit stejnosměrný motor Maxon RE36, vybavený absolutním rotačním enkodérem, ke kterému byla přes spojku připojena hřídel o průměru 10 mm, na druhém konci uložená v kluzném ložisku. Za ložiskem byla umístěna měřicí hlavice se snímači polohy. Pro ovládání motoru byl použit výkonový modul, ovládaný systémem CompactRIO za pomoci vstupně-výstupní karty NI 9401. Použitými snímači byly 2 indukčnostní snímače polohy typu IWRM08 v konfiguraci I9501/S35. Jejich parametry jsou uvedeny v *Tab. 4-1*. Jelikož musí být snímána plocha mnohem větší, než je aktivní plocha snímače (v tomto případě o průměru 8 mm), byl měřený konec hřídele opatřen setrvačnickem o průměru 30 mm, jehož povrch byl snímán.

Měřicí rozsah [mm]	0 až 2
Rozlišení – statické [mm]	0,001
– dynamické [mm]	0,005
Linearita [mm]	±0,1
Teplotní drift [%]	±5
Výstupní signál [mA]	0 až 10
Napájecí napětí [V]	15 až 30
Max. proudový odběr [mA]	35
Vnější rozměry [mm]	8×8×46

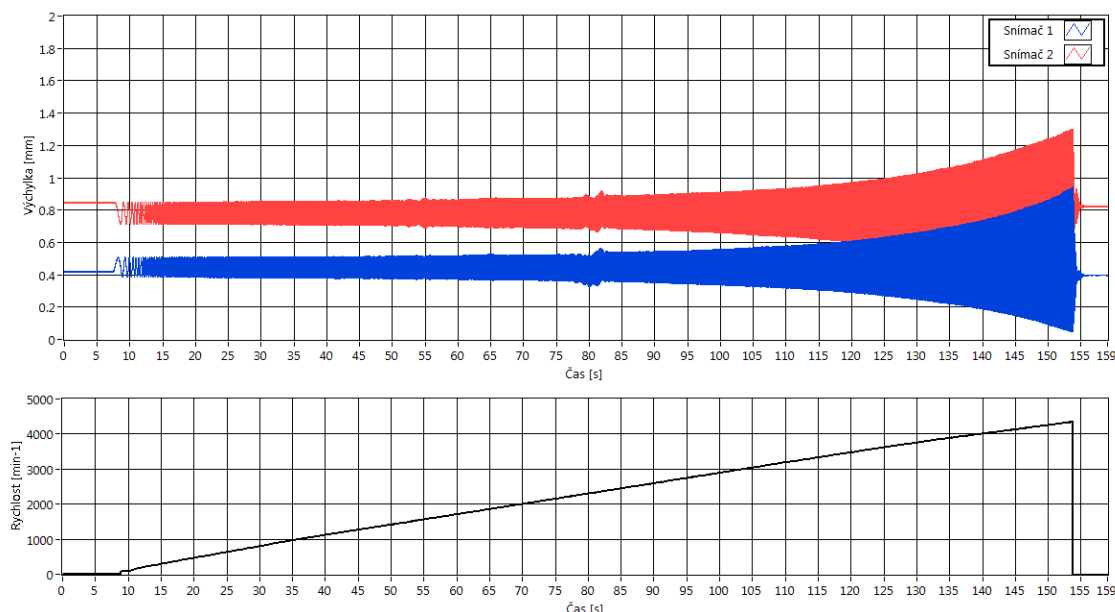
Tab. 4-1 Parametry snímače IWRM08 I9501/S35.[30]

Pro sběr dat ze snímačů polohy byla použita měřicí karta NI 9203, která byla opatřena DPS s konektory pro připojení snímačů. Tato měřicí karta disponuje 8 analogovými vstupy pro proud do ± 20 mA s rozlišením 16 bitů. Maximální vzorkovací frekvence je 200 kS/s, přičemž mezi vstupy je postupně přepínáno. Časová prodleva mezi pořizem vzorků z jednotlivých snímačů je však natolik malá, že při maximální předpokládané rychlosti otáčení (4000 ot/min) dojde pouze k zanedbatelnému úhlovému posuvu v řádu desetin úhlového stupně. Současně se záznamem polohy probíhal také záznam okamžitého natočení hřídele, pro který byl použit absolutní rotační enkodér integrovaný ve stejnosměrném motoru. Tento enkodér disponuje 12-bitovým rozlišením, tedy 4098 díly na otáčku.

Pro účely analýzy pohybu hřídele bylo provedeno nejprve měření při nízkých otáčkách (~ 100 ot/min), jehož účelem bylo stanovení radiálního házení hřídele, bez dynamických účinků. Poté byla provedena měření při zvyšujících se otáčkách a to od 0 do ~ 4000 ot/min, po jednom průběhu pro každý směr otáčení. Náběh rychlost trval při každém měření přibližně 150 s. Pro účely zjišťování rychlosti otáčení byla data z enkodéru přepočítána na otáčky za minutu.

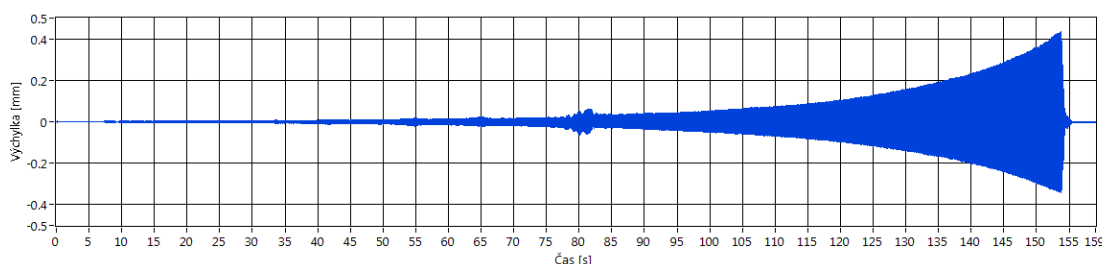
4.1.2 Analýza měření

Výsledný signál obsahuje dva průběhy výchylky, které leží v rozsahu použitých snímačů. Mezi průběhy pro kladný a záporný směr otáčení nebyl zjištěn významný rozdíl, proto jsou představeny pouze výsledky pro kladný směr.



Obr. 21 Průběhy výchylky a rychlosti.

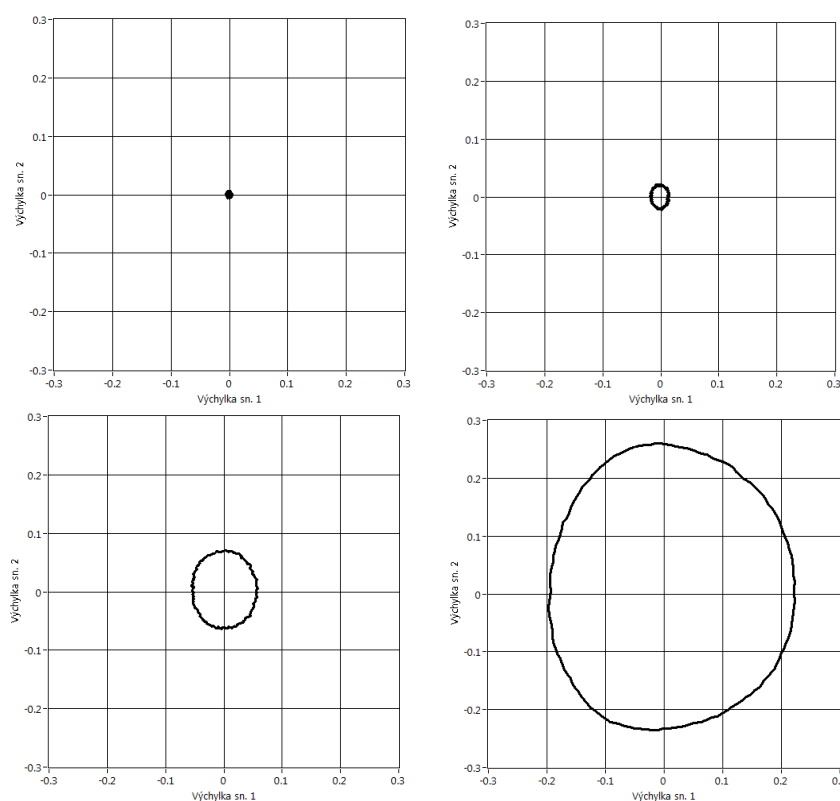
Pro účely analýzy pohybu hřídele je nejprve nutné tyto signály posunout do nulového bodu, který představuje střed hřídele v klidovém stavu. Proto byl v oblasti nízkých otáček proveden výpočet střední hodnoty výchylky, který byl poté od celého průběhu výchylky odečten. Takto získaný signál stále není vhodný pro analýzu, protože obsahuje složku, která přísluší statickému házení hřídele. Zde bylo využito informace z absolutního enkodéru, pomocí které byla určena výchylka polohy při nízkých otáčkách v závislosti na natočení hřídele. Pro každý časový úsek měřeného signálu pak bylo zjištěno natočení hřídele a od signálu byla odečtena příslušná hodnota házení. Výsledný signál obsahuje pouze dynamické účinky otáčení hřídele a je vhodný pro analýzu (Obr. 22).



Obr. 22 Korigovaný průběh výchylky ze snímače 1.

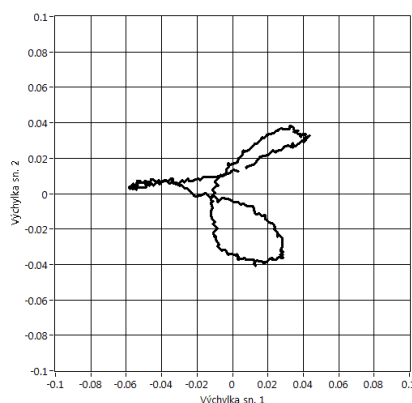
Z průběhu výchylky si lze všimnout faktu, že výchylka má přibližně parabolický průběh. To je v souladu s teoretickými poznatky, neboť výchylka je úměrná reakční síle na dostředivou sílu působící na nevyváženy hřídele, přičemž dostředivá síla je úměrná kvadrátu úhlové rychlosti. Křivku maximální amplitudy výchylky narušuje pouze oblast okolo 2300 ot/min, kde frekvence otáčení dosáhla rezonanční frekvence některé části měřicího přípravku, v důsledku čehož došlo k nestabilitě výchylky.

Orbity pohybu hřídele mají při většině rychlostí přibližně kruhový průběh, což znamená, že v pohybu jsou dominantní pouze základní otáčkové frekvence. Výchylka při rychlostech do cca. 1000 ot/min je velmi malá a odchylky způsobené dynamickými účinky jsou na hranici rozlišení snímače. Velikostní porovnání orbit při rychlostech 1000, 2000, 3000 a 4000 ot/min je na Obr. 23.



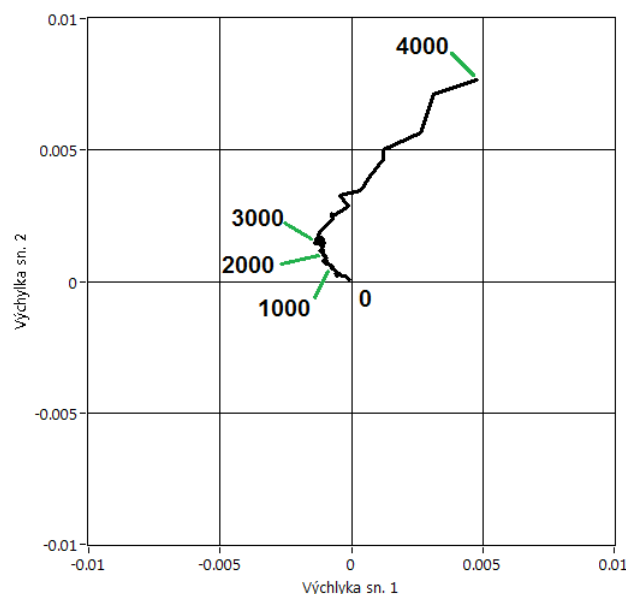
Obr. 23 Porovnání velikosti orbit.

Při rychlosti kolem 2300 ot/min dochází k rezonanci, při které se v průběhu výchylky objevují frekvence vyšší, než je frekvence odpovídající otáčkám. Přítomnost těchto frekvencí se projeví „zauzlováním“ orbity, tedy křížením průběhu v rámci jedné otáčky.



Obr. 24 Orbita při 2300 ot/min.

Posledním typem grafu pro analýzu pohybu hřídele je graf výchylky středu hřídele (angl. *Shaft Centerline Plot*). Na rozdíl od orbit, které se stanovují pro jednu nebo několik málo otáček je graf výchylky středu hřídele výsledkem měření přes celý rozsah rychlostí. Jeden bod v tomto grafu odpovídá přibližnému středu hřídele při dané rychlosti, jedná se tedy v podstatě o graf středů orbit. Pro účely vytvoření grafu byl časový průběh rozdělen do intervalů odpovídajících času 2 s a pro každý interval byla spočtena střední hodnota výchylky. V nízkých rychlostech je střed hřídele v nulovém bodě, jelikož střední hodnota výchylky v nízkých otáčkách byla již odečtena při korekci středu otáčení. Graf výchylky středu hřídele pro 0 až 4000 ot/min je na Obr. 25. V grafu jsou vyznačeny polohy středu pro rychlosti 1000, 2000, 3000 a 4000 ot/min.



Obr. 25 Graf výchylky středu hřídele.

U grafu výchylky středu hřídele je nutné uvážit polohu snímačů a z toho plynoucí směr výchylky. V případě tohoto měření byly snímače umístěny pod úhlem $\pm 45^\circ$ od svislého směru, v souladu s Obr. 20. V grafu svislému směru odpovídá osa 1. a 3. kvadrantu, a vodorovnému směru osa 2. a 4. kvadrantu. Z grafu je patrné, že střed hřídele se při zrychlování z 0 do 3000 ot/min pohyboval přibližně ve vodorovném směru. Výchylka mezi 3000 a 4000 ot/min by odpovídala posuvu středu hřídele směrem dolů, zde se ovšem pravděpodobně jedná o vliv nelinearity snímače, který má nižší citlivost při malých výchylkách, dosahovaných při vysokých otáčkách, což způsobí zdánlivý posuv středu hřídele směrem k větším výchylkám. Za graf výchylky středu hřídele je tedy zřejmě možné považovat pouze první úsek do 3000 ot/min.

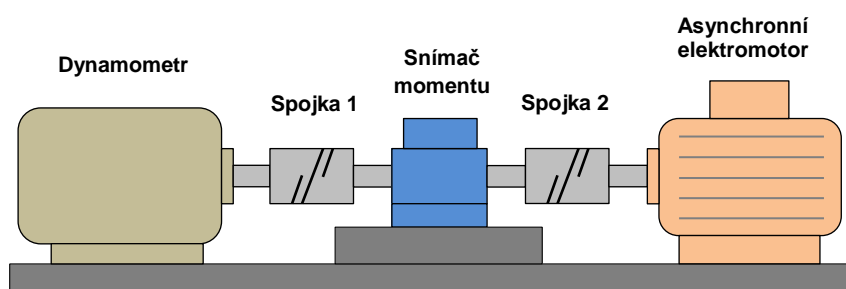
Při měření pohybu hřídele byla ověřena použitelnost jednotlivých součástí měřicího řetězce a možnosti analýzy tohoto druhu měření. Jako velmi užitečná se ukázala data z absolutního enkodéru, pomocí nichž bylo možné snadno provést korekci statického házení hřídele. Z amplitudy korigované výchylky jednotlivých snímačů je patrná kvadratická závislost výchylky na úhlové rychlosti. Tuto závislost je nutné zohlednit při volbě snímačů a návrhu měřicí aparatury, zejména s ohledem na dostatečný měřicí rozsah snímače a dostatečné vůle mezi snímačem a hřídelí. V tomto ohledu představuje nežádoucí jev rezonance, při které může dojít k nepředvídatelnému zvýšení amplitudy výchylky. Průběhu výchylky ze dvou snímačů je možné složit do jedné orbity, která svým tvarem vyjadřuje nejen maximální amplitudu výchylky, ale i její průběh, tedy frekvenční složky obsažené v průběhu výchylky. Pro měření průběhu středu hřídele je nutné zvolit takový snímač, který bude svým rozlišením a linearitou umožňovat zachycení tohoto průběhu bez nežádoucího zkreslení.

4.2 Měření krouticího momentu

Cílem měření krouticího momentu je zjištění průběhu dynamických účinků na rotující část stroje. Navzdory původnímu předpokladu nebylo možné měření uskutečnit na soustavě elektromotor-převodovka, ale bylo využito testovací stolice pro měření momentové charakteristiky elektromotoru, sestávající z asynchronního elektromotoru a dynamometru. Charakter měření je však u obou soustav stejný.

4.2.1 Uspořádání měření

Schéma měřené soustavy je uvedeno na Obr. 26. Snímač momentu byl umístěn mezi asynchronní elektromotor a dynamometr. Hřídele elektromotoru, snímače momentu a dynamometru byly spojeny pružnými spojkami, vyrovnávajícími nesouososti hřídelů. Elektromotor byl ovládán prostřednictvím frekvenčního měniče.



Obr. 26 Schéma soustavy pro měření momentu.

Použitým snímačem byl snímač TM310/011 od firmy Magtrol. Jedná se o snímač s převodem momentu na úhel pracující na indukčním principu. V tělese snímače je integrován také inkrementální snímač úhlové rychlosti se 60 dílky na otáčku. Přenos signálů z rotujících částí probíhá bezkontaktně. Součástí tohoto snímače je vyhodnocovací jednotka typu 3140, která zpracovává signál ze snímače a poskytuje standardní napěťový výstup pro moment a úhlovou rychlost. Parametry snímače a vyhodnocovací jednotky jsou uvedeny v Tab. 4-2.

Dynamický rozsah [Nm]	100
Rozsah otáček [ot·min ⁻¹]	1 až 10000
Linearita [%]	0,1
Výstupní signál – moment [V]	±10
– úhlová rychlost [V]	3,3
Napájecí napětí snímače [V]	20 až 32
Max. proudový odběr [mA]	100
Průměr hřídelů [mm]	20
Vnější rozměry [mm]	190×90×134

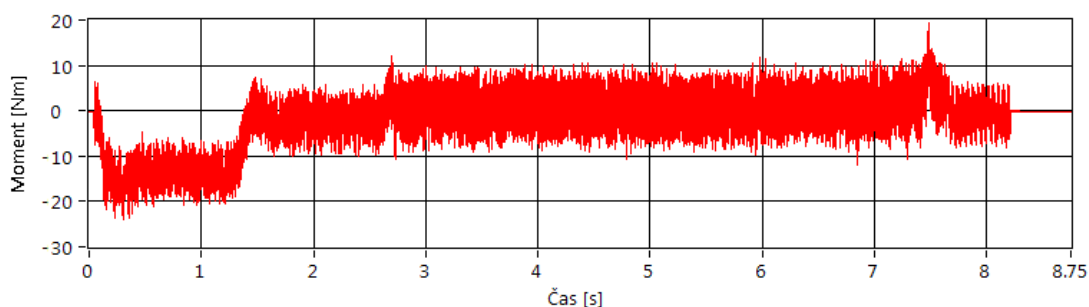
Tab. 4-2 Parametry snímače TM310/011 a jednotky 3140.[23]

Pro sběr dat bylo využito systému CompactDAQ, vybaveného měřicí kartou NI 9222, která disponuje 4 napěťovými analogovými vstupy s dynamickým rozsahem ±10V. Maximální vzorkovací frekvence je 500 kHz na kanál při rozlišení 16 bit. Pro měření bylo použito vzorkovací frekvence 100 kHz. Výstupy z vyhodnocovací jednotky snímače byly k měřicí kartě připojeny kroucenou dvojlinkou zakončenou BNC konektorem. Připojení systému k PC bylo provedeno přes sběrnici Ethernet.

Provedena byla měření rozběhu a doběhu motoru na jmenovité otáčky 3000 ot/min, a to v obou směrech otáčení. Tato měření se uskutečnila bez zátěže, tedy bez použití dynamometru. Dále byla provedena série měření při zatížení, kde byla sledována závislost momentu a otáček.

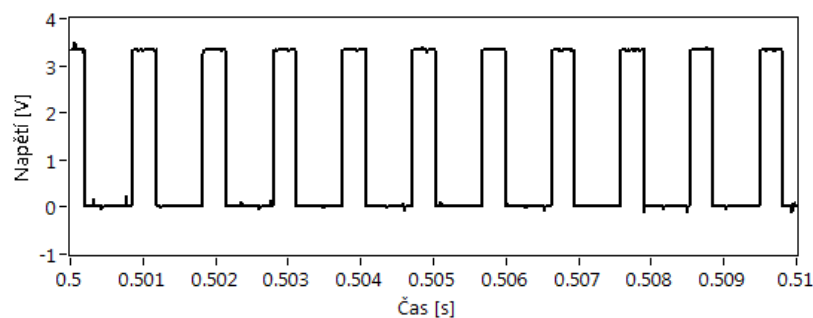
4.2.2 Analýza měření

Měřením byly získány průběhy krouticího momentu a úhlové rychlosti. Vzhledem k velkému elektromagnetickému rušení v okolí měřicího zařízení byl ve snímaném signálu přítomen značný šum (*Obr. 27*), který bylo nejprve nutné odstranit. Filtrace signálu byla provedena klouzavým průměrováním signálu přes 1000 vzorků, tedy čas 0,01 s.



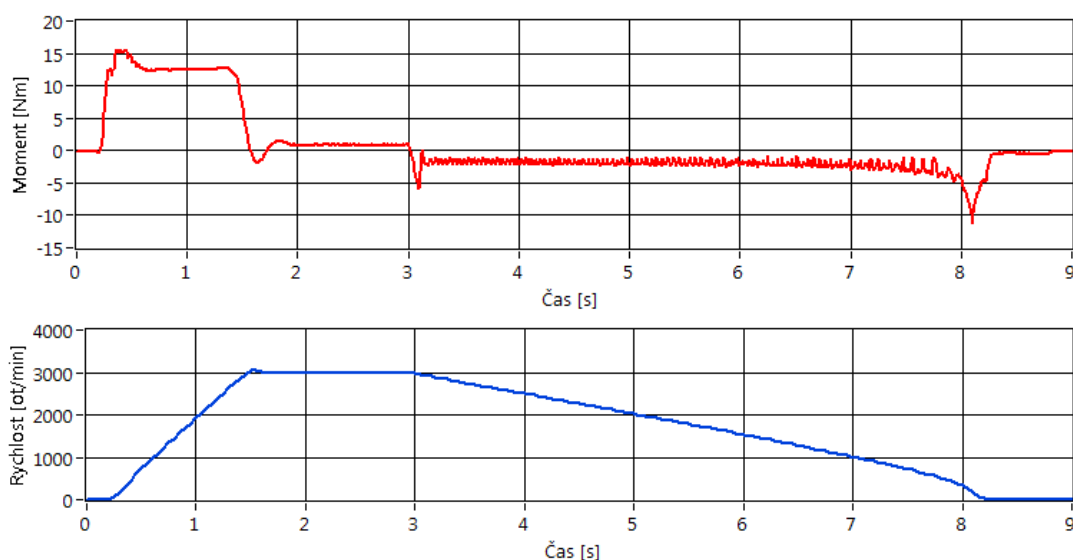
Obr. 27 Nefiltrovaný signál ze snímače momentu.

Signál ze snímače úhlové rychlosti má podobu impulzů o amplitudě 3,3 V se střídou přibližně 30% (*Obr. 28*). Tyto impulzy, zaznamenané v analogové podobě, bylo nutné převést do dvouhodnotové podoby a následně čítáním vzestupných hran určit počet impulzů za jednotku času, a tedy úhlovou rychlost hřídele. Pro určení úhlové rychlosti v jednom intervalu bylo použito 5000 vzorků, odpovídajících času 0,05 s.



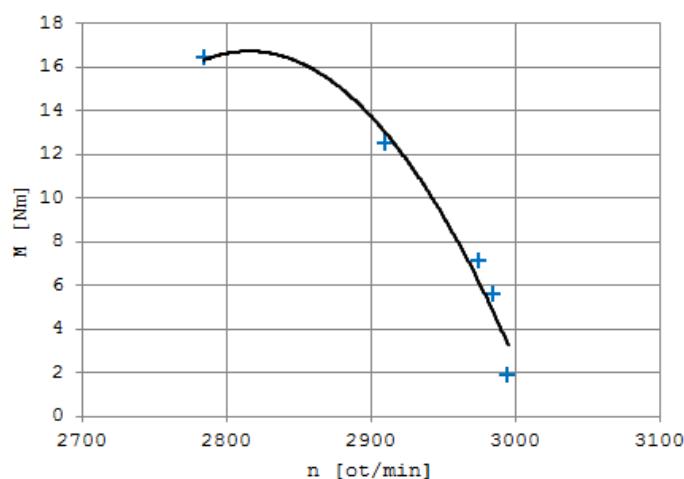
Obr. 28 Impulzní signál snímače úhlové rychlosti.

Po zpracování signálů z obou snímačů lze již vykreslit průběh momentu a úhlové rychlosti. Při měření rozběhu a doběhu elektromotoru v kladném směru otáčení je patrné, že moment je úměrný změně úhlové rychlosti, tedy úhlovému zrychlení. V první části se úhlová rychlost zvyšuje a moment je kladný. V další části s ustálenými otáčkami má moment nízkou kladnou hodnotu způsobenou odporem prostředí působícím na rotující soustavu. Poté následuje část snižování otáček, kde je moment záporný. Hodnota záporného momentu je ovšem velmi malá, jelikož použitý frekvenční měnič není schopen ve větší míře mařit energii rotujících částí. V celém průběhu se také projevují zásahy regulátoru frekvenčního měniče, způsobující záchvěvy v průběhu momentu. Obdobná průběh lze pozorovat při měření v záporném směru otáčení, jediným rozdílem jsou opačná znaménka momentu a úhlové rychlosti.



Obr. 29 Průběh momentu a úhlové rychlosti.

Dalším typem měření je měření při zatížení, kdy je pomocí dynamometru nastavováno zatížení a je sledován pokles otáček asynchronního motoru. Ze série těchto měření při různém momentu je možné vykreslit momentovou charakteristiku motoru. Z důvodu proudového omezení použitého frekvenčního měniče bylo možné vykreslit pouze část momentové charakteristiky s maximálním momentem přibližně 16 Nm.



Obr. 30. Část momentové charakteristiky.

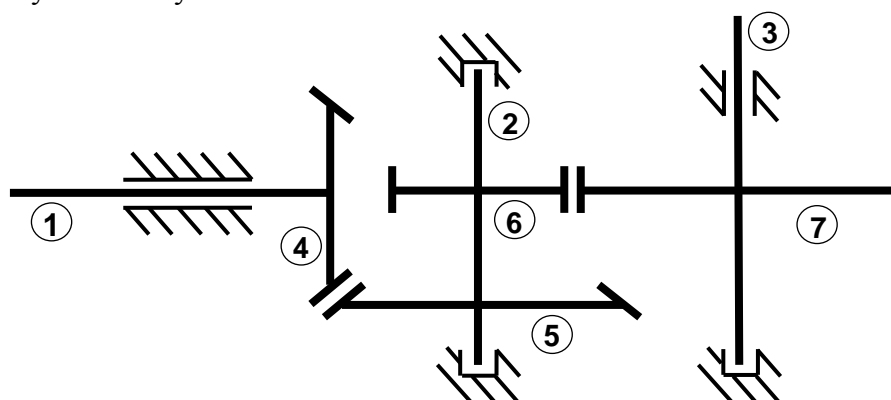
Při měření krouticího momentu bylo možné ověřit možnosti snímání dynamických vlastností rotujících částí strojů a současného snímání úhlové rychlosti. Byla ověřena možnost předzpracování signálů obsahujících šum a také možnost analogového snímání impulzních signálů. Pozorované nežádoucí rušení by bylo možné snížit použitím kabelů s lepším stíněním. Určité zjednodušení analýzy by také představovalo použití digitální měřicí karty pro měření impulzního výstupu ze snímače úhlové rychlosti. Celkově je však zvolený hardware vhodný pro dané měření a umožňoval by i měření většího rozsahu krouticího momentu a úhlové rychlosti. Omezení tak představoval především použitý frekvenční měnič, jehož proudové omezení využívalo pouze část použitelného rozsahu snímače momentu.

4.3 Měření vibrací

Následující měření popisuje stanovení vibrací strojní soustavy skládající se z asynchronního motoru a převodovky. Měření se uskutečnilo na zakázku výrobce převodovek a jeho cílem byla povýrobní kontrola kvality převodovky, zaměřená na rozdíly mezi převodovkou s normálními montážními vůlemi a zmenšenými vůlemi.

4.3.1 Uspořádání měření

Měřeným objektem byla převodovka pro trakční systémy vlaků a tramvají. Jedná se o dvoustupňovou převodovku s konstantním převodovým poměrem, jejíž schéma je na *Obr. 31*. Pro pohon byl použit asynchronní motor připojený na vstupní hřídel převodovky kardanovým hřídelem.



Obr. 31 Schéma převodovky.

Převodovka sestává ze vstupního hřídele (1), předlohového hřídele (2) a výstupního hřídele (3). Na hřídelích jsou umístěna čtyři ozubená kola tvořící dvě soukolí. Pastorek vstupního hřídele (4) a kolo předlohové hřídele (5) tvoří kuželové soukolí (soukolí 1), pastorek předlohové hřídele (6) a kolo výstupní hřídele (7) tvoří čelní soukolí (soukolí 2). Uložení vstupního hřídele zajišťuje jedno válečkové a dvě kuželíková ložiska, uložení předlohové a výstupní hřídele vždy dvě kuželíková ložiska. Nastavovanými vůlemi jsou axiální vůle v ložiskách.

Z počtu zubů jednotlivých ozubených kol lze spočítat převodové poměry

$$i_{1,2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{13}{35} = 0,371 \quad [-] \quad (4.1)$$

$$i_{3,4} = \frac{z_3}{z_4} = \frac{27}{61} = 0,443 \quad [-] \quad (4.2)$$

$$i_{celk} = i_{1,2} i_{3,4} = 0,371 \cdot 0,443 = 0,164 \quad [-] \quad (4.3)$$

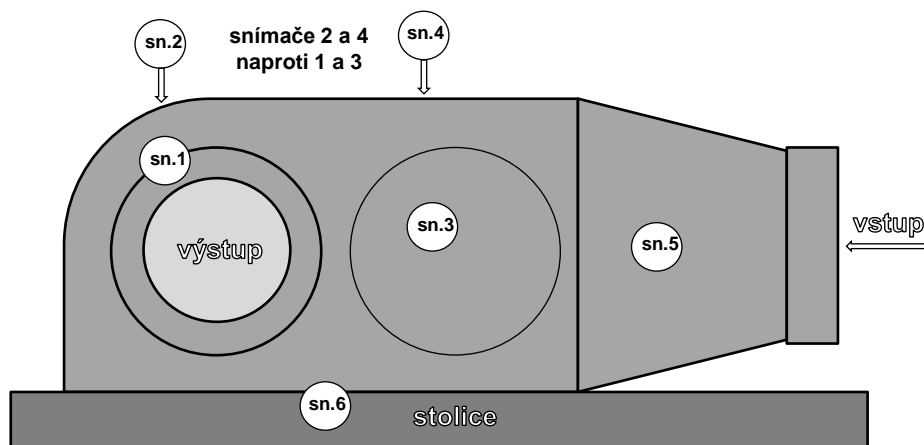
Získané převodové poměry se uplatní při analýze pro určení otáčkových a zubových frekvencí.

Pro měření vibrací byly využity snímače zrychlení. Pro účely vyhodnocení měření je nutné znát také otáčky stroje, které však nebyly měřeny přímo, ale pro jejich určení byly použity analytické přístupy aplikované na vibrační data. Použitými snímači zrychlení jsou piezoelektrické akcelerometry typu 352C33 od firmy PCB Piezotronics. Parametry snímače jsou uvedeny v *Tab 4-3*. Tento typ snímače je vhodný svým dynamickým i frekvenčním rozsahem, malou chybou linearit, vysokou citlivostí a integrovaným zesilovačem.

Dynamický rozsah [g]	50
Frekvenční rozsah [Hz]	0,5 až 10000
Rezonanční frekvence [Hz]	50000
Citlivost [$\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$]	100
Citlivost na příčné vibrace [%]	5
Linearita [%]	1
Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	-54 až 93
Hmotnost [kg]	0,0058

Tab. 4-3 Parametry snímače 352C33.[31]

Použito bylo celkem 6 kusů snímačů, jejichž rozmístění na převodovce ukazuje Obr. 32. Snímače 1 a 2 byly umístěny v blízkosti výstupní hřídele, snímač 3 v blízkosti soukolí předloha-výstup, snímač 4 v blízkosti soukolí vstup-předloha, snímač 5 v blízkosti vstupní hřídele a snímač 6 byl umístěn na měřicí stolici. Připevnění snímačů bylo provedeno přes šroubovací podložku, na kterou byla nanášena voskovitá adhezivní pasta.



Obr. 32 Rozmístění snímačů na převodovce.

Pro účely sběru dat bylo využito systému CompactRIO, vybaveném dvěma měřicími kartami NI 9234. Tyto měřicí karty disponují čtyřmi analogovými napěťovými vstupy s dynamickým rozsahem $\pm 5\text{V}$, rozlišením A/D převodníku 24 bitů a maximální vzorkovací frekvencí 51,2 kHz na kanál. Pro měření byla použita poloviční vzorkovací frekvence 21,6 kHz, která je vzhledem k předpokládanému frekvenčnímu rozsahu měření do 10 kHz dostačující. Připojení snímačů bylo provedeno pomocí koaxiálních kabelů s BNC konektory. Záznam je simultánní pro všechny kanály. Připojení systému CompactRIO k PC bylo provedeno přes sběrnici USB.

Byla provedena celkem čtyři měření:

- 1) převodovka s normálními vůlemi, kladný směr otáčení, dále jen měření 1
- 2) převodovka s normálními vůlemi, záporný směr otáčení, dále jen měření 2
- 3) převodovka se zmenšenými vůlemi, kladný směr otáčení, dále jen měření 3
- 4) převodovka se zmenšenými vůlemi, záporný směr otáčení, dále jen měření 4

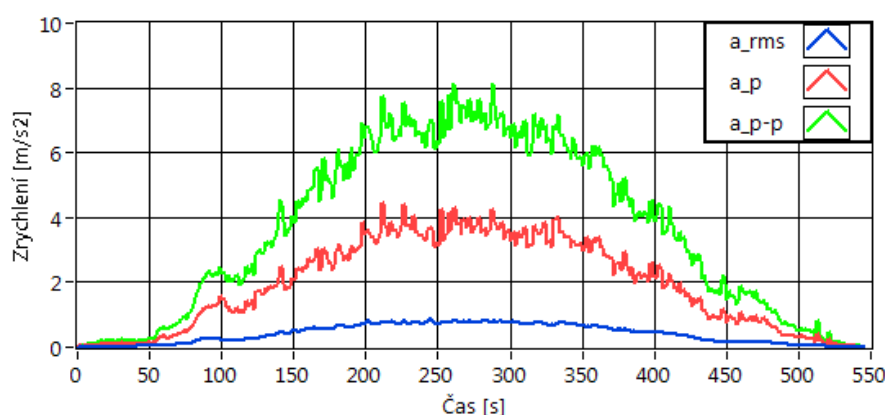
každé z měření mělo charakter rampy od nulových otáček do 4000 ot/min a zpět do nuly. Z měření lze tedy pozorovat vibrace převodovky při zrychlování a zpomalování, při kladném a záporném směru otáčení a při normálních a zmenšených vůlích. Všechna měření se uskutečnila bez zátěže na výstupu.

4.3.2 Analýza měření a vyhodnocení

Pro každé ze čtyř měření byly získány časové průběhy amplitudy zrychlení šesti snímačů, celkem tedy 24 průběhů. Každé měření trvalo přibližně 550 sekund, přičemž se skládalo ze třech částí – zrychlování (~240 s), výdrž na max. otáčkách (~50 s) a zpomalování (~240 s). Pro účely analýzy byl vytvořen software ve vývojovém prostředí LabVIEW.

Analýza v časové oblasti

Analýza měření byla provedena nejprve v časové oblasti, kde byla zjišťována efektivní hodnota zrychlení (a_{rms}), výkmit (a_p) a rozkmit (a_{p-p}). Průběh těchto hodnot pro měření 1 a snímač 2 je na *Obr. 28*. Je patrné, že efektivní hodnota zrychlení nepřesahuje 1 m/s^2 a výkmit 5 m/s^2 , což jsou poměrně nízké hodnoty, odpovídající tomu, že se jedná o povýrobní měření stroje bez závad.



Obr. 33 Ukazatele vibrací pro měření 1 snímač 2.

Důležité je však zejména srovnání mezi jednotlivými měřeními, tedy srovnání velikosti vibrací pro kladný a záporný směr otáčení a pro normální a zmenšené vůle. Pro účely srovnání byla vytvořena *Tab. 4-4*, která pro každé měření uvádí hodnoty a_{rms} , a_p a a_{p-p} pro časový interval odpovídající otáčkám 1000, 2000, 3000, 4000 ot/min, přičemž hodnoty 1000, 2000 a 3000 ot/min jsou uvedeny pro zrychlování i pro zpomalování. Hodnoty v tabulkách odpovídající měření 2, 3 a 4 jsou uvedeny relativně vzhledem k měření 1, jako procentuální změna hodnoty. Pro lepší názornost je změna vyjádřena barevnou škálou, kde zvýšení vibrací odpovídá červená barva a snížení zelená.

Z výsledků je patrné, že při záporném směru otáčení (měření 2) dochází ke zvýšení vibrací v oblasti nižších otáček a ke snížení vibrací v oblasti 2000-4000 ot/min. při zrychlování. Při porovnání výsledků měření 1 a 3 je patrné, že při zmenšených vůlích dochází ke snížení vibrací přibližně o 10% v celém rozsahu otáček. Nejnižší úroveň vibrací byla zjištěna u měření 4, a to o 22% (RMS) méně, než při měření 1. Zároveň je patrné, že při zmenšených vůlích došlo k omezení zvýšení vibrací v nízkých otáčkách. Zjištěné rozdíly ve velikosti vibrací mezi převodovkou s normálními a zmenšenými vůlemi jsou nezanedbatelné, avšak jejich velikost je poměrně malá, zvláště po přepočítání do logaritmických jednotek, kdy jednotlivé rozdíly dosahují maximálně pouze jednotek dB.

a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	n [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]						
	1000	2000	3000	4000	3000	2000	1000
Měření 1							
a_{rms}	0,12	0,39	0,68	0,76	0,60	0,32	0,12
a_p	0,60	1,88	3,09	3,49	2,83	1,61	0,63
a_{p-p}	1,07	3,37	6,18	6,68	5,55	2,93	1,10
Měření 2							
a_{rms}	0,50	0,05	-0,06	-0,04	-0,12	0,06	0,58
a_p	0,27	-0,14	-0,13	-0,15	0,04	0,02	0,22
a_{p-p}	0,23	-0,04	-0,20	-0,11	0,01	0,00	0,35
Měření 3							
a_{rms}	-0,08	0,03	-0,12	-0,08	-0,12	0,03	-0,25
a_p	-0,10	-0,06	-0,10	0,05	-0,16	-0,13	-0,05
a_{p-p}	-0,11	-0,01	-0,18	-0,01	-0,15	-0,10	0,01
Měření 4							
a_{rms}	0,25	-0,13	-0,22	-0,09	-0,12	0,03	0,25
a_p	-0,12	-0,30	-0,30	-0,09	-0,22	-0,14	-0,10
a_{p-p}	-0,06	-0,23	-0,31	-0,08	-0,21	-0,06	0,03

Tab. 4-4 Ukazatele vibrací v časové oblasti.

Analýza ve frekvenční oblasti

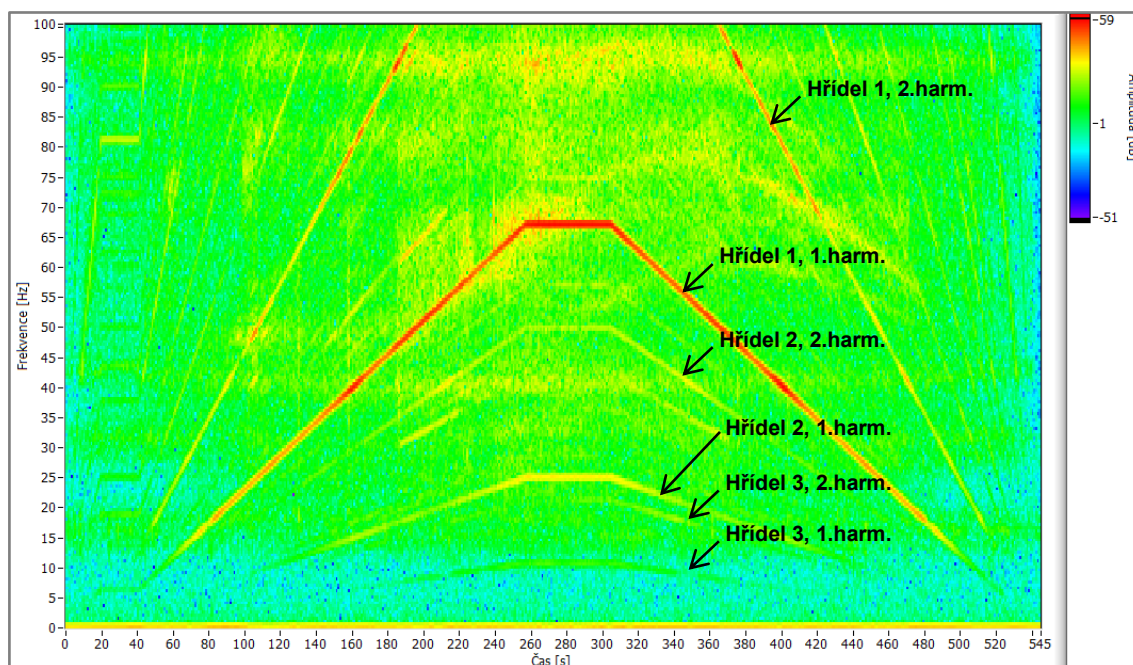
Pro účely frekvenční analýzy byla použita krátkodobá Fourierova transformace (STFT). Jednotlivá měření byla rozdělena na časová okna délky 2 s, na které bylo nejprve aplikováno Hannovo okno, a následně byla provedena diskretní Fourierova transformace. Překrývání časových oken bylo zvoleno 50%, v každém intervalu tedy došlo k posunutí o 1 s v čase. Výsledkem je dvourozměrný spektrogram, jehož vodorovná osa představuje čas a svislá osa frekvenci. Amplituda je znázorněna barevnou škálou v logaritmických jednotkách (dB), viz Obr. 34.

Pro účely analýzy ve frekvenční oblasti je zapotřebí nejprve určit předpokládané frekvence, na kterých se projevují vibrace z jednotlivých rotujících částí stroje. Jedná se především o frekvence odpovídající otáčkám hřídelů, zubové frekvence ozubených kol a jejich vyšší harmonické frekvence. Jelikož se jedná o měření nového stroje, nelze předpokládat, že by ve spektru byly viditelné projevy ložisek. S využitím vztahů 4.1 a 4.2 pro převodové poměry a vztahu 3.16 pro zubové frekvence lze sestavit tabulku předpokládaných základních frekvencí ve spektru pro určité otáčky stroje. Vyšší harmonické frekvence je možné obdržet vynásobením příslušné základní frekvence.

f [Hz] \ n [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	1000	2000	3000	4000	3000	2000	1000
Hřídel 1	16,7	33,3	50,0	66,7	50,0	33,3	16,7
Hřídel 2	6,2	12,4	18,6	24,8	18,6	12,4	6,2
Hřídel 3	2,7	5,5	8,2	11,0	8,2	5,5	2,7
Soukolí 1	216,7	433,3	650,0	866,7	650,0	433,3	216,7
Soukolí 2	167,1	334,3	501,4	668,6	501,4	334,3	167,1

Tab. 4-5 Předpokládané základní frekvence.

Z přítomnosti uvedených frekvencí ve spektru lze také zpětně odvodit otáčky stroje v daném časovém okamžiku. Toho bylo využito pro určování časových okamžiků ve spektrogramu, které odpovídají daným otáčkám. Otáčky vstupního hřídele se ve spektrogramu projeví na frekvenci $n/60$. Na Obr. 34 je nejvíce znatelná frekvenční průběh s maximální hodnotou 66,7 Hz odpovídající otáčkám vstupního hřídele 4000 ot/min. Identifikovat lze však i frekvenční průběhy odpovídající otáčkám hřídele 2 a 3 i jejich vyšší harmonické frekvence.



Obr. 34 Spektrogram pro měření 1 snímač 6, 0-100 Hz.

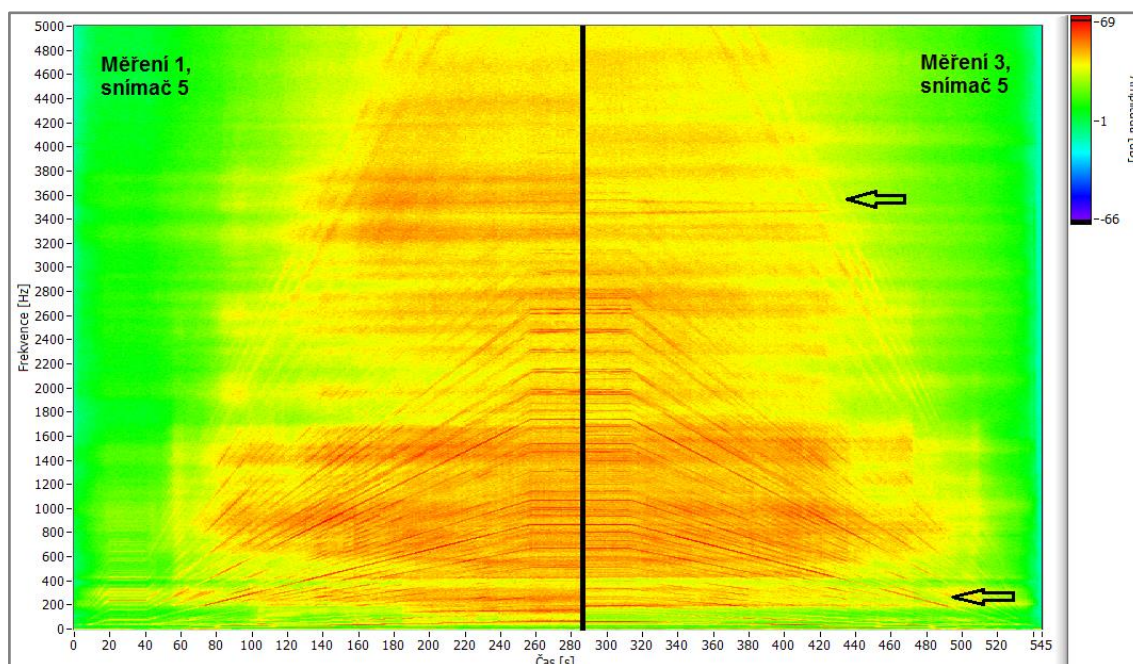
Při znalosti časového průběhu otáček lze pro dané frekvence zjistit jejich amplitudu při daných otáčkách. Pro porovnání všech měření byla sestavena Tab. 4-6, která uvádí amplitudy jednotlivých frekvenčních složek odpovídacích otáčkovým a zubovým frekvencím. Obdobně jako v případě Tab. 4-4 byly amplitudy zjištěny pro otáčky 1000, 2000, 3000 a 4000 ot/min, a to pro zrychlování i zpomalování. Výsledky pro měření 2, 3 a 4 jsou opět uvedeny relativně vzhledem k měření 1, jako rozdíl amplitudy v logaritmických jednotkách. Pro zjištění hodnot pro vstupní hřídel byl použit snímač 5, pro předlokový hřídel snímač 3, pro výstupní hřídel snímač 1, pro soukolí vstup-předloha snímač 4 a pro soukolí předloha-výstup snímač 3.

Z výsledků je patrné, že amplituda frekvenčních složek pro jednotlivá měření kolísá, což je způsobeno hlavně omezeným rozlišením spektrogramu, v důsledku kterého není možné vždy určit amplitudu s dostatečnou přesností. V žádném z měření však není patrné výrazné zvýšení nebo snížení amplitudy u některé skupiny frekvencí. Nízké amplitudy u měření 4, označené hvězdičkou, byly způsobeny ztrátou adheze snímače. Zmenšení montážních vůlí tedy nepřináší výrazné snížení amplitudy vibrací žádné z otáčkových nebo zubových frekvencí, nebo je toto snížení pod úroveň rozlišitelnosti daného způsobu měření. Obdobná situace je u vyšších harmonických frekvencí, kde také nepřevažuje snížení ani zvýšení amplitudy. Pro přesnější výsledky by bylo nutné zvýšit rozlišení spektrogramu pomalejším průběhem měření, tedy prodloužením času jednotlivých vzorků při stejném rozsahu otáček. Celkově je však tento výsledek očekávatelný, neboť zmenšení axiálních vůlí v ložiskách nemůže výrazným způsobem ovlivnit vibrace hřídelů a ozubených kol, které jsou dány zejména nevyvážkami hřídelů a tvarovými nedokonalostmi zubů ozubených kol.

a [dB]	n [ot·min ⁻¹]						
	1000	2000	3000	4000	3000	2000	1000
Měření 1							
Hřídel 1	26,6	48,43	48,38	60,01	49,95	47,77	27,65
Hřídel 2	-4,55	13,59	24,77	-4,43	22,79	11,74	-0,4
Hřídel 3	-0,91	-5,94	4,17	0,86	9,95	2,05	3,12
Soukolí 1	43,15	60,14	46,15	64,23	61,01	55,79	40,39
Soukolí 2	10,66	34,08	39,05	33,29	36,42	39,66	26,91
Měření 2							
Hřídel 1	-8,57	-2,85	-3,49	-13,64	-4,34	-1,23	-9,45
Hřídel 2	9,27	0,01	-1,88	6,65	-3,46	3,08	2,21
Hřídel 3	-1,82	11,14	1,78	0,81	-3,80	-9,73	-3,46
Soukolí 1	2,00	-8,51	14,80	-22,18	1,58	-2,10	6,23
Soukolí 2	4,36	-15,83	-1,97	13,71	2,31	-13,96	-3,96
Měření 3							
Hřídel 1	5,17	-4,99	-0,35	1,90	-2,46	-2,54	1,94
Hřídel 2	7,00	-8,51	-2,77	17,56	-0,65	-0,74	9,66
Hřídel 3	-3,30	-4,30	3,61	2,46	1,61	3,57	-7,48
Soukolí 1	0,13	-19,64	9,07	7,85	-8,08	-5,24	3,11
Soukolí 2	1,11	-4,67	-5,06	11,32	10,05	-1,91	-7,07
Měření 4							
Hřídel 1	-4,26	-3,66	-0,58	-3,07	-2,07	-2,23	-3,41
Hřídel 2	10,85	-6,37	-5,67	19,81	-2,21	1,10	6,17
Hřídel 3	-9,50	7,41	-4,05	-4,81	-5,85	-4,02	0,46
Soukolí 1	-8,04	-9,50	17,98	5,93	-32,69*	-35,40*	-7,57*
Soukolí 2	6,38	-18,74	-6,24	14,17	-19,76	-5,96	-11,49

Tab. 4-6 Amplitudy frekvenčních složek.

Pro odhalení původu změn vibrací pozorovaných v časové oblasti je nutné rozšířit oblast zájmu na celé spektrum a do vyšších frekvencí. V oblasti středně vysokých a vysokých otáček obsahuje frekvenční spektrum kromě spektrálních čar příslušejících otáčkovým a zubovým frekvencím také značné množství jiných frekvenčních složek, které ovšem nemají charakter ostře ohraničených čar, ale zabírají širší frekvenční pásmo. Tyto frekvenční složky tvoří jakési pozadí spektrálních čar a mohou mít i poměrně značnou amplitudu. Zatímco spektrální čary příslušející otáčkovým a zubovým frekvencím kopírují svým průběhem zvyšování otáček, popsané frekvenční složky mají přibližně konstantní frekvenci přes celý rozsah otáček. Zdrojem těchto frekvenčních složek mohou být mechanické vůle nebo víření oleje v převodovce. Při porovnání spektrogramů pro měření 1 a 3 (Obr. 35) lze dojít k závěru, že při snížených vůlích dochází ke snížení amplitudy frekvenčních složek v oblasti kolem 300 Hz a dále ve vysokých frekvencích kolem 3500 Hz (na obrázku označeny šipkami). Za předpokladu, že jedinou změnou při obou měření bylo pouze zmenšení axiálních vůlí v ložiskách, lze snížení amplitudy uvedených frekvenčních složek přisoudit právě zmenšením těchto vůlí. Zároveň je tím možné odůvodnit snížení efektivní hodnoty zrychlení a dalších ukazatelů, pozorované při analýze v časové oblasti.



Obr. 35 Spektrogram pro měření 1 a 3, 0-5000 Hz.

Vyhodnocení

Měřená převodovka vykazuje nízkou úroveň vibrací, odpovídající tomu, že se jednalo o povýrobní měření. Měření v kladném a záporném směru otáčení nevykazují výrazné odlišnosti, s výjimkou mírného zvýšení efektivní hodnoty vibrací v nízkých otáčkách při záporném směru otáčení. Z porovnání měření vibrací převodovky s normálními a sníženými vůlemi lze učinit závěr, že snížení axiálních vůlí v ložiscích přináší určité snížení vibrací. Změny se neprojeví změnou amplitudy frekvenčních složek příslušejících rotujícím částem, ale snížením amplitudy širokopásmových vibrací ve středně vysokých a vysokých otáčkách. Celkově lze snížení vibrací při snížení axiálních vůlí ložisek charakterizovat jako poměrně malé, odpovídající velikosti provedených změn. Zmenšení axiálních vůlí ložisek tedy lze doporučit, pokud tato změna nepřináší jiné nevýhody.

ZÁVĚR

Pro úspěšné měření veličin rotujících částí strojů je nutné především vhodně zvolit jednotlivé prvky měřicího řetězce. Největší pozornost zaslouží výběr snímače, který svými vlastnostmi musí vyhovovat zvolené aplikaci. Přehled snímačů v této práci představuje nepoužívanější typy pro jednotlivé druhy měření. V oblasti měření vibrací jsou využívány zejména piezoelektrické snímače zrychlení, využívající piezoelektrické elementy se stříhovým namáháním. Při měření výchylky se uplatňují indukčnostní a kapacitní snímače a při měření krouticího momentu snímače s převodem momentu na úhel, pracující na tenzometrickém nebo indukčním principu. Při volbě hardwaru pro sběr dat je nutné zohlednit parametry výstupního signálu použitého snímače, způsob připojení snímačů a také maximální frekvenci snímaného signálu, které je nutné přizpůsobit vzorkovací frekvenci měřicího zařízení. Analýzu měřených dat je možné provádět v časové a frekvenční oblasti, i pomocí dalších přístupů. V oblasti analýzy vibrací se uplatňuje především spektrální analýza založená na Fourierově transformaci. Využití krátkodobé Fourierovy transformace umožňuje analýzu v časově-frekvenční oblasti. Ve spojení s empirickými znalostmi o projevech závad rotujících částí strojů je možné provést diagnostiku strojního zařízení. Toho se využívá zejména v systémech prediktivní údržby strojů, které umožňují včasné odhalení zhoršeného technického stavu stroje.

V praktické části práce byly ověřeny možnosti měření a vyhodnocování pohybu hřídele v ložisku, krouticího momentu, úhlové rychlosti a vibrací. Při měření pohybu hřídele byly za pomoci indukčnostních snímačů naměřeny průběhy výchylky a prostřednictvím enkodéru motoru průběh úhlové rychlosti. Z těchto dat bylo možné sestavit orbity a graf výchylky středu hřídele. Při měření krouticího momentu byl použit snímač s převodem momentu na úhel a integrovaným snímačem úhlové rychlosti. S pomocí těchto dat bylo možné pozorovat závislosti úhlové rychlosti a momentu při měření bez zátěže a s využitím dynamometru. Měření vibrací se uskutečnilo na zakázku průmyslového podniku a jeho cílem bylo stanovení vibrací nově vyrobené převodovky a rozhodnout o vhodnosti konstrukčních změn spočívajících ve zmenšení axiálních vůlí ložisek. Pro účely vyhodnocení byla provedena nejprve analýza v časové oblasti a dále analýza za pomoci krátkodobé Fourierovy transformace. Z výsledků analýzy je patrné, že zmenšení axiálních vůlí ložisek má malý, ale prokazatelný vliv na snížení vibrací převodovky. Z tohoto důvodu bylo vydáno doporučení pro snížení vůlí, pokud tato změna není spojena s jinými negativy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 391 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [3] JAN, Jiří. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2002, 427 s. ISBN 80-214-1558-4.
- [4] *Accelerometers - Laboratory Grade for High Vibration Levels* [online]. Omega Engineering Inc., 2003–2015 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <<http://www.omega.com/pptst/ACC103.html>>.
- [5] *Piezoresistive Accelerometer - Model 2262A* [online]. Meggitt Sensing Systems, 2014 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <<https://www.endevco.com/2262a/>>.
- [6] *Capacitive Accelerometer - ASC 3421* [online]. ASC GmbH, 2013 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.asc-sensors.de/uploads/tx_ascproducts/DB_ASC_3421_Apr2013.qxp.pdf>.
- [7] *Laser Doppler Vibrometer - LV1700 Series* [online]. ONO SOKKI, 2010 [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: <https://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/products/keisoku/s_v/lv1700.html>.
- [8] *Displacement and Position Sensors* [online]. Lion Precision, [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: <<http://www.lionprecision.com/products.html>>.
- [9] *capaNCDT - Capacity Displacement Sensors and Systems* [online]. Micro-Epsilon, [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: <<http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--capaNCDT--en.pdf>>.
- [10] *Proximity sensors* [online]. OMRON Corporation, 2000–2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.omron-ap.com.my/service_support/technical_guide/proximity_sensor/further_information.asp>.
- [11] *RLV-5500 Rotational Laser Vibrometer* [online]. Polytec GmbH, [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/RotVib/Documents/OM_BR_RLV-5500_2010_07_PDF_E.pdf>.
- [12] *Dynamic Torque Transducers* [online]. Bestech Australia, [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <<http://www.bestech.com.au/rotating/>>.
- [13] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 671 s. ISBN 80-7300-004-0.
- [14] ADÁMEK, Milan. *A/D a D/A převodníky* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.mikroelektro.utb.cz/e107_files/downloads/pr14.pdf>.
- [15] *Products for Analog to Digital Converter* [online]. Texas Instruments, [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lstds/ti/data-converters/analog-to-digital-converter-products.page>>.

- [16] *Analog/Digital Converters* [online]. New Mexico Institute of Mining and Technology, 2013 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.ee.nmt.edu/~erives/308_13/Lecture18_S13.pdf>.
- [17] *Analog Sampling Basics* [online]. National Instruments, 2014 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <<http://www.ni.com/white-paper/3016/en/>>.
- [18] *Avoiding aliasing by Nonuniform sampling* [online]. Elektronikas un datorzinātņu institūts, [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <<http://www.edi.lv/media/uploads/UserFiles/dasp-web/sec-5.htm>>.
- [19] SOUKUP, Josef; SKOČILAS, Jan. *Technická měření*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2008, 185 s. ISBN 978-80-7414-002-0.
- [20] *SDOF Example: Accelerometer* [online]. eFunda, Inc, 2015 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.efunda.com/formulae/vibrations/sdof_eg_accelerometer.cfm>.
- [21] *Glossary - Accelerometer* [online]. Beran Instruments Ltd, 2015 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <<http://www.beraninstruments.com/Applications/Glossary/Accelerometer>>.
- [22] *The Basics of Torque Measurement* [online]. Sensor Developments Inc, 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <<http://www.sendev.com/catalog/pdf/torque-measurement.pdf>>.
- [23] *Torque Transducers* [online]. Magtrol, Inc, [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.magtrol.com/torque/torquemeter_transducers.html#principles>.
- [24] *CompactDAQ* [online]. National Instruments, [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <<http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/>>.
- [25] *LAN-XI data acquisition hardware* [online]. Brüel & Kjaer, [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <<http://www.bksv.com/Products/frontends/lanxi>>.
- [26] *USB DAW Modules* [online]. ADLINK Technology Inc, [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.adlinktech.com/DAQ/USBDAQ.php?utm_source=>>.
- [27] *Orbit, Timebase, and Shaft Centerline Plots (Sound and Vibration Measurement Suite)* [online]. National Instruments, [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416A-01/svtconcepts/obt_tbs_shctln/>.
- [28] VDOLEČEK, František. *Technická diagnostika v systémech údržby* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, vydáno v časopise Automa, 5/2008. Dostupné z: <<http://automa.cz/res/pdf/37313.pdf>>
- [29] YANG, Bo Suk; PARK, Chul Hyun; KIM, Ho Jong. *An efficient method of vibration diagnostics for rotating machinery using a decision tree* [online]. International Journal of Rotating Machinery, 2000, 6.1: 19-27. Dostupné z: <www.hindawi.com/journals/ijrm/2000/538052/abs/>
- [30] *Product catalog – Inductive sensors* [online]. Baumer Group, [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.baumer.com/fileadmin/user_upload/international/Downloads/BR-CT/Baumer_Catalog-Induktiv_CT_EN_1302_11102284.pdf>.

- [31] General Purpose *Single Axis Accelerometers* [online]. PCB Piezotronics, [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.pcb.com/TestMeasurement/Accelerometers/gen_purpose/Gen_Purpose_SingleAxis>.
- [32] NOVÁK, Lubomír. *Vývažování tuhých rotorů* [online]. Elektrorevue, 10/2004. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04049/index.html>>
- [33] *Comparing Vibration Readings* [online]. STI Vibration Monitoring, [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <<http://www.stiweb.com/appnotes/Comparing-Vibration-Readings-on-Rotating-Machinery.html>>.
- [34] *Window Functions – An Analysis* [online]. Gaussian Waves, [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <<http://www.gaussianwaves.com/2011/02/window-functions-an-analysis/>>.
- [35] ŠIMÁK, B.; VERTELETSKAYA, E. *Performance Evaluation of Pitch Detection Algorithms* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2009 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2009060001>>.
- [36] GROSSE, Ch.; REINHARDT, H. *Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets* [online]. University of Stuttgart, [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <<http://www.ndt.net/article/v07n09/08/08.htm>>.