



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ NA ČÁSTECH
OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS ON PARTS OF MACHINE TOOLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Kroupa

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Miroslav Svoboda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Kroupa**
Akademický rok: 2015/16

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 vibrací na částech obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrace vyskytující se při provozu strojů nám často předem signalizují vznikající závady. Díky tomu pak můžeme v předstihu provádět patřičné opravy a tím předcházet havarijnímu stavu. Tomuto způsobu diagnostiky strojů, pomocí naměřených vibrací se říká tzv. vibrodiagnostika. Tato práce se zabývá měřením a analýzou vibrací na částech obráběcích strojů a jejich vyhodnocením.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s problematikou vibrodiagnostiky obráběcích strojů
2. Provedení měření vibrací na částech obráběcích strojů pomocí dostupných akcelerometrů
3. Analýza naměřených vibrací
4. Vyhodnocení výsledků měření a zhodnocení využití vibrací pro diagnostiku obráběcích strojů

Seznam literatury:

Brandt, A. (2011): Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures. John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken.

Brepta, R., Půst, L. a Turek, F. (1994): Mechanické kmitání. Sobotáles, Praha

Navrátil, M. a Pluhař, O. (1986): Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je měření a analýza vibrací na částech obráběcích strojů za použití snímače vibrací. Tato práce také obsahuje základní přehled dosavadního poznání týkajícího se problematiky vibrací a vibrační diagnostiky, vlastní měření a analýzu naměřených vibrací.

ABSTRACT

The aim of the Master's Thesis is the measurement and analysis of vibrations on the machine tool parts using a vibration sensor. This work also contains an overview of the current knowledge regarding the issue of the vibrations and the vibration diagnostics, measurement itself and analysis of the measured vibrations.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrodiagnostika, technická diagnostika, diagnostika, měření, analýza

KEYWORDS

Vibrodiagnosis, technical diagnosis, diagnostic, measurement, analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, M. *Měření a analýza na částech obráběcích strojů*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 75 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Kroupa.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Jiřímu Kroupovi za vedení diplomové práce, odborné konzultace a cenné rady, které mi při tvorbě práce pomohly.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kroupy s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2016

.....

Bc. Miroslav Svoboda

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 DIAGNOSTIKA	17
1.1 Vibrodiagnostika	17
1.2 Periodické vibrace	18
1.3 Neperiodické vibrace	19
1.4 Vliv vibrací na obráběcí stroje.....	20
1.4.1 Rozdělení kmitů při obrábění	20
1.5 Měření vibrací	21
1.6 Snímače	22
1.6.1 Vhodnost použití snímačů.....	23
1.6.2 Snímače výchylky	23
1.6.3 Snímače rychlosti	24
1.6.4 Snímače zrychlení	25
1.7 Upevnění snímačů.....	26
1.7.1 Upevnění pomocí šroubů.....	26
1.7.2 Upevnění pomocí lepidel	26
1.7.3 Upevnění magnetem	26
1.7.4 Upevnění včelím voskem.....	26
1.8 Metody vyhodnocení a analýza vibrací.....	27
1.8.1 Analýza signálu v časové oblasti	28
1.8.2 Spektrální analýza	29
1.8.3 Vibrační diagnostika ložisek.....	30
1.8.4 Hodnocení vibrací dle normy ČSN ISO 10816.....	31
1.8.5 Metoda obálky zrychlení	33
1.9 Zpracování signálu	34
1.9.1 Aliasing	34
1.9.2 Chyba únikem.....	35
2 EXPERIMENT	39
2.1 Měřicí aparatura	39
2.1.1 Tříosý akcelerometr PCB 356B18	39
2.1.2 Analogová měřicí karta NI 9234	40
2.1.3 Zásuvný modul NI cDAQ - 9174	41
2.1.4 Program NI Signal Express 2015.....	41
2.2 Postup měření	41
3 ANALÝZA MĚŘENÍ	45
3.1 Frekvenční analýza.....	45
3.1.1 Analýza vřetene stroje	45
3.2 Hodnocení výstrahy a přerušení chodu vřetene	49
3.3 Vztahu mezi kvalitou povrchu a příslušnými vibracemi.....	52
4 VYUŽITÍ VIBRACÍ PRO DIAGNOSTIKU	57
5 ZÁVĚR	59
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
7 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	63
7.1 Seznam zkratk.....	63

7.2	Seznam obrázků	63
7.3	Seznam tabulek	64
8	SEZNAM PŘÍLOH	65

ÚVOD

Vibrace se vyskytují při provozu všech strojních zařízení, často předem signalizují vznikající závadu. Díky tomu můžeme v předstihu provádět patřičné opravy a předcházet tím nežádoucím havarijním stavům. Tento způsob diagnostikování strojů je označován jako vibrační diagnostika, nebo taky vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika je široký obor obsahující mnoho metod, analýz souvisejících s údržbou zařízení. Tato práce se dle pokynů vedoucího zaměřuje na úzce specifikovanou oblast této problematiky.

Teoretická část práce se věnuje nejprve obecnému seznámení s oblastí diagnostiky a poté se zaměřuje na vibrodiagnostiku, kterou podrobně rozebírá. Jsou zde nejdříve popsány druhy vibrací a jejich základní vliv na obrábění. Dále se práce soustředí na měření vibrací a snímače, které se k měření vibrací používají, a způsoby jejich upevnění. Následně jsou zde zpracovány metody vyhodnocování a analýz vibrací. Závěr teoretické části je věnován zpracování signálu.

Praktická část se zabývá dvěma hlavními oddíly - oddílem popisujícím experiment a oddílem popisujícím analýzu naměřených dat. Oddíl Experiment se soustředí na měřicí soustavy, rozebírá jednotlivé komponenty potřebné k měření. Nechybí ani popis postupu experimentu a tabulky, ve kterých jsou znázorněna jednotlivá nastavení.

Práce se následně zabývá analýzou naměřených dat užitím vybraných programů. Analýza dat sleduje nejprve vibrace na vřetení, poté vyhodnocuje zavedení pásma výstrahy a přerušení provozu pro stroj. Dále se práce zaměřuje na vztah mezi kvalitou povrchu a hodnotami naměřených vibrací.

Poslední částí práce je celkové doporučení a vyhodnocení použití vibrací pro vibrodiagnostiku.

1 DIAGNOSTIKA

Diagnostika (diagnostics) je ověření symptomů a syndromů pro určení povahy vad nebo poruch (druh, situace, rozsah). Symptom (příznak) je postřeh získaný pomocí lidských pozorování a měření, který může s jistou pravděpodobností indikovat přítomnost jedné nebo více závad. Syndrom je skupina znaků nebo symptomů, které dohromady indikují nebo charakterizují abnormální stav. [2]

Slovo diagnostika pochází z řeckých slov dia-gnosis, což v překladu znamená „skrze poznání“. Zpočátku se užívalo především ve zdravotnictví pro lékařské vyšetření pacienta a až mnohem později si toto slovo osvojily technické aplikace. Technická diagnostika je vědní obor, který se zabývá metodami, postupy a prostředky bez demontážního a nedestruktivního zjišťování technického stavu objektu. [2,3]

Diagnóza je vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Z hlediska terminologie spolehlivosti se jedná o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných technických podmínek.

Základními úkoly diagnostiky jsou:

- detekce vady nebo poruchy – tj. identifikace vady nebo poruchy
- lokalizace vady nebo poruchy – tj. určení místa vady nebo poruchy v objektu.

Porucha (failure) je jev spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci. Vada (defect) - jedná se o nesplnění požadavku ve vztahu k zamyšlenému nebo specifikovanému použití. Vada nemusí nutně znamenat ukončení schopnosti plnit požadovanou funkci. [2]

1.1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika (někdy také vibrační diagnostika) je jednou z hlavních metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky. Jejím hlavním cílem je odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit operativní plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám. Vibrodiagnostika využívá vibrací jako zdroje informací pro stanovení technického a provozního stavu technických zařízení. [2,3]

Vibrací se rozumí mechanické kmitání a také chvění prostředí. Je způsobeno pohybem pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné, nebo taky klidové polohy. Rovnovážná poloha je přitom ta, kterou zaujímá těleso v době, kdy mají na něj působící síly nulovou hodnotu. Tyto vibrace mohou být vyvolány jak externími, tak interními budícími silami. Vibrace lze popsat budící silou, jejím směrem a kmitočtem a lze je popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. Jsou dány kombinací šesti pohybů, a to posuvem v ortogonální soustavě souřadnic x, y, z a rotací kolem těchto os. [3]

Vibrace stroje jsou spjaty s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem jeho součástí, jsou buzeny jak rotujícími, tak přímočaře se pohybujícími tělesy. U téměř všech větších strojů, jimiž se vibrační diagnostika převážně zabývá, představuje doba provozu podstatnou část života stroje. [2,3]

Vibrační diagnostika je podrobněji popisována normami, seznam norem je uvedený v příloze č. 1.

Jedním ze základních problémů aplikací každého druhu diagnostiky je fakt, že je analyzována až odezva na působící příčiny. V případě vibrodiagnostiky jsou touto odezvou vibrace, jejichž charakter je závislý na druhu působící (budící) síly. [2]

Dle časových změn můžeme rozdělit vibrace těchto typů [3] :

- Periodické vibrace
- Neperiodické vibrace

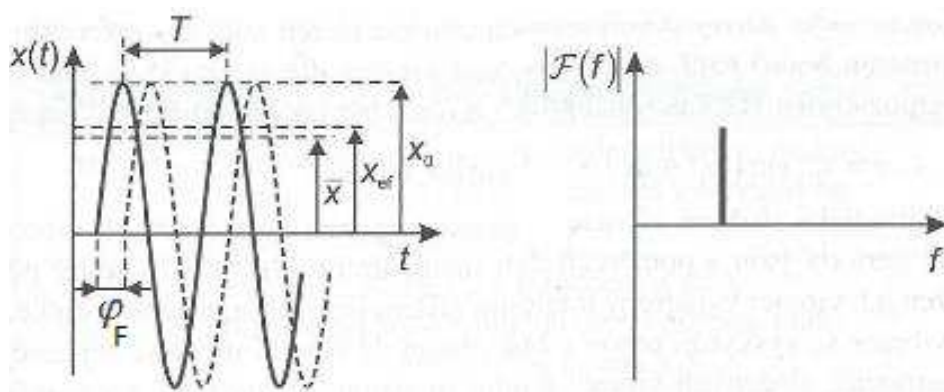
1.2 Periodické vibrace

U periodických vibrací se časový průběh vibrodiagnostických veličin opakuje. Vibrace jsou zde buzeny periodickou silou, jedním z nejjednodušších případů periodické síly je síla harmonická (Obr. 1). Je tedy možné popsat vlastnosti periodické síly a její vliv na vibrační odezvu pomocí harmonické síly a její odezvy (1). [2,3]

$$f(t) = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (1)$$

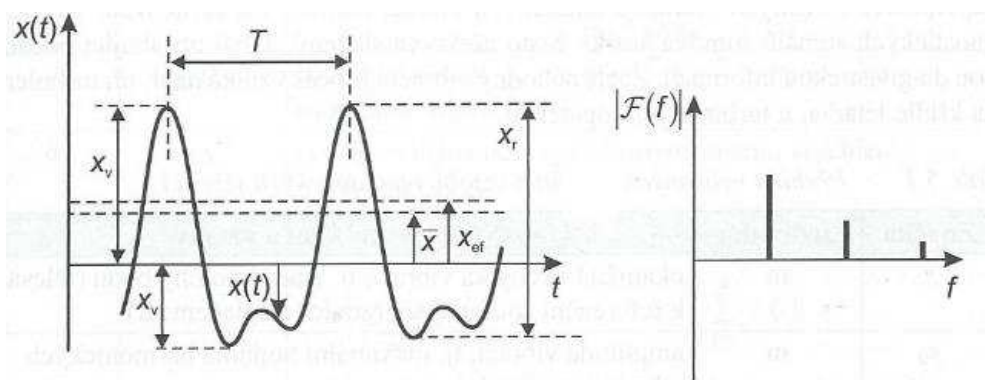
kde:

F	[N]	amplituda budící síly
ω	[rad/s]	kruhová frekvence budící síly
t	[s]	čas
φ_F	[1]	počáteční fázový posuv budící síly



Obr. 1 Harmonický průběh vibrací [3]

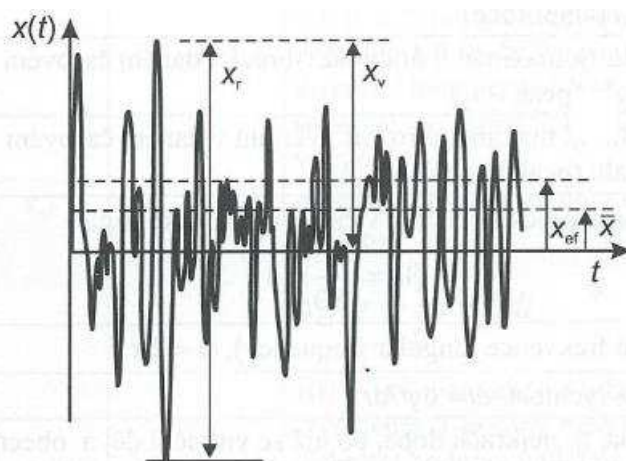
V technické praxi se s harmonickou silou setkáváme zřídka, avšak většinu skutečných sil vyskytujících se v oblasti rotačních strojů lze vyjádřit jako součet harmonických sil. Složené vibrace (Obr. 2) jsou dané superpozicí různých časových průběhů. Periodické složené vibrace vzniknou složením dvou harmonických vibrací, jejichž periody jsou v poměrech daných racionálními čísly. [2,3]



Obr. 2 Průběh složené vibrace [3]

1.3 Neperiodické vibrace

Neperiodické, nebo taky náhodné, vibrace (Obr. 3) mohou vznikat složením vibrací, je-li jediný poměr složek vyjádřen iracionálním číslem. U vibrací strojů se nejčastěji vyskytuje superpozice složených vibrací a náhodných vibrací. Při zpracování vibrodiagnostických signálů šumová složka často překrývá složený signál obsahující podstatnou diagnostickou informaci. Náhodné buzení je vždy přítomné, ale občas je nutné je uvážit i při standardní vibrační diagnostice. Zcela náhodný vibrační signál vzniká např. při turbulenci na křídle letadla, turbínových lopatek atd. [2,3]



Obr. 3 Náhodný průběh vibrací [3]

1.4 Vliv vibrací na obráběcí stroje

Kmitavý pohyb patří mezi jevy, které provázejí téměř každé strojní zařízení, čili kmitání systému je průvodním jevem práce na obráběcích strojích. Jedná se o velmi složitý jev, kde každý stroj tvoří komplikovanou soustavu hmotných a pružných těles. Toto kmitání vzniklé v soustavě stroj – nástroj - obrobek je někdy tak malé, že nemá žádný nepříznivý účinek. Jsou však i takové případy, kdy je toto kmitání velmi intenzivní. V takových případech vydává stroj nebo nástroj zvláštní zvuk. [9]

Nepříznivé účinky intenzivního kmitání se při obrábění projevují ve více směrech [9]:

- obrobený povrch má charakteristickou vlnitost, což má za následek horší přesnost při dodržení geometrického tvaru a vzrůstá s tím i drsnost povrchu
- nástroje z nástrojových ocelí se rychleji otupují a nástroje ze spékaných karbidů se lámou
- zvyšuje se celkové opotřebení stroje
- vlivem charakteristického tónu se zhoršují podmínky v pracovním prostředí

Ve většině případů bývá kmitání obráběcích strojů považováno za škodlivý jev. Realizují se však technologie, kdy se mechanické kmitání řezného procesu záměrně budí. Obvykle za účelem zvyšování řezivosti nástroje, tvarování třísky apod. [9]

Kmitání a kmitavé systémy můžeme rozdělit na:

- translační (tělesa vykonávají periodický přímočarý pohyb)
- rotační (tělesa vykonávají periodický otáčivý pohyb)

Podle existence vnějších budících sil na:

- vlastní kmitání (bez vnějších budících sil)
- vynucené kmitání (s vnější budící silou)
- samobuzené kmitání (se zpětnou vazbou mezi působící silou a kmitáním systému)

1.4.1 Rozdělení kmitů při obrábění

Vlastní kmity v soustavě stroj – nástroj - obrobek bývají často vyvolané nárazem. Ve většině případů je však vliv vlastních kmitů ve vztahu k procesu obrábění zanedbatelný, jelikož dochází k jeho utlumení. Nepříznivý vliv na obrábění mají zejména vynucené a samobuzené kmity. Příčiny vzniku vynuceného kmitání jsou síly periodicky měnící se s časem. Vynucená kmitání se objevují na strojích i v době, kdy je stroj spuštěn tzv. naprázdno. [9]

Z původu budící síly můžeme rozdělit kmitání na:

- kmitání, kde budící síla nesouvisí s procesem řezání

Do této kategorie patří formy kmitání jako kmitání relaxační, které se vyskytuje při obrábění s velmi malými posuvovými rychlostmi, nebo kmitání vznikající při použití kopírovacích systémů se zpětnou vazbou. [9]

- kmitání, kde budící síla souvisí s procesem řezání

Kmitání související s procesem řezání může být vyvoláno nerovnoměrným přídávkem na obrábění, ale i charakterem práce stroje. Při obrábění se často setkáváme s kmitáním způsobeným vlnitostí obráběné plochy a s tím spojenými změnami velikosti řezné síly, ty snižují životnost nástroje i stroje. [9]

Samobuzené kmitání nepotřebuje ke svému vzniku, působení a udržení žádnou vnější periodickou sílu. Toto kmitání vzniká a udržuje se působením sil vznikajících v průběhu kmitání, jeho frekvence není určena žádnou funkcí vnějšího zdroje, ale vlastnostmi kmitajícího systému. [9]

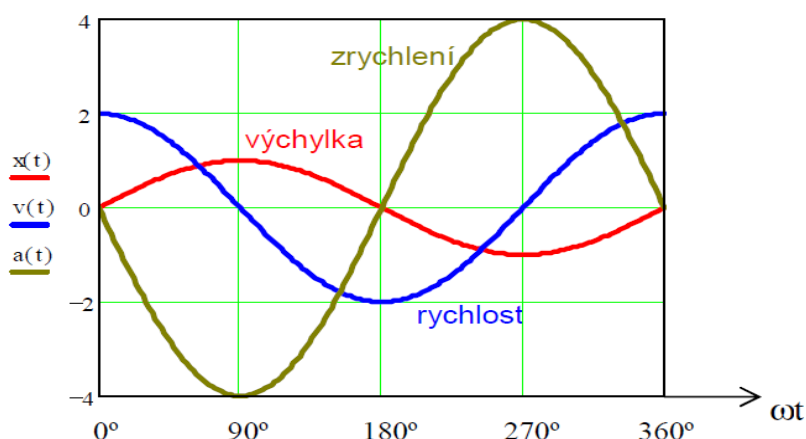
1.5 Měření vibrací

S mechanickým kmitáním se potýkáme ve všech oborech průmyslu, ve strojírenské výrobě, dopravě, zemědělství, stavebnictví, chemii i jinde. Mechanické kmitání obsahuje zpravidla více složek vyskytujících se současně na mnoha frekvencích, takže na základě pouhého pozorování časového průběhu jeho amplitud nelze určit ani počet, ani frekvenci jednotlivých složek. Jednotlivé složky mohou být zjištěny pouze ze závislosti jeho amplitud na frekvenci. Frekvenční analýzy odhalují řadu výrazných kmitočtů periodických složek, mající přímý vztah k základním pohybům různých dílů a částí zkoumaného zařízení. Takto můžeme zjišťovat zdroje a příčiny nežádoucího chvění. [4]

Amplitudy mechanického kmitání, které do jisté míry určují jeho nebezpečnost a škodlivost, je možno hodnotit několika způsoby na:

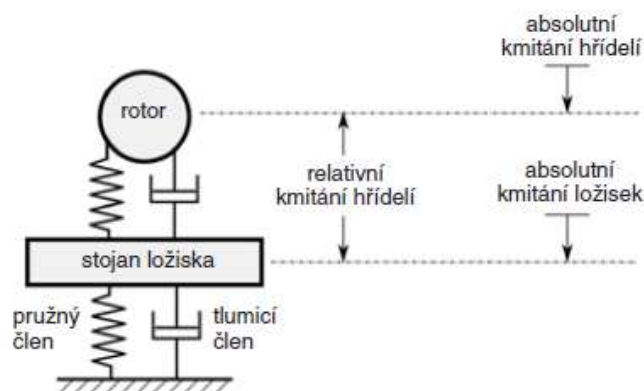
- Maximální rozkmit - také označovaný jako dvojitá amplituda (Peak-to-Peak) udává největší rozkmit hodnoceného průběhu. Její použití je výhodou především tam, kde je z hlediska maximálně přístupného mechanického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka mechanického kmitání. [4]
- Maximální hodnota - zvaná také jako vrcholová nebo špičková hodnota. Je důležitá zejména tím, že popisuje amplitudy krátkodobých jevů i jednorázových, mechanických rázů apod., indikuje však pouze přítomnost špičky, neukazuje časový průběh ani kmitočtové složení hodnoceného kmitání. [4]
- Střední hodnota - zvaná též absolutně střední hodnota. Ukazuje časový průběh hodnoceného kmitání, avšak její praktický význam je značně omezen absencí přímého vztahu k důležitější fyzikální veličině. [4]
- Efektivní hodnota. Tato hodnota je z hlediska kvalitativního hodnocení amplitud mechanického kmitání nejdůležitější hodnotou, neboť ukazuje jeho časový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu, je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitání. [4]

Mechanické kmitání má tři základní určující veličiny, a to výchylku, rychlost a zrychlení (obr. 4). Tvar vlny vyjadřující časovou závislost mechanických kmitů a frekvence kmitů se při jejich popisu na základě výchylky, rychlosti a zrychlení nemění, hlavní rozdíl spočívá ve fázových vztazích mezi jejich časovými průběhy. [4,2,8]



Obr. 4 Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [8]

Při diagnostice strojů je nutné rozlišovat absolutní a relativní vibrace (obr. 5). U absolutních vibrací tělesa je pohyb tělesa vztahován ke gravitačnímu poli Země. Relativní vibrace tělesa jsou vyhodnocovány vůči zvolenému reálnému bodu (např. jiná část stroje, základová deska stroje apod.). [3]



Obr. 5 Absolutní a relativní vibrace [3]

Základními vlastnostmi snímačů vibrací jsou dynamický rozsah, uváděný v m/s^2 nebo násobcích tíhového zrychlení g , frekvenční rozsah, udávající horní i dolní mez měřených frekvencí, citlivost, směrová charakteristika a odolnost proti vlivům prostředí, zejména odolnost proti teplotě a vlhkosti. Důležité jsou i rozměry a hmotnost snímačů. [3,4]

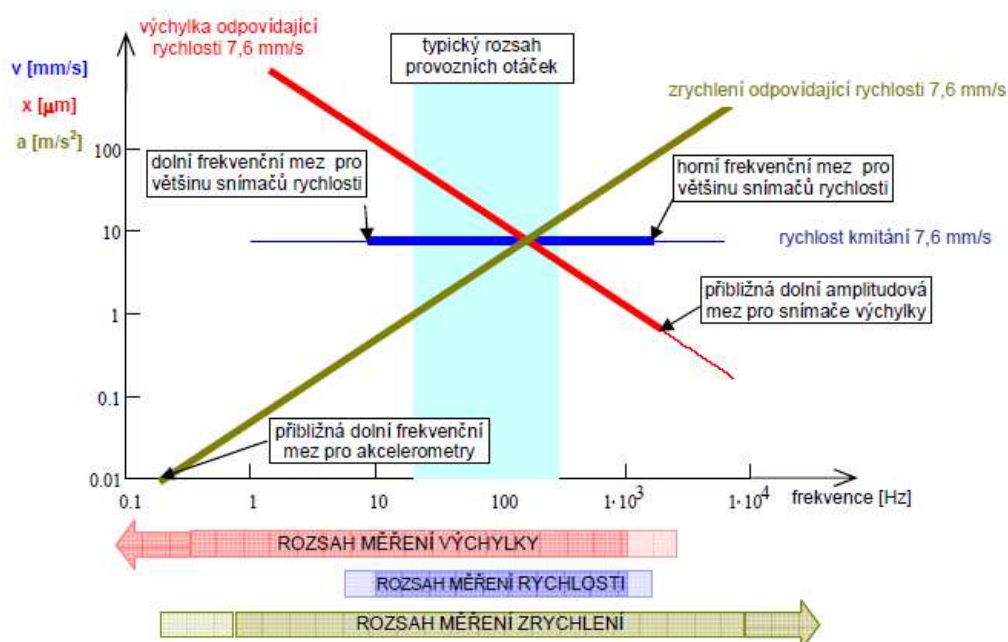
1.6 Snímače

Jako první široce používané měniče mechanického kmitání, které dávaly elektrický výstup, byly absolutní elektrodynamické snímače. Systémy pro měření mechanického kmitání se skládají zásadně ze dvou částí, a to ze

snímače mechanického kmitání, který se upevňuje přímo na měřený objekt, a z měřicího řetězce obsahujícího měřící a indikační zařízení. [4]

1.6.1 Vhodnost použití snímačů

Při měření je nutné brát v úvahu i nepříznivé vlivy působící na přesnost měření, a proto je dobré volit vhodně měřenou veličinu tak, aby dávala dostatečný odstup signálu od šumu. Z obr. 6 vyplývá, proč se pro běžná měření v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1 000 Hz používají jako měřená veličina rychlost, pro vyšší frekvence je upřednostněno zrychlení a pro nižší frekvence výchylka. Frekvenční rozsah je tedy jeden z faktorů, jež rozhoduje o typu měřené veličiny. V případě, že měřený frekvenční rozsah zahrnuje vysoké frekvence, je nejvhodnější volbou měřit zrychlení. Naopak, pokud bude měření omezeno na otáčkovou frekvenci, bude nejlepší volbou měření výchylky nebo rychlosti. [8]



Obr. 6 Omezení při měření [8]

Snímače rychlosti bývají v důsledku své konstrukce limitovány frekvencemi 10 Hz až 1 500 Hz. Nejširší frekvenční rozsahy však mají akcelerometry, ty jsou schopny měřit frekvenční rozsah 1 Hz až zhruba 30 kHz. [8]

1.6.2 Snímače výchylky

Senzory výchylky mohou být realizovány na indukčním, magnetickém, kapacitním a optickém principu. Ve vibrodiagnostice je nejčastěji používaným snímačem výchylky snímač na bázi vířivých proudů, který pracuje na principu využití změny Foucaultových proudů při změně odporu prostředí v důsledku změny vzdálenosti mezi špičkou snímače a vodivým povrchem. Tyto snímače se nejčastěji vyrábějí jako integrované v kovovém krytu. Toto uspořádání potlačuje parazitní vlivy okolních elektromagnetických polí, vliv délky kabelu aj.

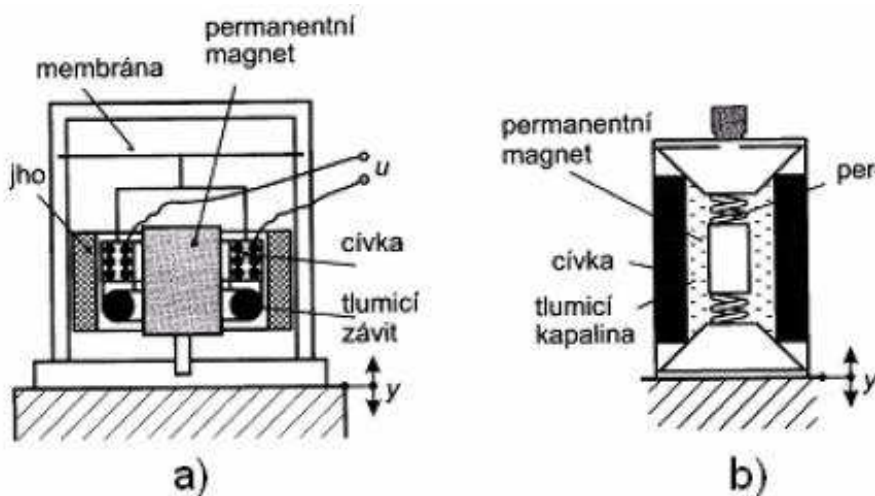
Kmitočtový rozsah senzoru je od 0 Hz do 10 000 Hz, což odpovídá 600 000 ot/min. [2,3,8]

Snímače výchylky tvoří relativně složitý systém, proto se v současnosti používají jen pro měření vibrací hřídelů, to se provádí měřením relativních vibrací hřídele vůči statorové části, nejčastěji vůči ložisku. Snímače neobsahují žádné pohyblivé části, takže poskytují stejný výstup bez ohledu na polohu, v jaké jsou namontovány. [3,8]

Běžně se pracuje s hodnotami citlivosti 8 mV/ μm . Tyto snímače však mají poměrně malý rozsah vzdálenosti, ve které je výstupní signál lineární (typický v rozsahu 0,25 až 2,3 mm). Z uživatelského hlediska to znamená, že je nutné sondu nastavit za klidu na střed pásma s lineární odezvou. [8]

1.6.3 Snímače rychlosti

Pro měření rychlosti lze použít buď snímače zrychlení (akcelerometry) s tím, že hodnoty rychlostí získáme následnou integrací, anebo absolutní elektrodynamický snímač. Snímač ve své podstatě měří výchylky vibrací a vzhledem k vnitřnímu uspořádání dochází k vzájemnému pohybu magnetu a cívky, k indukci napětí na cívce. Magnetický tok se mění v závislosti na výchylce vibrace a vstupní napětí na cívce je úměrné derivaci proměnného magnetického toku, a tedy rychlosti vibrací. [3]



Obr. 7 Absolutní elektrodynamické snímače rychlosti
a) S pohyblivou cívkou, b) S pohyblivým magnetem [3]

Senzor je možno používat bez zdroje napájení a napětí je možno měřit libovolným číslicovým multimetrem bez zesilovačů. Použitelný frekvenční rozsah snímače je dán mechanickými parametry jeho součástí (např. tuhost pružiny, hmotnost cívky). Obvykle je rezonanční frekvence snímače pod 10 Hz a použitelný frekvenční rozsah snímače je 10 až 1 000 Hz. [3,8]

Výhodou snímačů rychlosti je jejich cena, jsou poměrně citlivé, nevýhodou je, že v důsledku své křehkosti jsou náchylné na otřesy a nejsou vhodné pro „ruční“ měření, používají se pouze trvale namontované na skříňní stroje pomocí šroubu. Moderním typem snímačů jsou laserové snímače

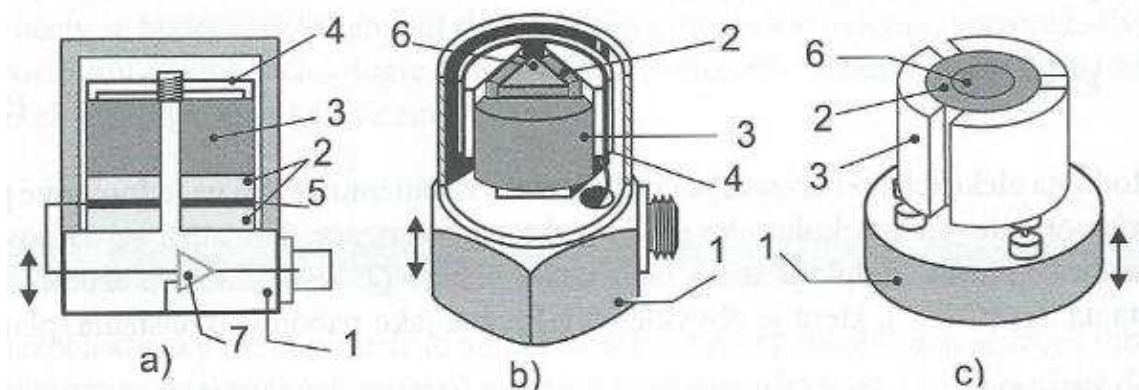
rychlosti na principu Dopplerova jevu, jsou ale velmi drahé a běžně se nepoužívají. [8]

1.6.4 Snímače zrychlení

Snímače zrychlení (akcelerometry) patří mezi nejrozšířenější. Existuje celá řada fyzikálních principů využívaných při realizaci akcelerometrů, mezi nejznámější patří piezoelektrický, s elektromechanickou zpětnou vazbou piezorezistentní a kapacitní. [3]

Piezoelektrický akcelerometr

Piezoelektrický akcelerometr je nejužívanějším typem absolutních snímačů vibrací. Pracuje na bázi piezoelektrického jevu, při němž deformací vybraných krystalických nebo polykrystalických látek vzniká dipólový elektrický moment objemového elementu a ve výsledném efektu způsobí elektrickou polarizaci čidla. Tento jev je závislý na směru deformací vzhledem k osám krystalové mřížky, podle směru využití rozlišujeme působení vůči ose anizotropie jako podélný, příčný a stříhový jev. Pro piezoelektrické elementy akcelerometrů se využívá modifikace křemene, piezokeramiky, piezoelektrické polymery a pro vysoké teploty LiNbO_3 . Piezoelektrické akcelerometry v základním provedení jsou obvykle použitelné v pásmu od několika málo hertzů do 20 až 40 kHz. [3,5]



Obr. 8 Uspořádání piezoelektrických akcelerometrů:

- a) s tlakovou deformací, b) uspořádání DELTA se stříhovou deformací, c) tříosé uspořádání ORTHP se stříhovou deformací (1 - základová deska, 2 - piezoelektrický element, 3 - seismická hmota, 4 - mechanické předpětí, 5 - elektroda, 6 - trn, 7- předzesilovač) [3]

Piezorezistivní akcelerometry

Piezorezistivní akcelerometry jsou založeny na piezorezistivním jevu, který charakterizuje vliv krystalografické orientace hmoty na rezistivitu materiálu. Při namáhání ohybem se mění rezistivita piezorezistivních elementů uspořádaných obvykle do Wheatstoneova můstku. Ze všech typů akcelerometrů má tento typ nejvyšší poměr citlivosti vůči hmotnosti a vzhledem ke stabilitě napěťové citlivosti jsou vhodné k dlouhodobým testům, bohužel jsou teplotně závislé. Používá se obohacený polovodič Si-p+. [3]

Kapacitní akcelerometry

Kapacitní akcelerometry jsou přesné a velmi citlivé, mají nízký dynamický rozsah zrychlení. Při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje. Vyhodnocuje se difference hodnot kapacit. [3]

1.7 Upevnění snímačů

Jeden z nevýznamnějších problémů v praxi je uchycení snímače k sledovanému objektu. Nevhodným připevněním je možné zcela znehodnotit naměřená data, nebo alespoň výrazně omezit použitelný frekvenční rozsah snímače. Způsob připevnění je dobré volit tak, aby snímač bezpečně pracoval v požadovaném frekvenčním rozsahu. Snímač je schopný snímat nejvyšší frekvence jen pokud má co nejmenší hmotnost a je co nejpevněji spojen s měřenou plochou. Upevnění lze realizovat několika způsoby: [5,8]

1.7.1 Upevnění pomocí šroubů

Nejmenšího ovlivnění frekvenční charakteristiky a maximálního využití frekvenčního rozsahu lze dosáhnout při upevnění snímačů závrtnými šrouby, popř. ještě vylepšené tenkou vrstvou silikonové vazelíny mezi styčnými plochami. Plocha pod základnou snímače musí být čistá a rovná, snímač má dosedat na plochu celou plochou základny, díra pro šroub musí být kolmá k měřenému povrchu a dostatečně hluboká a musí být použit správný závit. Velká tuhost šroubového spoje je výhoda i z hlediska vysoké rezonanční frekvence 15–40 kHz. [5,8]

1.7.2 Upevnění pomocí lepidel

Velmi dobrého frekvenčního rozsahu jsme také schopni dosáhnout při připevnění pomocí speciálních lepidel. Některá lepidla však mají záměrně měkkou doplňkovou složku (pro vyrovnání nerovností atd.), která významně snižuje frekvenční rozsah, proto je nutné používat pouze doporučená lepidla. Přilepený snímač má základní rezonanci obvykle nad 10 kHz, u špičkových lepidel až 28 kHz. Adhezivní síla musí spolehlivě udržet snímač na ploše a současně musí být možné snímač bez poškození sejmut. Proto se zde často používají také zubní cementy nebo kyanoakrylátová lepidla. [5,8]

1.7.3 Upevnění magnetem

Jedná se o čistý a rychlý způsob uchycení snímače, avšak jen pro běžná provozní měření do frekvenčního rozsahu zhruba 2 kHz. Používané magnety jsou pochopitelně silnější než běžně rozšířené magnety. [8]

1.7.4 Upevnění včelím voskem

Dostí rychlý způsob uchycení snímače, jež se používá hlavně pro laboratorní měření a také pro menší snímače. Použitelný frekvenční rozsah snímače tímto způsobem uchycení bývá mírně omezen. Je použitelný jen do teploty cca 40 °C. [8]

Stejný význam jako způsob uchycení má i vhodná volba místa pro instalaci snímače. Zejména u absolutních snímačů je třeba volit taková místa, aby tuhostí, či pružností konstrukce příslušné částí sledovaného stroje nedošlo ke zkreslení chvění, nebo jeho frekvence. Při umístění snímačů je nutné dbát na to, aby byl snímač co nejbližší měřené oblasti. Se vzrůstající vzdáleností snímače od měřeného místa se projevuje tlumení vyplývající z konstrukce stroje a vibrace procházející z určité oblasti by již bylo velmi obtížné měřit. [5]

1.8 Metody vyhodnocení a analýza vibrací

Vibrační analýza se považuje za efektivní postup posouzení technického stavu rotačních strojů. Je zde velký rozdíl mezi analýzou příčin poškození příslušné části a zjištěním závady stroje. Například pouhá výměna poškozeného ložiska řeší problém udržování stroje jen dočasně, často totiž existuje příčina tohoto poškození mimo samotné ložisko. Úkolem analýzy bývá odhalení příčin závady, jako je např. nesouosost, nevyváženost, nesprávné mazání, uvolnění apod. Včasné odhalení příčin závady může velmi často poskytnout možnost provést preventivní opatření, která zabrání trvalému poškození daného stroje. [13]

Zásadním rozdělením vibračních analýz je, zda probíhají tyto analýzy v časové nebo frekvenční oblasti. Analýzy v časové oblasti nám poskytnou rychlý a jednoduchý přehled o stavu, ale nejsou schopny nám ve velké většině případů určit, o jakou závadu se jedná. [3]

Tabulka 1 shrnuje důležité informace, které se vztahují k popisu jednotlivých metod vibrační diagnostiky, upozorňuje na účelnost multiparametrického sledování a vyhodnocování stavu částí strojů, které jsou schopny detekovat vznik a rozvoj jednotlivých typů vad v různých fázích jejich vzniku a rozvoje. [13]

Tab. 1 Přehled současného stavu vibrační diagnostiky [13]

1. Měření a analýza 2. Detekce	Analyzovaná oblast - způsob analýzy	Detekované závady (hypotéza)
1. Rychlost kmitání 2. Efektivní hodnota	(5–400) Hz, (5–1000) Hz, 3 200 čar (5–3 200) Hz, 12 800 čar Průměrná hodnota z 5 měření - časový průběh a jeho celková hodnota - frekvenční spektrum (a jeho celková hodnota), (hodnocení stavu ve smyslu norem ČSN-ISO 13373, ČSN ISO 10816-1)	- nevyváženost - nesouosost - mechanické vůle - rezonance konstrukce - ohnuté hřídele - opotřebení ložisek - makroplastické deformace - úplné lomy
1. Zrychlení kmitání 2. Špička - špička	(5-6 400) Hz, 6 400 čar (5–25 600) Hz, (5–40 000) Hz,	změny v mechanickém

	25 600 čar Průměrná hodnota z 5 měření - časový průběh a jeho celková hodnota - frekvenční spektrum (a jeho celková hodnota)	tření ověření oblastí, kde je stroj buzen rozvojem závady
1. Obálky zrychlení 2. Skutečná špička - špička	Druh filtru: (500-10 000) Hz (obálka č. III) (5 000-40 000) Hz (obálka č. IV) Pro oblast: (0-1 000) Hz, 3 200 čar (0-3 200) Hz, 12 800 čar (0-6 400) Hz, 25 600 čar Jediná hodnota i průměrná hodnota z 5 měření - časový průběh a jeho celková hodnota - frekvenční spektrum (a jeho celková hodnota)	- rázové děje - defekty ložisek (2. fáze - pitting) - poškození
1. HFD - (High Frequency Detection) 2. Špičková hodnota, efektivní hodnota	Druh filtru: (5 000-40 000) Hz celková hodnota	- stav ložisek - mazání
1. Obálka akustické emise AEE/SEE (Acoustic Emission Enveloping) 2. Skutečná špička - špička	Druh filtru: (100 000-500 000) Hz Pro oblast: (0-1 000) Hz, 3 200 čar (0-3 200) Hz, 12 800 čar (0-6 400) Hz, 25 600 čar Jediná hodnota i průměrná hodnota z 5 měření - časový průběh a jeho celková hodnota - frekvenční spektrum (a jeho celková hodnota)	- nesprávné mazání - tvrdé nečistoty v mazivu - koroze - vznik plastických deformací - růst trhlin - defekty ložiska (1. fáze) - kavitace

1.8.1 Analýza signálu v časové oblasti

Analýza vibrodiagnostického signálu v časové oblasti je založena na vyhodnocení parametrů časových průběhů signálů určujících veličin. Někdy se tato analýza označuje také jako časová historie. V časové oblasti lze snadno vyhodnotit okamžité, střední a efektivní hodnoty signálu, nebo obálky signálu. V případě převládající okamžité náhodné složky signálu lze pro analýzu

aplikovat vybrané statistické výpočty deskriptorů jako je směrodatná odchylka, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti, činitel výkmitu a řada dalších, např. FMO, FM4, NA4, NB4 aj. Analýza signálu v časové oblasti je dále vhodná pro přechodové jevy, jako jsou např. rozběhy a doběhy motorů, rázové odezvy, nestacionární signály s proměnnou frekvencí, při nelineárních parametrech systému, při proměnné tuhosti kmitajícího objektu, nebo proměnném tlumení systémů během časové periody signálu. Pokročilé metody v časové analýze využívají číslicovou filtraci, integrální, nebo vlnovou transformaci, umožňující lokalizovat místo závady a animovat módy kmitů. [3,5]

Analýza v čase je tedy vhodná, existuje-li jediný nebo alespoň dominantní zdroj vibrací, neboť jinak dochází ke ztrátě diagnostických informací v šumu signálu způsobeném přenosem vibrací z různých oblastí strojního komplexu a možnost lokalizace příčiny vibrací stroje je pak velmi omezená. [3]

1.8.2 Spektrální analýza

Frekvenční analýza při správném použití odstraňuje nedostatky analýzy v časové oblasti a je metodou umožňující lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí sledovaného stroje. Úplnou frekvenční analýzou se získá amplitudové fázové spektrum signálu. Cílem spektrální analýzy je popsat rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti a vyjádřit analyzovaný signál pomocí ortogonálních bázeových funkcí. Základem frekvenční analýzy jsou především diskrétní Fourierova transformace (DFT) a rychlá Fourierova transformace (FFT). [3,5]

Fourierova transformace patří k integrálním transformacím jako Laplaceova, Hankelova nebo Hilbertova transformace. Funkce $F(f)$, (vztah 2) definuje frekvenční spektrum originálu $f(t)$ jako komplexní veličinu. Vzorec také bývá uváděn s úhlovou frekvencí $\omega = 2\pi f$. Tato transformace je vhodná pro neperiodické spojité signály a poskytuje spojité neperiodické spektrum. [3,4]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

Diskrétní Fourierova transformace pracuje s konečnými posloupnostmi v časové i frekvenční oblasti. DFT pro diskrétně vyjádřený signál poskytuje diskrétně vyjádřený výsledek (vzorky spektra), který je možné dále číslicově zpracovávat. Jelikož diskrétní tvar vyjádření v jedné oblasti odpovídá periodickému vyjádření v oblasti druhé, považuje DFT transformace vstupní signál délky N za jednu periodu fiktivního signálu, jehož spektrum poskytuje. [3,6,1]

U rychlé Fourierovy transformace se jedná o způsob výpočtu DFT, kterým lze docílit stejných výsledků, ale za znatelně kratší dobu. Existuje mnoho algoritmů, které umožňují provést rychlou transformaci pro libovolný počet N hodnot. Klasicky jde o rozdělení těchto hodnot na dvě transformace o hodnotě vzorku $N/2$, které se dále dělí, až nakonec zůstanou pro konečné transformace dva prvky pro snadné a rychlé vyhodnocení. [6]

1.8.3 Vibrační diagnostika ložisek

Valivá ložiska jsou spolu s ozubenými koly dalším zdrojem vibrací ústrojí otáčení otočných částí obráběcích strojů. Vibrace od valivých ložisek bývají buzeny silovými impulsy, které vznikají při odvalování členů ložiska po jeho vnější a vnitřní dráze a doteku s klecí. Vyvolaná frekvence výskytu těchto impulsů může být jak pravidelná, tak náhodná. Pokud jsou impulzy rozloženy pravidelně, způsobují lokální nerovnosti povrchu (např. pitting) na vnitřních i vnějších oběžných drahách, poškození valivých elementů i klece ložiska. Základní frekvence pravidelných impulsů bývá pevný násobek frekvence otáčení hřídele s ložiskem, jejich frekvenční spektrum se skládá ze skupin harmonických složek se základními frekvencemi, které závisí na místě poruchy ložiska. Frekvenční spektrum je širokopásmové až do řádově desítek kilohertzů, a proto je schopné vybudit rezonanci konstrukce. [13]

Průběhem let bylo odvozeno spousta vzorců (např. vztahy 2-5), které mohou napomoci detekci specifických vad ve valivých ložiscích. Jsou založeny na geometrii ložiska, na počtu valivých prvků i na otáčkové frekvenci ložiska. Rozlišujeme zde čtyři základní závady podle místa jejich výskytu. Každá z těchto závad odpovídá tzv. frekvenci ložiskové závady, kterou je možné spočítat na základě parametrů daného ložiska a příslušné otáčkové frekvence. [8]

BPFI – závada na vnitřním kroužku
$$BPFI = \frac{N}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n \quad (2)$$

BPFO – závada na vnějším kroužku
$$BPFO = \frac{N}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n = N \cdot FTF \quad (3)$$

BSF – závada na valivém tělísku
$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right)^2 \right) \cdot n \quad (4)$$

FTF – závada na kleci
$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi \right) \cdot n \quad (5)$$

kde:

n	[Hz]	otáčky rotoru
N	[1]	počet valivých elementů
B_d	[mm]	průměr valivého elementu
P_d	[mm]	roztečný průměr
ϕ	[°]	kontaktní úhel

1.8.4 Hodnocení vibrací dle normy ČSN ISO 10816

Tato norma hodnotí stav stroje podle dvou hlavních kritérií.

Kritérium I: Velikost vibrací

Norma ČSN ISO 10816 byla založena na měření celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu od 10 až po 1 000 Hz. Norma definuje mezní hodnoty mohutnosti vibrací, čímž se rozumí nevyšší hodnoty z různých míst stroje, podle kterých je vyhodnocen stav stroje a stroj je zařazen do jednoho ze 4 pásem. [8]

- Pásmo A - Do tohoto pásma by měly obvykle spadat vibrace nově přejímaných strojů.
- Pásmo B - Stroje spadající do pásma B mohou být zpravidla provozovány bez časových omezení.
- Pásmo C - Stroje z tohoto pásma jsou většinou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobější nebo trvalý provoz. Obecně platí, že tyto stroje mohou být provozovány pouze do té doby, než je nalezena možnost nápravy.
- Pásmo D - Vibrace z tohoto pásma jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.

Zařazení stroje do pásma pomáhá určit jeho následující provoz. Hranice pásem nejsou striktní, jedná se spíše o směrodatné hodnoty. Tyto hodnoty mohou být na základě zkušeností výrobce nebo provozovatele upraveny.

V části normy 2 až 7 jsou definovány mezní hodnoty mohutnosti vibrací pro typy jednotlivých strojů. Stroje, které nejsou uvedeny v této části, jsou posuzovány podle dodatku k části 1 ČSN ISO 10816 - 1/Amd.1: [8]

- hranice pásem A/B 0,71 až 4,5 mm/s
- hranice pásem B/C 1,8 až 9,3 mm/s
- hranice pásem C/D 4,5 až 14,7 mm/s

Kritérium II: Změna vibrací

Podle tohoto kritéria je u strojů posuzována změna velikosti vibrací vzhledem k předem stanovené referenční hodnotě, ta se určuje za ustálených provozních podmínek za dobrého provozního stavu stroje. Velikost vibrací se často podstatně zvýší nebo sníží, aniž by stroj dosáhl pásma C podle prvního kritéria, to si však může vyžádat nějaké opatření. Tyto změny mohou být skokového, ale i postupového charakteru. [8]

Hodnocení stroje dle tohoto kritéria si vyžaduje delšího sledování. Vyskytují se zde dvě výrazně rozdílné fáze:

- 1. fáze spočívá v trvalém sledování stroje, tzv. monitorování, účelem této fáze je zjistit odchylku od normálního stavu a detekovat závadu
- 2. fáze je založená na vlastní analýze problému, pro kterou se používá diagnostika v užším slova smyslu. Účelem bývá zjištění příčiny odchylky a následné vznikající poruchy, případně stanovení trendu rozvoje závady či zjištění základní příčiny vzniku závady.

Jedním z nejdůležitějších nástrojů při monitorování jsou trendy hodnot sledovaných veličin, o kterých bylo zmíněno v kapitole 2.8.2 o analýze celkových hodnot vibrací.

Při dlouhodobém sledování některých druhů strojů se v praxi stanovují provozní poplachové meze vibrací, ty mívají dvě formy:

- Výstraha - pokud dojde k dosažení definované hodnoty vibrací, nebo se vyskytne významná změna, po níž musí být nutné učinit nápravná opatření, dojde k varování
- Přerušení provozu - překročení této meze může při dalším provozu způsobit poškození stroje, při překročení této hodnoty musí být nápravné opatření zavedeno ihned, nebo musí dojít k vypnutí stroje

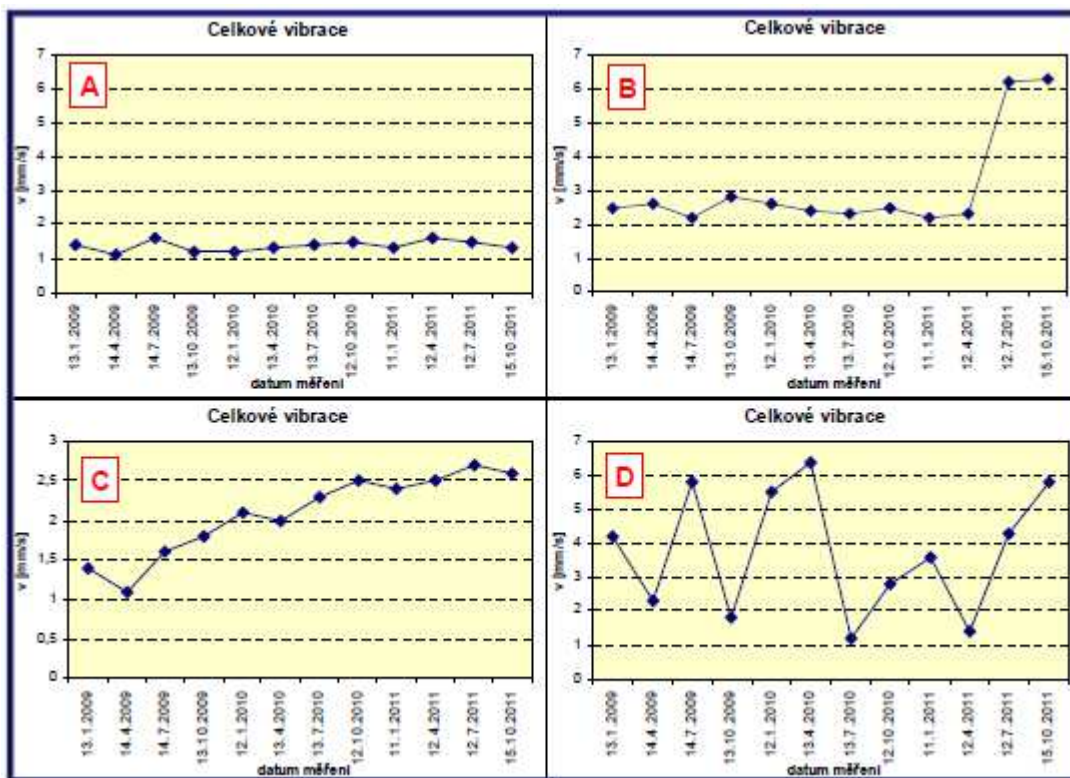
Celkovou hodnotou vibrací se rozumí hodnota měřené veličiny, která je úměrná celkové vibrační energii vztažené k uvažovanému časovému záznamu. Zjištění hodnoty celkových vibrací a jejím porovnáním s normální úrovní se získá jedna z možných informací o stavu stroje, nebo jeho části. Při porovnávání hodnot musí být ověřeno, že měření obou hodnot byla provedena ve stejném frekvenčním rozsahu i ve stejném vyjádření. Pokud by hodnota celkových vibrací byla vyšší než normální úroveň, bylo by možné předpokládat problém, který by tyto vyšší hodnoty způsobil. Úkolem další analýzy je odhalení možné příčiny změn stavu hodnocení stroje. [13]

Zřejmě nejvhodnější metodou a také nejspolehlivější metodou pro zhodnocení celkových vibrací bývá porovnání posledních naměřených vibrací s předchozími hodnotami. Tato metoda umožňuje sledování hodnoty celkových vibrací měnících se v průběhu provozu stroje. [13]

Pokud jsou celkové hodnoty vynášeny do grafu, kde osa „x“ představuje příslušný časový údaj, např. datum, a osa „y“ celkovou hodnotu vibrací, pak spojením hodnot bude vytvořen tzv. trendový graf. Trendový graf celkových vibrací je názorným ukazatelem změn celkových vibrací v čase. Sledování celkových hodnot je považováno za vhodný postup, jak lze relativně spolehlivě odhalit změnu technického stavu rotačních částí. [13]

Tyto trendy můžeme kategorizovat do několika základních stavů (viz obr. 9) :

- A - stroj setrvává v dobrém stavu bez závad
- B - náhlá změna vibrací, ve stroji došlo k náhlému zvýšení vibrací nebo k jejich náhlému poklesu (v takovém případě by mohlo dojít k samovolnému spontánnímu vyvážení původně nevyvážené části a odlomená část by mohla poškodit stroj), často může být tento vývoj vibrací způsoben vlivem nesprávného zásahu údržby při opravě stroje
- C - tento trend je typický pro postupné poškozování stroje (např. opotřebením)
- D - tento trend může být způsoben např. nevhodným výběrem místa měření nebo špatným uchycením snímače

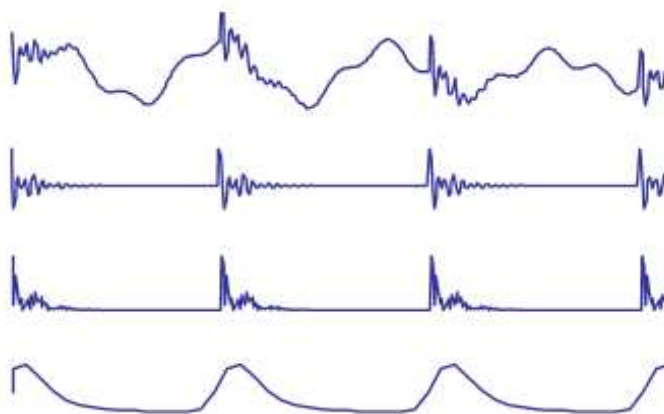


Obr. 9 Trendy celkových hodnot vibrací [8]

1.8.5 Metoda obálky zrychlení

Obálka zrychlení je metoda, jež se používá při extrahování a zvýraznění určité charakteristiky dynamického signálu. Nejčastější aplikace této metody je analýza ložiskových vad a ozubených převodů, vada zde většinou vždy vytváří nízkofrekvenční a obecně opakovací děj s velmi malou amplitudou. Tento děj poté vytváří poměrně značně široké frekvenční spektrum, a proto zde bývají amplitudy harmonických složek frekvencí často ponořeny do šumu. [13]

V prvním kroku metody jsou nejprve odděleny signály vad od nízkofrekvenčních vibrací stroje pomocí pásmového filtrování. Účelem pásmového filtru je potlačení nízkofrekvenčních signálů s velkou amplitudou a zvýraznění pouze vysokofrekvenčních harmonických složek opakujících se impulzních signálů způsobených vadami. Po vyloučení složek signálu s velkou amplitudou je získáno významné zlepšení poměru mezi signálem a šumem, což dovoluje detekci nízkoenergetických harmonických složek od vad. Následně jsou tyto složky konvertovány procesem obálkování do oblastí základních harmonických složek vad a jejich blízkých harmonických násobků. Příklad vytvoření obálky zrychlení popisuje obr. 10. [13]



Obr. 10 Příklad vytvoření obálky zrychlení [8]

V druhém kroku analýzy obálkovou metodou se vytvoří kvadrát filtrovaného časového signálu. Protože se signál od závady opakuje, může být simulován pomocí harmonické řady vln se sinusovým průběhem, které jsou celými násobky frekvencí vad. [13]

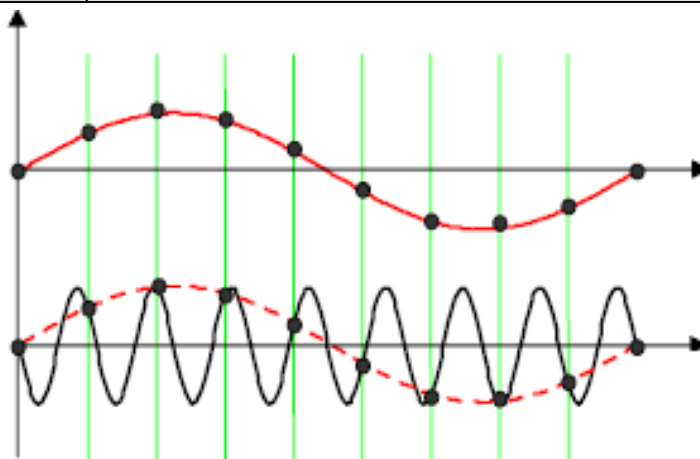
Následuje zpracování periodického impulsu signálu na frekvenční spektrum obálky. Frekvenční spektrum poté jednoznačně určuje amplitudové špičky odpovídající jednotlivým vadám ložiska. V praxi je s největší pravděpodobností nejvhodnějším ukazatelem stavu skutečná špička obálky. Větší hodnota obálky znamená, že existuje i větší budící síla, jež je schopna vyvolat i větší vadu. [13]

1.9 Zpracování signálu

Při měření dat je zpracovaný signál převáděn z analogové do digitální podoby. Důležitým parametrem je proto vhodně zvolená vzorkovací frekvence, která má vliv na výslednou podobu digitálního signálu. Vzorkovací frekvence udává, kolik vzorků za sekundu může daný A/D převodník provést. Udává se ve vzorcích za sekundu, nebo v hertzech. Hodnoty vzorkovací frekvence se mohou pohybovat v širokém rozsahu, v oblasti technických měření jsou obvyklé vzorkovací frekvence v řádu kHz až stovek MHz. V praxi je nejčastější vzorkování s pevnou vzorkovací frekvencí nazývané také periodické nebo sekvenční. Ostatní typy, jako například vzorkování adaptivní nebo náhodné, se užívají jen zřídka. [3]

1.9.1 Aliasing

Princip aliasingu je názorně viditelný na obr. 11, dochází zde ke zkreslení, při kterém je výsledný signál zkreslen oproti signálu původnímu. Setkáváme se s ním tehdy, když je vzorkovací frekvence příliš malá na to, aby reálně zachytila rychlý děj. V diagnostice vzniká při vzorkování signálů v čase u případů, kdy frekvence odebrání vzorků není dostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu. [3,8]



Obr. 11 Princip chyby typu aliasing [8]

Podmínka správného vzorkování je, aby byla vzorkovací frekvence větší, než dvojnásobek nejvyšší frekvence obsažené ve snímaném signálu. Tento poznatek je znám jako Shannonův teorém. Vzorkovací frekvence snímaného signálu, nad níž nastává aliasing, je známá jako Nyquistova frekvence. [3]

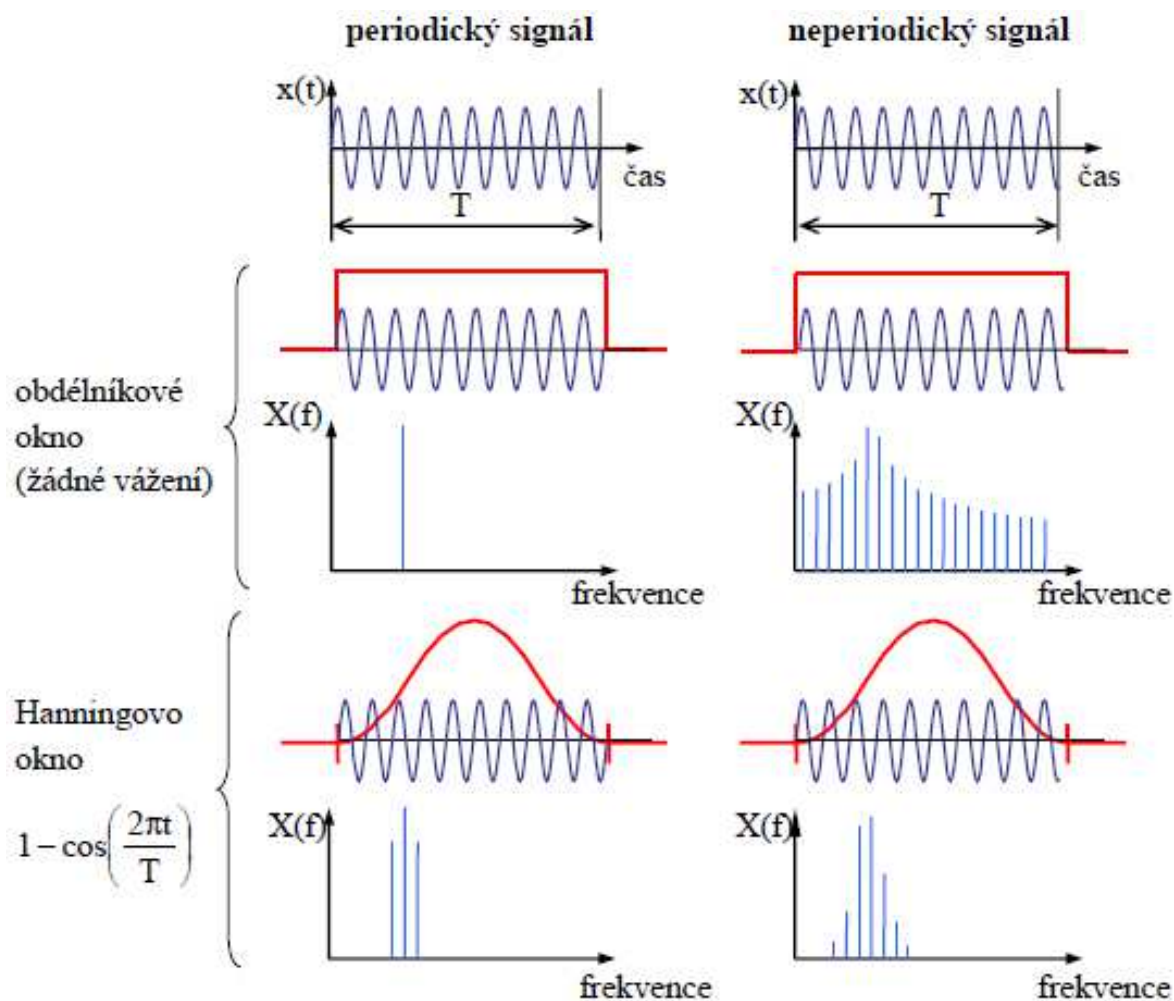
Ochrana proti aliasingu spočívá ve zvýšení vzorkovací frekvence, použití anti - aliasingového filtru, nebo použití nerovnoměrného vzorkování, při kterém se liší časové intervaly mezi jednotlivými vzorky. [3,8]

1.9.2 Chyba únikem

Fourierova transformace předpokládá periodickou funkci. Skutečný signál od vibrací mnohdy nemá výrazně vyznačenou periodu a ani průběh v jednotlivé periodě není úplně stejný. Důsledkem této skutečnosti může být zkreslení spektra takového signálu, který se nazývá únik (leakage). K zamezení chyb únikem se používají váhová okna. [8]

Aby se předešlo chybě únikem, používáme při měření ustálených signálů tzv. okna. Jde o to, aby byl signál na svých koncích potlačen k nule, čímž se odstraní nespojitost a signál se víc přiblíží skutečnému periodickému signálu. Kromě v diagnostice nejčastěji používaného Hanningova okna se používají i další typy oken. [8]

Princip vzniku chyby únikem a vhodné okno pro potlačení této chyby je zobrazeno na obr. 12. Pokud je signál vstupující do Fourierovy transformace periodický, není třeba používat žádné váhové okno. Výsledkem transformace je v případě jednoduché sinusovky jediná spektrální čára, což odpovídá skutečnosti. V případě, že je vstupující signál neperiodický, je vidět, že signál je stejný jako u periodického s výjimkou doby měření, kde vznikne neperiodicita. Výsledkem transformace tady není jediná spektrální čára s odpovídající frekvencí, ale energie „unikla“ do mnoha spektrálních čar, toto spektrum o původním signálu mnoho nevypovídá. [8]



Obr. 12 Vliv periodického signálu a vliv váhových oken na chybu únikem [8]

Hanningovo okno

Hanningovo okno je definováno jako polovina periody kosinu nebo alternativy jedné periody čtvercového sinu

$$w_H(n) = \sin^2\left(\frac{\pi \cdot n}{N}\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right)\right) \quad (6)$$

Kde: $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Zvláště významný je pak fakt, že rovnice (6) je periodická v časovém okně. To znamená, že první hodnota je nulová a poslední hodnota je shodná s druhou hodnotou, jež nula není. Hanningova okna jsou definována třeba v prostředí MATLAB, kde jsou ve výchozím nastavení nastavena jako periodická. U velkých bloků není chyba příliš velká, pro menší bloky může být chyba o to výraznější. Hanningovo okno mírně změní amplitudu signálu, v provozních měřeních to ale není závadou. [1,8]

Okno s plochým vrchem (FLAT TOP)

Toto okno se používá pro kalibraci snímačů, nezkrsluje totiž amplitudu.

Přechodové okno (TRANSIENT)

Jedná se o obdélníkové okno, které trvá kratší dobu, než je doba měření, dá se tedy použít pro krátce působící signály, jako je třeba rázové buzení.

Exponenciální okno

Používá se pro měření odezvy způsobené rázovým buzením.

2 EXPERIMENT

Měření vibrací bylo provedeno na frézce MCV 750 QUICK (obr. 13). Daná frézka se nachází na fakultě strojního inženýrství v laboratoři C1, jde o vertikální obráběcí centrum hodící se jak pro sériovou, tak pro kusovou výrobu tvarově složitých součástí. Mezi přední výhody frézky je uváděna i vysoká tuhost konstrukce stroje. [10]



Obr. 13 Frézka MCV 750 QUICK [10]

2.1 Měřicí aparatura

Celá měřicí aparatura se skládala z tříosého piezoelektrického akcelerometru, který byl upevněný na vřetenu stroje. Tento akcelerometr byl napojený pomocí optického kabelu na měřicí kartu, která byla umístěna v zásuvném modulu. Modul i s kartou byly zároveň propojeny s notebookem pomocí USB, jež zároveň zajišťoval i jejich napájení. Pro měření byl použit program NI Signal Express 2015.

2.1.1 Tříosý akcelerometr PCB 356B18

Pro snímání vibrací na vřeteni stroje byl použit tříosý piezoelektrický akcelerometr (obr. 14) od firmy PCB PIEZOTRONICS. Snímač byl na vřeteno připevněn pomocí vosku. Jak výrobce uvádí, díky své poměrně nízké hmotnosti nijak neovlivňuje měření, poskytuje vynikající odezvu signálu a má široký frekvenční rozsah. Výrobce doporučuje pravidelné roční kalibrační cykly a také překalibrování vždy po utrpění významného teplotního výkyvu, šoku, nebo po výskytu nežádoucího či nepřiměřeného zatížení. [11]



Obr. 14 Třiosý akcelerometr PCB 356B18 [11]

Technické parametry od výrobce:

Tab. 2 Parametry třiosého akcelerometru PCB 356B18 [11]

Hmotnost	25 g
Frekvenční rozsah	0,5–5 000 HZ
Citlivost	102 mV/(m/s ²)
Rozlišení	0,000 5 m/s ² rms
Příčná citlivost	≤ 1%
Přenosová citlivost	≤ 5%
Pracovní teplota	29 °C až + 77 °C
Rezonanční frekvence	≥ 20 kHz

2.1.2 Analogová měřicí karta NI 9234

NI 9234 je čtyřkanálový sběrný modul (obr. 15) od firmy National Instruments. Čtyři vstupní kanály jsou schopny současně digitalizovat signál při rychlostech až 51,2 kHz. Na každém kanálu je vestavěný anti-aliasingový filtr, který se automaticky přizpůsobí dané vzorkovací frekvenci. [12]



Obr. 15 Analogová měřicí karta NI 9234 [12]

2.1.3 Zásuvný modul NI cDAQ - 9174

Jde o čtyřslotový zásuvný modul (obr. 16) od firmy National Instruments, který umožňuje zapojení až čtyř univerzálních 32-bitových čítačů (měřících karet). Je určen pro malé přenosné testovací systémy na různá měření. Modul je určený pro různá měření od sensorových měření včetně termočlánků, RTD tenzometrů, tlakových převodníků atd. Tento modul kombinuje senzory měření s napětím k vytváření vlastních aktuálních a digitálních signálů pro různé měřicí systémy zapojené pomocí USB kabelu k PC nebo k notebooku. [12]



Obr. 16 Zásuvný modul NI cDAQ - 9174 [12]

2.1.4 Program NI Signal Express 2015

NI Signal Express 2015 poskytuje interaktivní měření pracovního stolu pro rychlý sběr, analýzu i prezentaci dat ze stovek zařízení pro sběr dat a nástrojů bez nutnosti programování. Program používá intuitivní prostředí drag-and-drop k okamžitému získávání údajů, také umožňuje provádění pokročilé analýzy a vytváření vlastních zpráv. Program poskytuje podporu pro modulární i jednotlivé nástroje jak rychleji zautomatizovat protokolování dat a kontrolování přístrojových aplikací. Umožňuje také vytvářet vlastní uživatelské rozhraní, přidávání pokročilých analýz nebo třeba přidávání vlastní logiky. Vytvořenou zprávu je možné snadno exportovat do programu LabVIEW, DIADem, nebo třeba Microsoft Excel. [12]

2.2 Postup měření

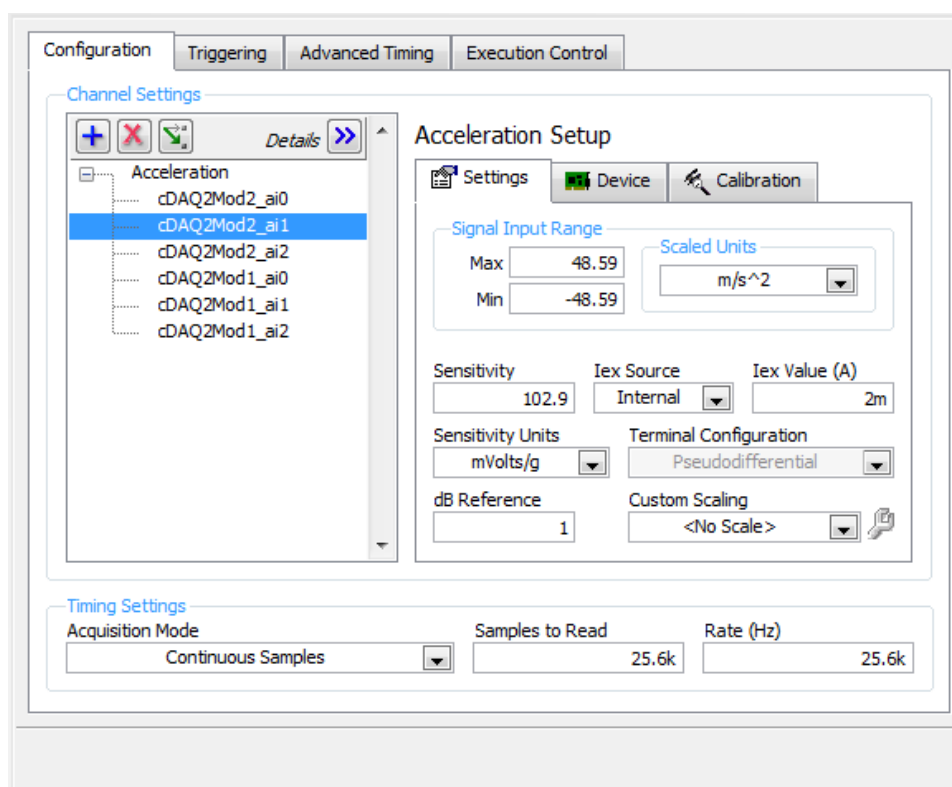
Cílem měření bylo nasnímat vibrace na příslušném obráběcí stroji. V prvním kroku bylo nutno nejprve určit vhodné místo pro uchycení akcelerometru. To bylo zvoleno na horizontální straně stroje nad vřetenem (viz Obr. 18), vzhledem k tvaru vřetena nebylo možné upevnit snímač přímo na něj, protože snímač musí dosedat celou plochou. Tento snímač byl upevněn na stroj pomocí vosku. Dále bylo třeba nastavit senzitivitu a provést přepočet rozsah snímače na daných měřících kanálech, to proběhlo přímo v programu NI Signal Express 2015. Příklad provedení podle zadaných parametrů od výrobce viz obr. 17. Nastavení snímačů a jejich název je zobrazen v tab. 4.

Po připojení snímače bylo nutno chvíli počkat, než se náboje ve snímači ustálí na stejnou hladinu.

V dalším kroku bylo nutno nastavit obráběcí stroj, v tomto případě frézku MCV 750 QUICK. Pro náš experiment byla nejprve nastavena rychlost otáček vřetene, která byla $953 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a parametry, které se dále měnily jako posuvová rychlost a hloubka ubíraného materiálu viz tab. 5. V další části, kterou bylo měření vřetene, jsme provedli postupné zvyšování otáček, a to v rozmezí od $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ do $8\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ s krokem $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, kde na každé hladině otáček vřeteno setrvalo 10 s.

Tab. 3 Nastavení Snímačů

Název snímače	Měřená osa	Snímač	Rozsah [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]	Citlivost [$\text{mV}/(\text{m/s}^2)$]
cDAQ2Mod1_ai0	X	tříosý	-4,81 až 4,81	1 038
cDAQ2Mod1_ai1	Y	tříosý	-5 až 5	1 000
cDAQ2Mod1_ai2	Z	tříosý	-4,82 až 4,82	1 037



Obr. 17 Nastavení senzitivity

Celá soustava byla propojena kabelem, který bylo nutno umístit tak, aby nemohla být měření žádným způsobem ovlivněna. Celkově tedy bylo naměřeno 5 různých měření ve třech osách na vřetenu stroje. Po provedení všech potřebných měření byl stroj vypnut a veškerá aparatura sklizena.

Tab. 4 Plán měření

Číslo M.	Popis	Doba měření [s]	Rychlost posuvu [mm/zub]	Hloubka záběru [mm]
1	Obrábění	5	0,1	1
2	Obrábění	5	0,2	1
3	Obrábění	5	0,1	3
4	Obrábění	5	0,2	3
5	Pouze spuštěné vřeteno	182	-	-



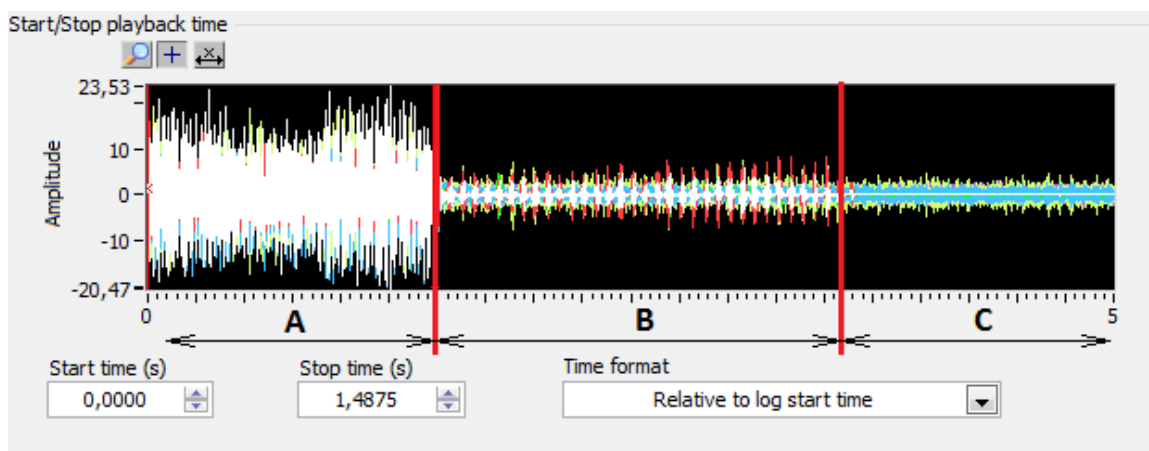
Obr. 18 Připevnění snímačů na měřicí soustavu

3 ANALÝZA MĚŘENÍ

Celá analýza měření byla prováděná v programu NI Signal Express 2015, programu NI DIAdem a programu LABView. Analýza proběhla nejprve ve frekvenční oblasti, poté podle normy ČSN ISO 10816.

3.1 Frekvenční analýza

Před začátkem celé analýzy bylo ještě nutné naměřená data upravit. Neanalyzovala se celá škála měření, neboť ta neobsahuje pouze data z obrábění, ale i část měření, při které se nástroj vrací přes již obrobenou plochu a následný posuv naprázdno. Vše je zakresleno v obr. 19.



Obr. 19 Rozdělení při použití dat:

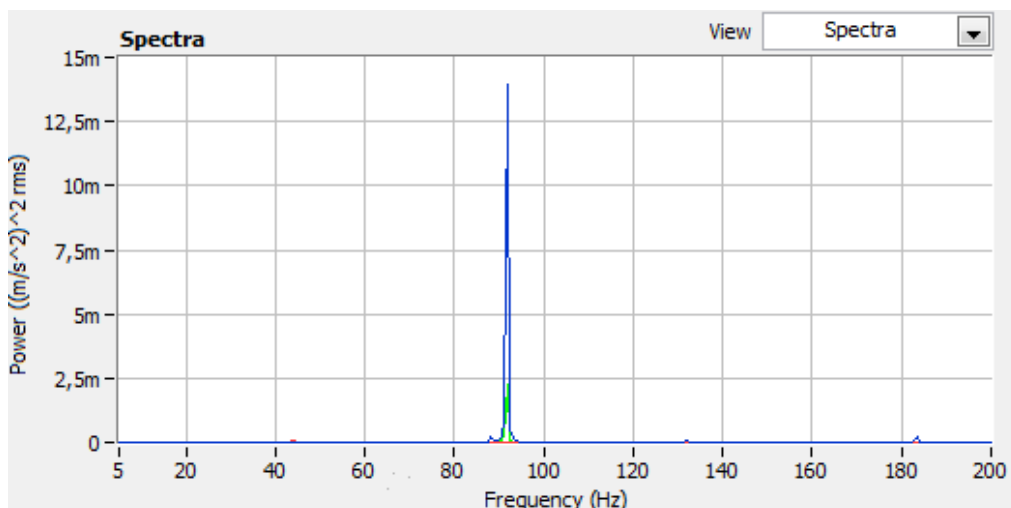
A - oblast obrábění, B - oblast kdy se nástroj vrací přes obrobek, C - oblast volného posuvu

3.1.1 Analýza vřetene stroje

V první řadě bylo nutné analyzovat otáčkovou frekvenci (viz vztah 8), což probíhalo z měření číslo 5. K analýze byly vybrány vibrace nasnímané při otáčkách $5\,500 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$, které dobře charakterizují celé nasnímané spektrum otáček. Pomocí vztahu 8 jsme určili otáčkovou frekvenci 91,6 Hz. Na obr. 20 je možné pozorovat otáčkové vibrace v příslušné frekvenci.

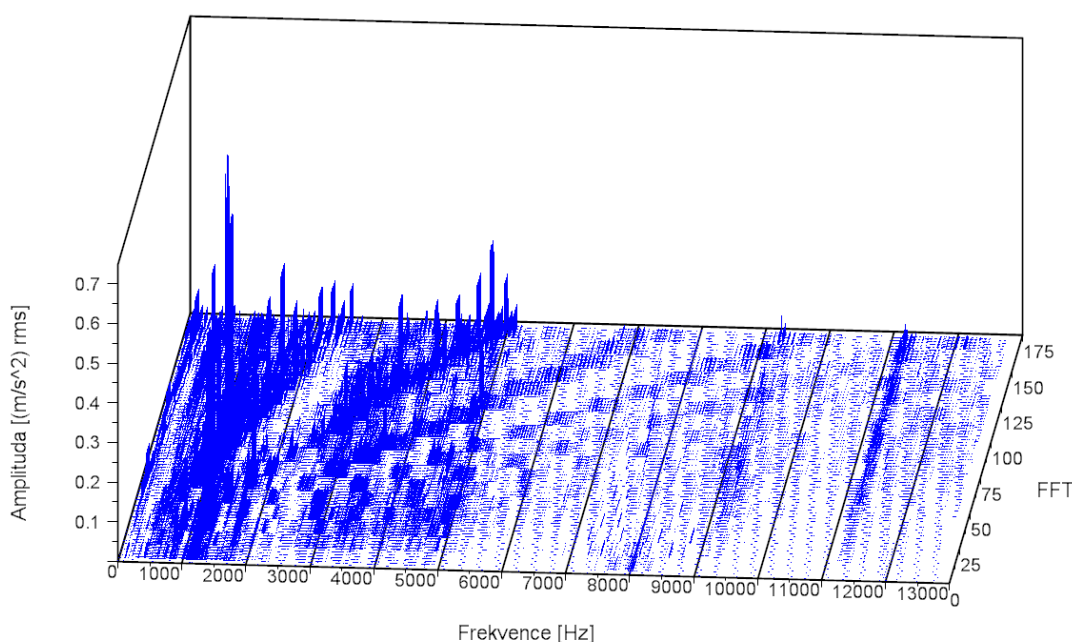
$$f_o = \frac{ot}{60} \quad (7)$$

kde ot = otáčková frekvence vřetene



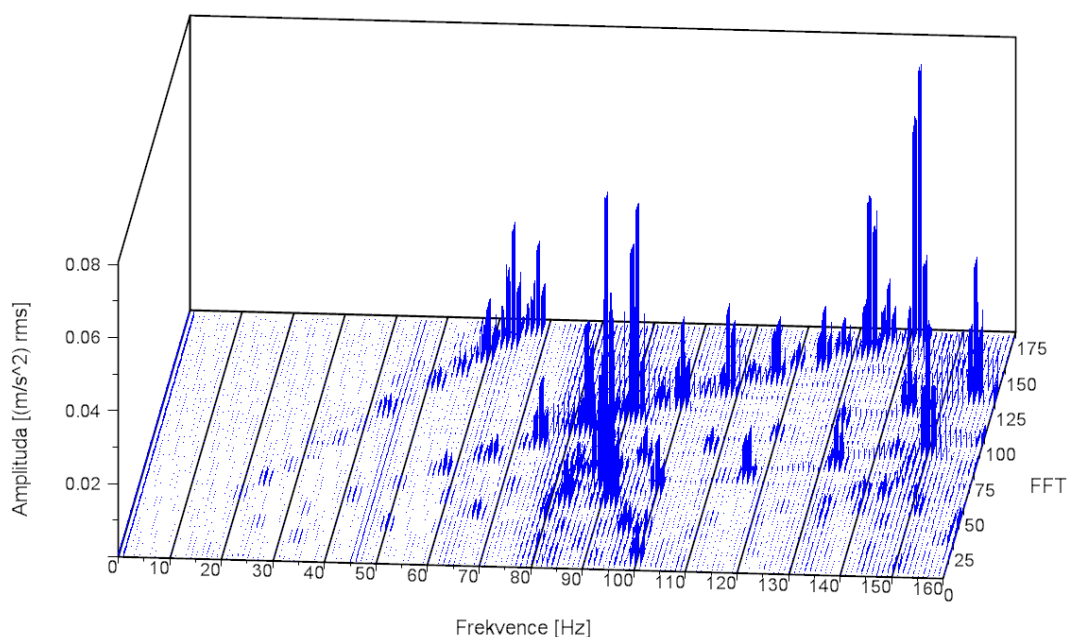
Obr. 20 Otáčková frekvence na vřetení

K určení velké většiny zbytku vibrací ve frekvenčním spektru nebylo dostatek informací o stroji a jeho konstrukčním řešení. Byl proto vytvořen kaskádový graf (obr. 21), který dobře znázorňuje postupný rozvoj a posun vibrací ve frekvenčním spektru v závislosti na zvyšování otáček vřetene. Se vzrůstajícími otáčkami rostly i frekvence na vřetení.



Obr. 21 Kaskádový graf vibrací vřetene v rozsahu 0–13 000Hz

Na kaskádovém grafu je dobře patrné, že u nižších rychlostí nevyhovuje snímač zrychlení podmínkám. U nižších rychlostí by bylo tedy vhodnější použití snímače rychlosti, čímž jsme potvrdili předpoklad z části 2.6.1. Následující kaskádový graf (obr. 22) se zaměřuje speciálně na posunutí otáčkových frekvencí spolu s otáčkami vřetene.



Obr. 22 Kaskádový graf vibrací vřetene v rozsahu 0-160Hz

V dalším kroku byla pomocí obálkové metody hodnocena vibrace od ložiska umístěného na vřeteni. Zde se jedná o jednořadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 71914. Na stránkách SKF byly dohledány jednotlivé frekvence vad vibrací k příslušnému ložisku s vybranými otáčkami (obr. 23).

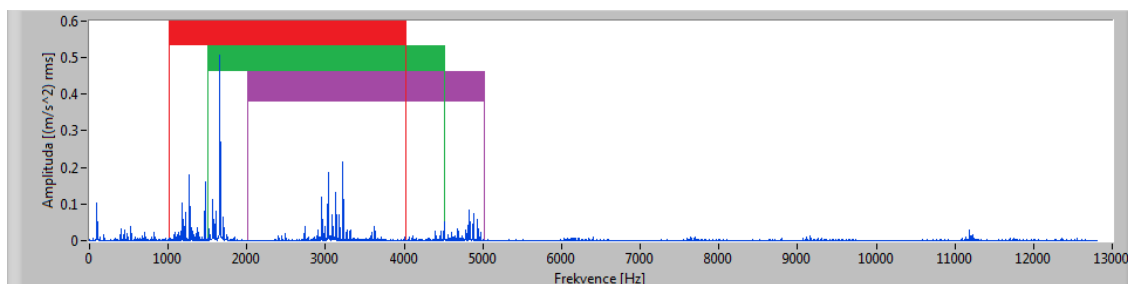
Bearing frequencies : 71914 ACE/HCP4A

Input parameters

n_i	5500 r/min
Rotational speed of the inner ring	
n_e	0 r/min
Rotational speed of the outer ring (only used to calculate the bearing frequencies)	
f_i	91.7 Hz
Rotational frequency of the inner ring	
f_e	0 Hz
Rotational frequency of the outer ring	
f_c	41.2 Hz
Rotational frequency of the rolling element and cage assembly	
f_r	405.3 Hz
Rotational frequency of a rolling element about its own axis	
f_{ip}	1110.6 Hz
Over-rolling frequency of one point on the inner ring	
f_{ep}	906.1 Hz
Over-rolling frequency of one point on the outer ring	
f_{rp}	810.6 Hz
Over-rolling frequency of one point on a rolling element	

Obr. 23 Parametry ložiska 71914 ACE/HCP4A na vřetenu [12]

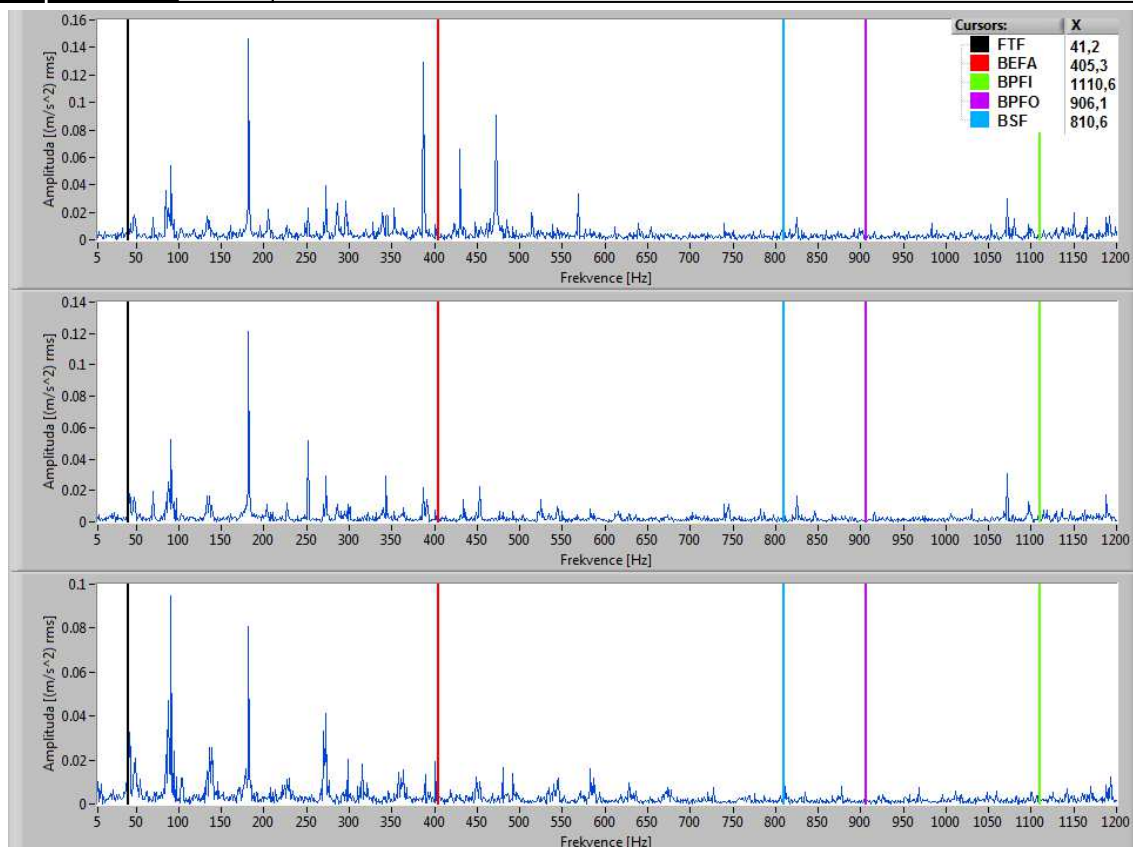
Nutné bylo určit filtry obálkové metody pro Fourierovu transformaci, dolní hranice filtru byla určena jako desetinásobek otáčkové frekvence, což je zhruba 1 kHz. Hodnota horní hranice nastavení filtru byla 5 kHz, protože příslušný snímač je vhodný pro použití na snímání frekvencí jen do velikosti 5 kHz. Nastavení filtrů je znázorněno v obr. 24.



Obr. 24 Znázornění jednotlivých pásem filtrů

Červená barva přísluší filtru s rozsahem 1 000–4 000 Hz, zelená barva připadá filtru 1 500–4 500 Hz a fialová značí filtr s rozsahem 2 000–4 000 Hz

Poté byly vytvořeny obálky zrychlení pro příslušné filtry a v nich vyznačeny frekvence vad v ložiscích (obr. 25).



Obr. 25 Obálka FFT

První graf je pro filtr 1 000–4 000 Hz, druhý graf pro filtr 1 500–4 500 Hz a třetí graf je pro filtr s rozsah 2 000–4 000 Hz

Žádná z příslušných vibrací nebyla nalezena, z čehož můžeme usoudit, že ložisko na vřetenu pracuje správně a nevykazuje žádnou vadu.

3.2 Hodnocení výstrahy a přerušení chodu vřetene

Hodnocení výstrahy a přerušení provozu bylo inspirované normou ČSN ISO 10816, zvolena byla rychlost 5 500 ot/min. Doporučení výstrahy a přerušení chodu stroje tedy bude vypočteno pouze pro tyto otáčky. Pro vypočtení efektivní hodnoty byl signál podroben filtru o rozsahu 10–5 000 Hz. Použit byl pouze jeden filtr. A to z důvodu výskytu vad na ložiscích, které se nevyskytují pouze v oblasti desetinásobku otáčkové frekvence, ale i v oblasti pod otáčkovou frekvencí, jako je tomu např. u vady na kleci ložiska. To bylo provedeno v programu Ni Signal Express. Následně byl v programu signál převeden pomocí integrace na rychlost. Poté byla celá oblast ve zvolených otáčkách rozdělena na 20 částí po 0,5 s. Z nichž pak byly vypočteny efektivní hodnoty (viz tab. 5). K přepočtu signálu na rychlost, rozdělení dat i výpočtu efektivní hodnoty (vztah 8) byl použit program LABView (obr. 26).

$$o = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i)^2}}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

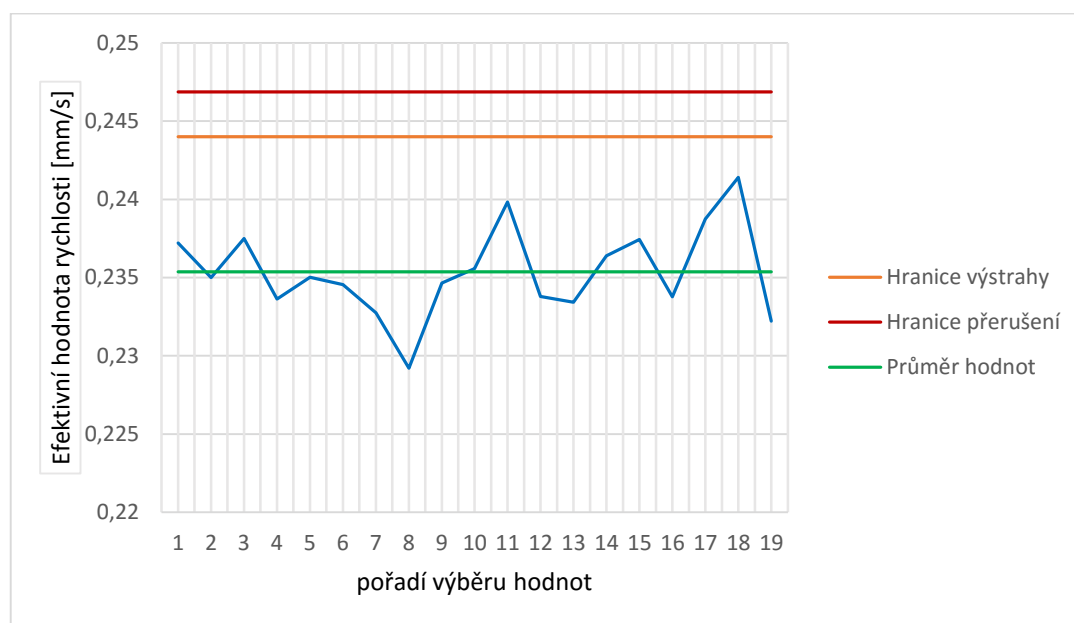
m [1] počet diskrétních hodnot bodů v příslušném časovém záznamu



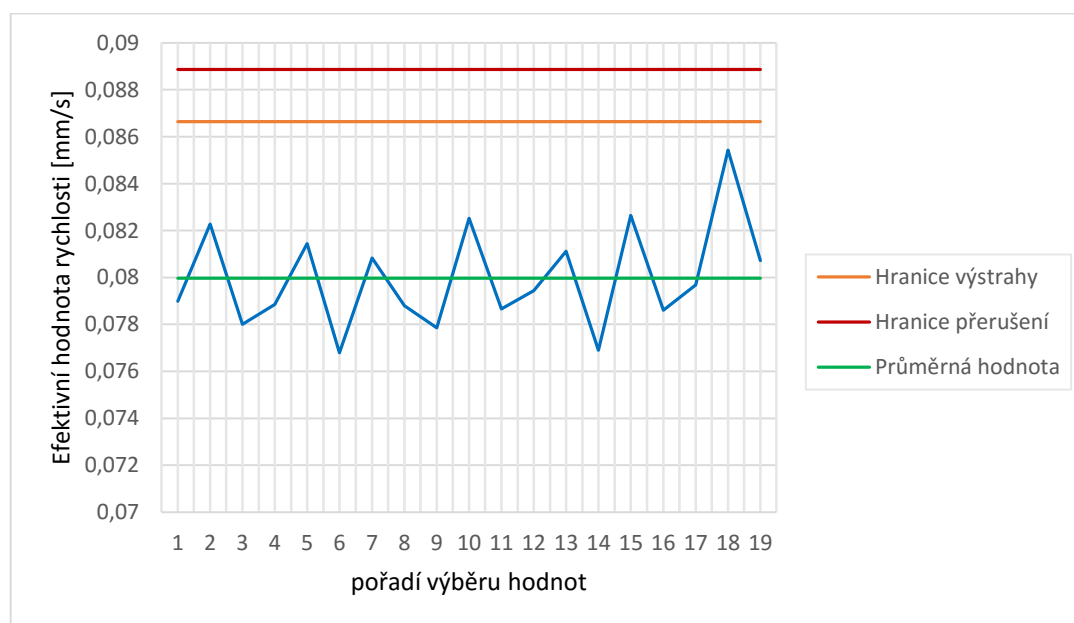
Tab. 5 Celková efektivní rychlost vibrací

50

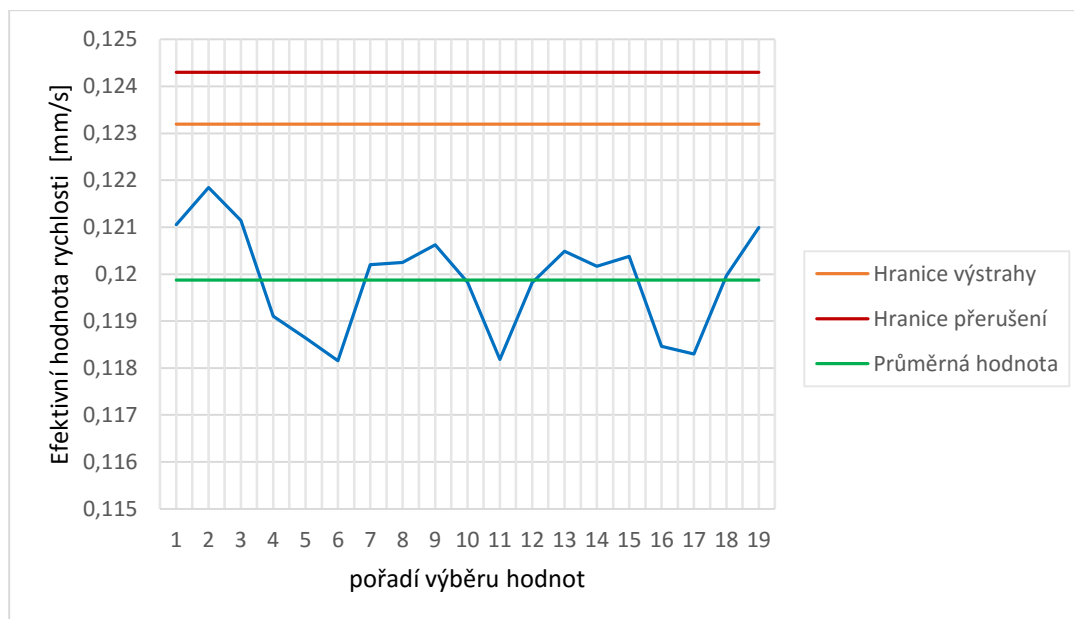
Červeně vyznačené hodnoty nebyly brány v úvahu, neboť jsou zatíženy chybou z důvodů najíždění vřetena na příslušné otáčky. Následně byl z výběru hodnot spočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Z nichž pak byla určena hranice výstrahy a hranice přerušení. Hranice výstrahy byla, za předpokladu normálního rozdělení, určena o velikosti 3 směrodatných odchylek. Do tohoto pásma by za normálních podmínek mělo spadat 99,73% hodnot. Překročení této hranice by tedy upozornilo na přítomnost neobvyklého vlivu. Hranice přerušení provozu byla stanovena o velikosti 4 směrodatných odchylek. Hodnoty pro každou osu byly zaneseny do grafu (obr. 27-29).



Obr. 27 Stanovené hranice pro osu x



Obr. 28 Stanovené hranice pro osu y



Obr. 29 Stanovené hranice pro osu z

3.3 Vztahu mezi kvalitou povrchu a příslušnými vibracemi

Pro vyjádření vztahu mezi kvalitou povrchu a vibracemi byly vytvořeny 3D snímky modelu textury povrchu z obrobku (obr. 30). Ty pak byly porovnány s příslušným frekvenčním spektrem vibrací. Již pouhým okem byly pozorovatelné významné rozdíly mezi povrchy obrobenými jak za různých rychlostí posuvu frézy, tak za různé hloubky záběru. Frekvenční spektrum se zaměřilo na oblast 0–200 Hz, speciálně pak na frekvenci od nástroje 64 Hz. Tato frekvenční oblast má největší vliv na kvalitu obráběného povrchu. Největší význam pro nás mají vibrace v ose z, vibrace v ose x a y by měly mít jen menší vliv vzhledem k posuvu nástroje.

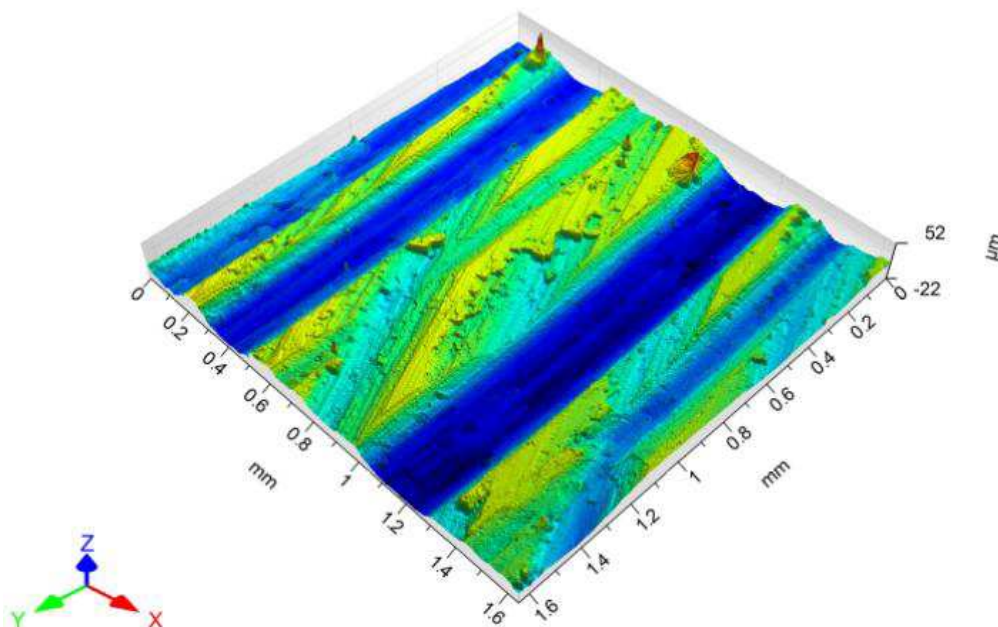


Obr. 30 Obrobek (čísla značí rychlost posuvu nástroje)

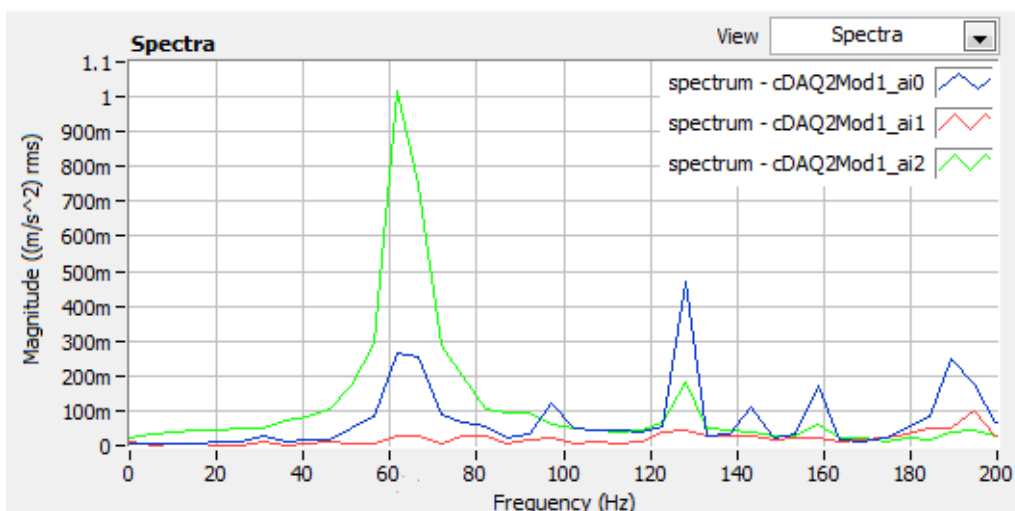
Na obrázku č. 31 je 3D snímek textury povrchu z měření č. 1 s posuvem 0,1 mm/zub a hloubkou záběru 1 mm. Tabulka 6 poté popisuje jednotlivé parametry drsnosti z příslušného místa obrobku.

Na obrázku č. 32 jsou znázorněny vibrace při měření č. 1.

Všechny tabulky parametrů drsností jsou uvedeny v Přílohách č. 2.



Obr. 31 Snímek povrchu obráběného m. č. 1

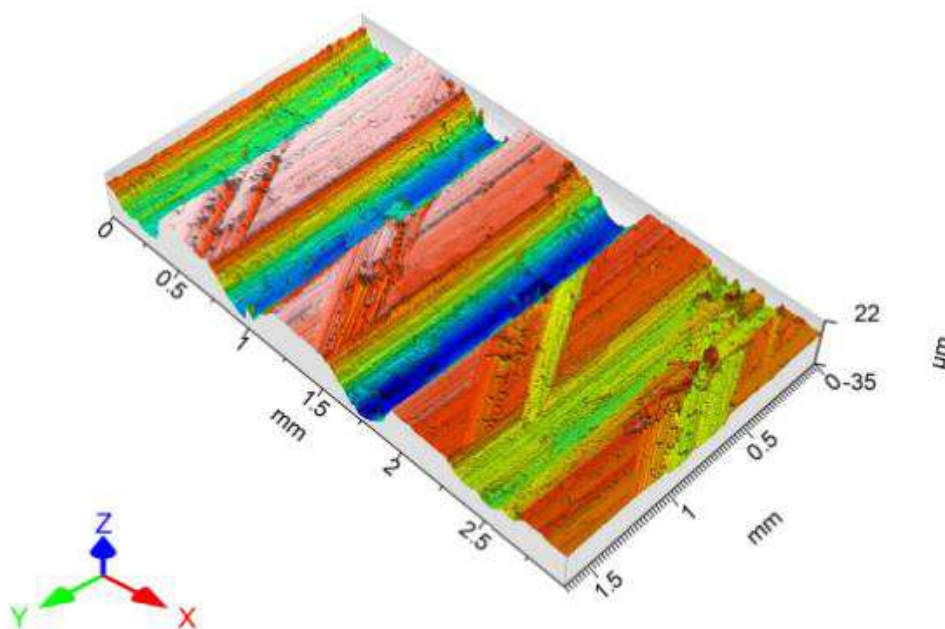


Obr. 32 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 1

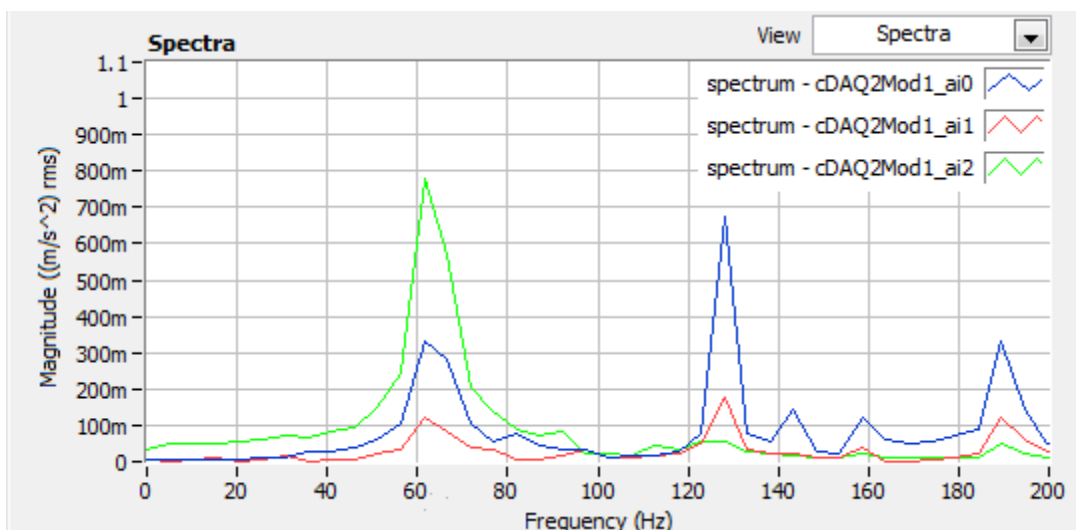
Z měření je patrné, že vibrace především v ose z měly na obrábění velký vliv, při měření č. 1 dosáhly vibrace velikosti zhruba 1 m/s². Obrobený povrch je nekvalitní a vykazuje stopy po obrábění, a to jak od přední strany nástroje, který vytvořil hlubší stopy na povrchu, tak od jeho zadní strany, která na již obrobeném povrchu vytvořila rýhy. Dá se usuzovat, že se fréza při obrábění po najetí do obrobku naklonila, což by vysvětlovalo jak seskupení nedokonalostí povrchu, tak velký výskyt vibrací v ose z. Špičaté výrůstky ve snímku textury

povrchu jsou způsobeny dopočítáním chybějících dat, taktéž výskyt černých bodů je zapříčiněn chybějícími daty.

Obrázek č. 33 je 3D snímek textury povrchu z měření č. 2 s posuvem 0,2 mm/zub a hloubkou záběru 1 mm. Tabulka 7 popisuje jednotlivé parametry drsnosti z příslušného místa obrobku. Na obrázku č. 34 jsou znázorněny vibrace při měření č. 2.



Obr. 33 Snímek povrchu obráběného m. č. 2

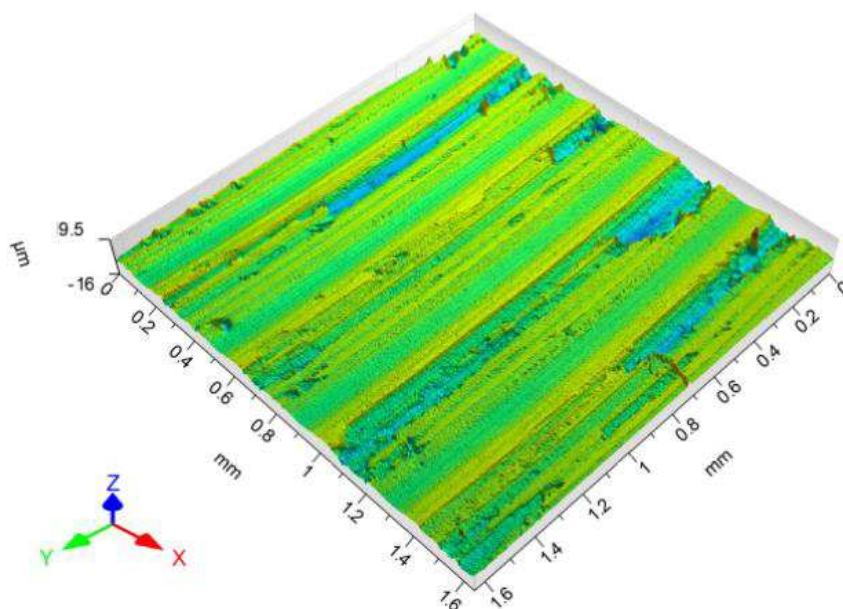


Obr. 34 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 2

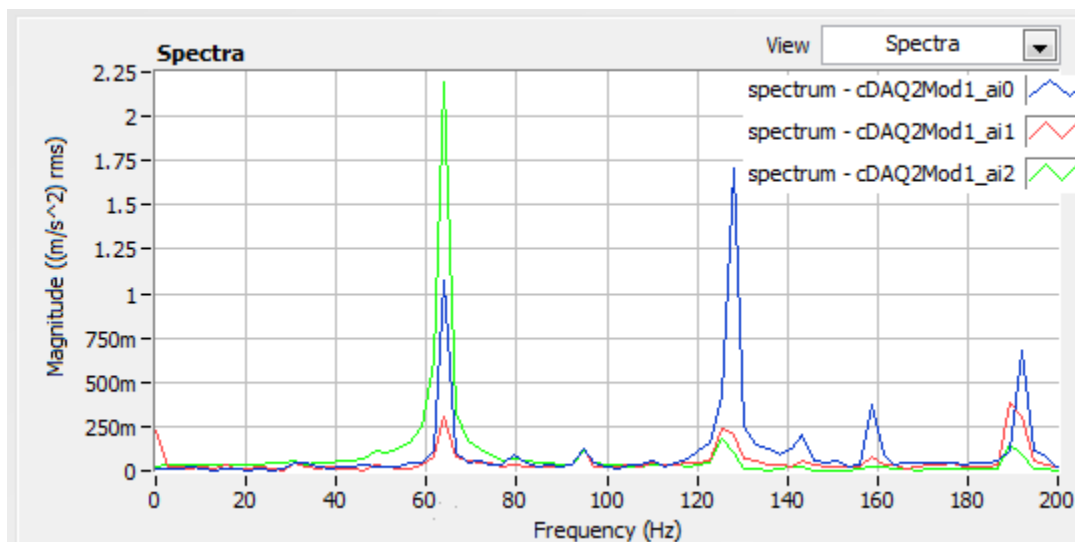
Při porovnání jednotlivých parametrů drsnosti povrchu s ostatními je patrná nevýznamnější nekvalita povrchu ze všech provedených měření vůbec. Podobně jako v případě měření č. 1 můžeme pozorovat velmi výrazné stopy od nástroje. Tyto stopy opět mohou být způsobeny nakloněním frézy po najetí do obrobku. Dále se zde zřejmě silně projevuje fakt, že při celém experimentu nebylo zapnuté mazání, které by mohlo mít na kvalitu povrchu také významný vliv. Naměřené zrychlení vibrací v ose z je zde ve srovnání s ostatními

měřeními nejnižší, jeho velikost ve frekvenci od nástroje zde byla necelých 800 rms, taktéž zde měla negativní vliv vyšší posuvová rychlost.

Při měření č. 3, kde byl obrobek obráběn při rychlosti 0,1 mm/zub s hloubkou záběru 3 mm, můžeme na obrázku č. 35 a v tabulce č. 8 pozorovat dosažení nejkvalitnějšího povrchu ze všech čtyř měření. Přesto není kvalita povrchu v rámci běžné praxe dostačující.



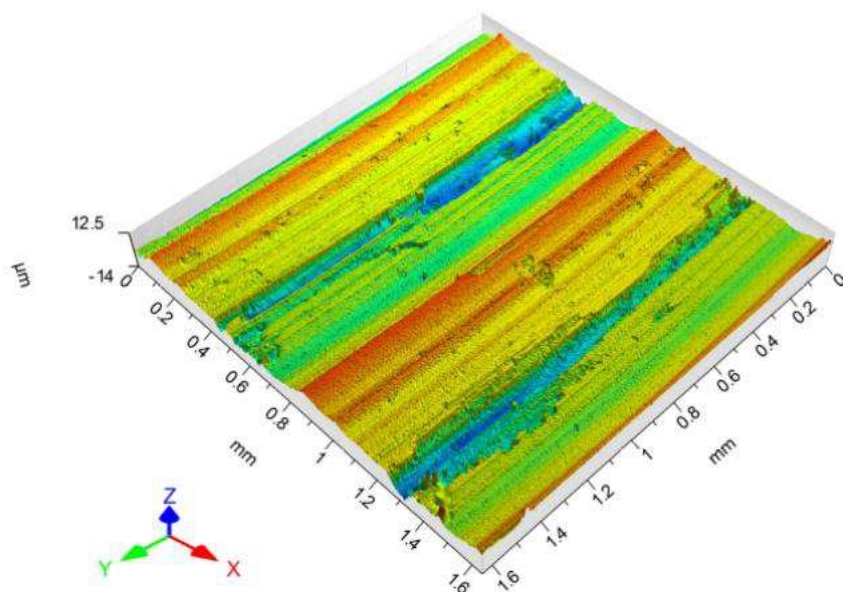
Obr. 35 Snímek povrchu obráběného m. č. 3



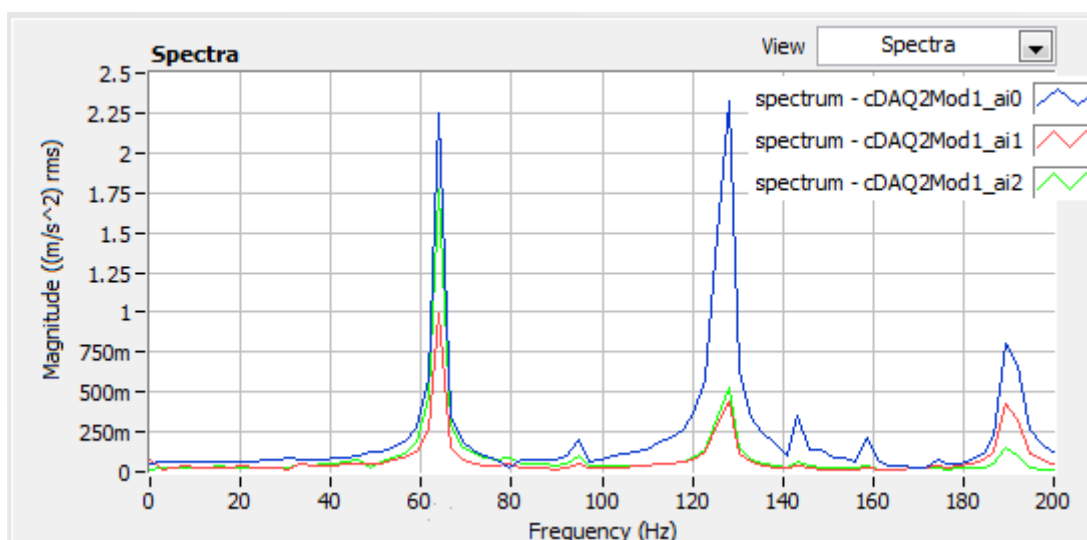
Obr. 36 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 3

Na povrchu můžeme pozorovat místa, která odpovídají vytržení materiálu, to mohla zapříčinit špatná volba nástroje nebo jeho neostrost. I přes jisté vady se zde jedná o nejkvalitnější povrch. V tomto měření se také vůbec nejsilněji projevují vibrace v ose z (obr. 36). Vibrace zde dosahovaly hodnoty téměř $2,25 \text{ m/s}^2$. Můžeme zde pozorovat vzájemnou závislost mezi nejlepším povrchem a nejsilnějším naměřeným zrychlením vibrací v ose z ve frekvenci od nástroje 64 Hz.

U měření č. 4, bylo použito hloubky záběru 3 mm a rychlejšího posuvu 0,2 mm/zub.



Obr. 37 Snímek povrchu obráběného m. č. 4



Obr. 38 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 4

Textura povrchu (obr. 37) a parametry drsnosti (tab. 9) poukazují na kvalitnější povrch, než tomu bylo v měření č. 1 a 2. Je zde opět patrné vytrhávání materiálu z povrchu. Sledované vibrace v ose z (obr. 38) jsou zde nižší, než tomu bylo u předchozího měření. Velikost těchto vibrací dosahovala hodnot $1,75 \text{ m/s}^2$, v zubové frekvenci se projevují silné vibrace v ose x (až $2,25 \text{ rms}$).

4 VYUŽITÍ VIBRACÍ PRO DIAGNOSTIKU

Vibrodiagnostika je velmi užitečný nástroj pro odhalování skutečného stavu zařízení, a to ve všech provozech, kde se nacházejí stroje s rotačním, nebo vratným pohybem. Její největší výhody spočívají v jejím univerzálním použití přímo v provozních podmínkách bez nutnosti demontáže stroje. K naměření příslušných vibrací stačí pouze umístění vybraného snímače na části stroje, jejichž stav chceme zjistit. Pomocí frekvenčních analýz signálu je možné rychle přiřadit jednotlivé složky vibrací přímo k součástem stroje, nebo je přisoudit provozním příčinám.

Pomocí analýzy vibrací můžeme diagnostikovat charaktery nejběžnějších závad rotačních strojů. Jsme schopni diagnostikovat závady, jako jsou nevyváženost, nesouosost. Také jsme schopni zjistit závady na celých rotorových systémech, kluzných i valivých ložiscích, na řemenových i ozubených převodech, nebo třeba v neposlední řadě na elektromotorech.

Díky vibrodiagnostice jsme tedy schopni prodloužit doby mezi plánovanými odstávkami, maximalizovat životnost strojního zařízení a optimalizovat tak náklady na údržbu, minimalizovat výskyt neplánovaných výpadků a prostojů, ochránit stroje před rozsáhlými mechanickými poruchami a odstranit nepotřebnou údržbu.

5 ZÁVĚR

V práci bylo rozebráno několik úkolů, jako seznámení s problematikou vibrodiagnostiky na obráběcích strojích, byly zde popsány jednotlivé přístroje sloužící k měření a zanalyzovány postupy měření.

V části analýzy vřetene byla provedena analýza vibrací zaměřená na diagnostiku vad ložiska. Také byl zkoumán vztah mezi nasnímanými vibracemi a zvyšováním otáček, jehož výsledek prokázal předpoklad růstu frekvencí vibrací spolu se zvyšováním otáček. Za pomoci obálkové metody byla provedena obálka zrychlení FFT, kde byly vyznačeny frekvence od vad ložiska. Nebyly zde nalezeny žádné vady, z čehož vyplývá, že dané ložisko pracuje bez závad.

Vzhledem k relativně nízkým pořizovacím nákladům a vyhodnocení inspirované normou ČSN ISO 10816 je doporučením pro praxi vybavit frézku použitým vybavením pro provádění úzce specifické diagnostiky vibrací zaměřené právě na diagnostiku ložisek. Obsluha stroje by byla schopná poruchy detekovat již před jejich rozvojem. Akcelerometr by byl na vřeteno stroje připevněn nastálo pomocí šroubů, optické kabely by byly připevněné ke stroji a byly by vedeny k zařízení pro sběr dat s příslušnou analogovou měřicí kartou, které by bylo vhodně umístěné poblíž obráběcího stroje. V práci použité zařízení pro sběr dat by mohlo být nahrazeno zařízením NI cDAQ-9181, také od firmy National Instruments. To obsahuje jeden slot pro měřicí kartu a je také vybaveno ethernetovým konektorem, pomocí kterého by se naměřená data přenášela do počítače s příslušným programem. K měření vibrací by mohla být použita stejná analogová karta, jaká je použita v diplomové práci, tedy NI 9234. Počítač by vyhodnocoval míru vibrací dle předem stanovených pásem výstrahy a přerušení provozu pro příslušné otáčky. Vzhledem k nízkému počtu měření by bylo nutné tyto hranice před zavedením ověřit a vyzkoušet v provozu.

Při určování vztahu mezi naměřenými hodnotami vibrací a vyhodnocenou kvalitou příslušných povrchů, byla potvrzena závislost na velikosti vibrací v ose z. Čím větší vibrace byly ve frekvenci od nástroje naměřeny, tím kvalitnějšího povrchu bylo dosaženo. Závislost vibrací mezi osami x, y a kvalitou povrchu jsme neprokázali, tato skutečnost byla předpokládána. Vibrace v ose x by mohly mít vliv na shlukování seskupení stop po obrábění, jejich velikost však zřejmě nebyla dostačující, aby byly rozdíly pozorovatelné. K jednoznačnému prohlášení o závislosti vibrací na kvalitě povrchu by však bylo nutno provést mnohem větší počet měření než bylo provedeno. Na kvalitu povrchu měly také rozhodující vliv řezné podmínky, lepší kvality bylo dosaženo při větší hloubce záběru, stejně tak jsme lepší kvality dosáhli při použití nižšího posuvu nástroje. Náš experiment byl ovlivněn řadou jiných vlivů jako obrábění bez mazání, volba nástroje, celková geometrie nástroje při obrábění, či pozadí vibrací, které jsem se snažil z měření odfiltrovat.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRANDT A., *Noise and Vibration Analysis and Experimental Procedures*. Denmark, University of Denmark, 2010. ISBN 978-0-470-74644-8
- [2] HAMMER, Miloš., *Technická Diagnostika II, přednášky 2015*. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství.
- [3] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [4] NAVRÁTIL, Miroslav, PLUHAR, Oldřich. *Měření a analýza mechanického kmitání*. Praha, 1986. 401s. ISBN 04-214-86
- [5] ZUTH, Daniel, VDOLEČEK, František. *Snímače a měřicí technika: Měření vibrací ve vibrodiagnostice* [online]. FSI VUT v Brně, 2010 [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [6] KARBAN, Pavel. *KTE/TEVS - Rychlá Fourierova transformace* [online]. 2011 [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf
- [7] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 3.vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [8] BILOŠ, Jan, BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část vibrační diagnostika*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2012. 142 s.
- [9] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [CD-ROM]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5
- [10] KOVOSVIT MAS. MCV 754 QUICK [online] <http://www.kovosvit.cz/cz/produkty/technologie-frezovani/vertikalni-obrabeci-centra/mcv-750>
- [11] PCB PIEZOTRONICS. MODEL: 356B18/ACS-5T [online] http://www.pcb.com/products.aspx?m=356B18_ACS-5T
- [12] NATIONAL INSTRUMENTS: NI 9234 [online] <http://sineni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/207535>
- [13] JANKOVÝCH, R., *Vibrační diagnostika odměrových mechanismů tanků*. Habilitační práce. Brno: Vojenská akademie v Brně 2004, 149 stran.

- [14] SKF, BEARING CALCULATOR [online]
<http://www.skf.com/cz/knowledge-centre/engineering-tools/skfbearingcalculator.html>
- [15] BREPTA, Rudolf, PŮST, Ladislav, TUREK, F.: *Mechanické kmitání*.
Praha: Sobotáles, 1994. ISBN 80-901684-8-5

7 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

7.1 Seznam zkratk

aj.	- a jiné
atd.	- a tak dále
např.	- například
obr.	- obrázek
ot.	- otáčky
tab.	-tabulka
tzv.	-tak zvaný

7.2 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Harmonický průběh vibrací [3]</i>	18
<i>Obr. 2 Průběh složené vibrace [3]</i>	19
<i>Obr. 3 Náhodný průběh vibrací [3]</i>	19
<i>Obr. 4 Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [8]</i>	22
<i>Obr. 5 Absolutní a relativní vibrace [3]</i>	22
<i>Obr. 6 Omezení při měření [8]</i>	23
<i>Obr. 7 Absolutní elektrodynamické snímače rychlosti</i>	24
<i>Obr. 8 Uspořádání piezoelektrických akcelerometrů:</i>	25
<i>Obr. 9 Trendy celkových hodnot vibrací [8]</i>	33
<i>Obr. 10 Příklad vytvoření obálky zrychlení [8]</i>	34
<i>Obr. 11 Princip chyby typu aliasing [8]</i>	35
<i>Obr. 12 Vliv periodického signálu a vliv váhových oken na chybu únikem [8]</i> ..	36
<i>Obr. 13 Frézka MCV 750 QUICK [10]</i>	39
<i>Obr. 14 Třiosý akcelerometr PCB 356B18 [11]</i>	40
<i>Obr. 15 Analogová měřicí karta NI 9234 [12]</i>	40
<i>Obr. 16 Zásuvný modul NI cDAQ - 9174 [12]</i>	41
<i>Obr. 17 Nastavení senzitivity</i>	42
<i>Obr. 18 Připevnění snímačů na měřicí soustavu</i>	43
<i>Obr. 19 Rozdělení při použití dat:</i>	45
<i>Obr. 20 Otáčková frekvence na vřetení</i>	46
<i>Obr. 21 Kaskádový graf vibrací vřetene v rozsahu 0–13 000Hz</i>	46
<i>Obr. 22 Kaskádový graf vibrací vřetene v rozsahu 0-160Hz</i>	47
<i>Obr. 23 Parametry ložiska 71914 ACE/HCP4A na vřetenu [12]</i>	48
<i>Obr. 24 Znázornění jednotlivých pásem filtrů</i>	48
<i>Obr. 25 Obálka FFT</i>	49
<i>Obr. 26 Program na výpočet efektivních hodnot</i>	50
<i>Obr. 27 Stanovené hranice pro osu x</i>	51
<i>Obr. 28 Stanovené hranice pro osu y</i>	51
<i>Obr. 29 Stanovené hranice pro osu z</i>	52
<i>Obr. 30 Obrobek (čísla značí rychlost posuvu nástroje)</i>	52

<i>Obr. 31 Snímek povrchu obráběného m. č. 1</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 32 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 1.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 33 Snímek povrchu obráběného m. č. 2</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 34 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 2.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35 Snímek povrchu obráběného m. č. 3</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 36 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 3.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37 Snímek povrchu obráběného m. č. 4</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 Frekvenční spektrum vibrací při m. č. 4.....</i>	<i>56</i>

7.3 Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Přehled současného stavu vibrační diagnostiky [13]</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2 Parametry tříosého akcelerometru PCB 356B18 [11]</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 3 Nastavení Snímačů.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4 Plán měření.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5 Celková efektivní rychlost vibrací.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6 Parametry drsnosti povrchu m. č. 1</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 7 Parametry drsnosti povrchu m. č. 2</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 8 Parametry drsnosti povrchu m. č. 3</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 9 Parametry drsnosti povrchu m. č. 4</i>	<i>75</i>

8 SEZNAM PŘÍLOH

CD

Příloha č. 1: Normy zabývající se vibracemi

Příloha č. 2: Tabulky parametrů drsnosti

PŘÍLOHY

Příloha č. 1

Katalog	Označení	Název
86808	ČSN ISO 2041	Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník
67233	ČSN ISO 1925	Vibrace - Vyvažování - Slovník
58760	ČSN ISO 5805	Vibrace a rázy - Expozice člověka - Slovník
62628	ČSN ISO 14964	Vibrace a rázy - Vibrace stacionárních konstrukcí - Specifikace požadavků na zajištění jakosti při měření a vyhodnocování vibrací
57382	ČSN ISO 2631-1	Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 1: Všeobecné požadavky
87332	ČSN ISO 2631-1	Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 1: Všeobecné požadavky
70051	ČSN ISO 2631-2	Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 2: Vibrace v budovách (1 Hz až 80 Hz)
74445	ČSN ISO 2631-5	Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 5: Metoda hodnocení vibrací obsahujících sdružené rázy
65172	ČSN EN ISO 5349-1	Vibrace - Měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce - Část 1: Všeobecné požadavky
65173	ČSN EN ISO 5349-2	Vibrace - Měření a hodnocení expozice vibracím přenášeným na ruce - Část 2: Praktický návod pro měření na pracovním místě
58056	ČSN ISO 11342	Vibrace - Metody a kritéria vyvažování pružných rotorů
60027	ČSN ISO 11342	Vibrace - Metody a kritéria vyvažování pružných rotorů
72139	ČSN ISO 1940-1	Vibrace - Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu - Část 1: Stanovení vyvažovacích tolerancí a ověření nevyváženosti
51585	ČSN ISO 10816-1	Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice
86100	ČSN ISO 10816-1	Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice
86394	ČSN ISO 10816-2	Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 2: Parní turbíny a generátory nad 50 MW na pozemních základech se jmenovitými provozními otáčkami 1 500 1/min, 1 800 1/min, 3 000 1/min a 3 600 1/min
85057	ČSN ISO 10816-3	Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými

		otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ
86395	ČSN ISO 10816-4	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 4: Soustrojí s plynovou turbínou na kluzných ložiskách
61671	ČSN ISO 10816-5	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích
51587	ČSN ISO 10816-6	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 6: Stroje s vratným pohybem se jmenovitým výkonem nad 100 kW
84904	ČSN ISO 10816-7	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 7: Odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích
51998	ČSN ISO 7919-1	Vibrace strojů s nevratným pohybem - Měření na rotujících hřídelích a kritéria hodnocení - Část 1: Všeobecné směrnice
86684	ČSN ISO 7919-2	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na rotujících hřídelích - Část 2: Parní turbíny a generátory nad 50 MW na pozemních základech se jmenovitými provozními otáčkami 1 500 1/min, 1 800 1/min, 3 000 1/min a 3 600 1/min
84903	ČSN ISO 7919-3	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na rotujících hřídelích - Část 3: Průmyslová soustrojí
86680	ČSN ISO 7919-4	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na rotujících hřídelích - Část 4: Soustrojí s plynovou turbínou na kluzných ložiskách
76289	ČSN ISO 7919-5	Vibrace - Hodnocení vibrační strojů na základě měření na rotujících hřídelích - Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích
71184	ČSN ISO 10326-2	Vibrace - Laboratorní metoda hodnocení vibrační vozidlových sedadel - Část 2: Aplikace na kolejová vozidla
20241	ČSN EN 30326-1	Vibrace - Laboratorní metoda hodnocení vibrační vozidlových sedadel - Část 1: Základní požadavky (ISO 10326-1:1992)
81555	ČSN EN 30326-1	Vibrace - Laboratorní metoda hodnocení vibrační vozidlových sedadel - Část 1: Základní požadavky (ISO 10326-1:1992)
90830	ČSN EN 30326-1	Vibrace - Laboratorní metoda hodnocení vibrační vozidlových sedadel - Část 1: Základní požadavky (ISO 10326-1:1992)
89899	ČSN ISO 7626-1	Vibrace a rázy - Experimentální určování mechanické pohyblivosti - Část 1: Základní termíny a definice, specifikace snímačů
52025	ČSN ISO 7626-2	Vibrace a rázy - Experimentální určování mechanické pohyblivosti - Část 2: Měření pomocí translačního buzení v jednom bodě s připojeným vibrátorem

52026	ČSN ISO 7626-5	Vibrace a rázy - Experimentální určování mechanické pohyblivosti - Část 5: Měření pomocí buzení nárazem s budičem nepřipojeným ke konstrukci
60727	ČSN ISO 16063-11	Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů - Část 11: Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie
70763	ČSN ISO 16063-21	Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů - Část 21: Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem
84905	ČSN ISO 16063-21	Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů - Část 21: Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem
93657	ČSN ISO 10068	Vibrace a rázy - Vstupní mechanická impedance soustavy ruka-paže
66954	ČSN ISO 5982	Vibrace a rázy - Rozsah idealizovaných hodnot k charakterizování biodynamické odezvy lidského těla v poloze vsedě při působení vertikálních vibrací
75083	ČSN P CEN ISO/TS 15694	Vibrace a rázy - Měření a hodnocení jednotlivých rázů přenášených z ručních a rukou vedených strojů na soustavu ruka-paže
82759	ČSN EN ISO 20643	Vibrace - Ruční a rukou vedená strojní zařízení - Principy hodnocení emise vibrací
91981	ČSN EN ISO 20643	Vibrace - Ruční a rukou vedená strojní zařízení - Principy hodnocení emise vibrací
94980	ČSN EN ISO 10819	Vibrace a rázy - Vibrace ruky-paže - Měření a hodnocení činitele přenosu vibrací rukavicemi na dlaň ruky
83507	ČSN EN 1032+A1	Vibrace - Zkoušení mobilních strojů pro účely určení emisní hodnoty vibrací
83540	ČSN EN 1299+A1	Vibrace a rázy - Izolování vibrací strojů - Údaje používané při izolaci zdrojů
52203	ČSN ISO 10815	Vibrace - Měření vibrací generovaných uvnitř traťových tunelů při průjezdu vlaků
53180	ČSN EN 12096	Vibrace - Deklarování a ověřování hodnot emise vibrací
87178	ČSN ISO 4866	Vibrace a rázy - Vibrace pevně zabudovaných konstrukcí - Pokyny pro měření vibrací a hodnocení jejich účinků na konstrukce
55318	ČSN ISO 8569	Vibrace a rázy - Měření a hodnocení účinků rázů a vibrací na citlivé přístroje v budovách
56349	ČSN EN ISO 13090-1	Vibrace a rázy - Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech - Část 1: Expozice celkovým vibracím a opakovaným rázům
82758	ČSN EN ISO 13753	Vibrace a rázy - Vibrace ruky a paže - Metoda měření činitele přenosu vibrací pružných materiálů zatížených soustavou ruka-paže
81976	ČSN EN 14253+A1	Vibrace - Měření a výpočet expozice celkovým vibracím na pracovním místě s ohledem na zdraví - Praktický návod

91209	ČSN EN ISO 22867	Lesnické a zahradní stroje - Zkušební předpis pro vibrace přenosných ručních strojů se zabudovaným spalovacím motorem - Vibrace na rukojetích
83506	ČSN ISO 15230	Vibrace a rázy - Vazební síly na rozhraní člověk-stroj při vibracích přenášených na ruce
83508	ČSN EN 13490+A1	Vibrace - Manipulační vozíky - Laboratorní hodnocení a specifikace vibrací na sedadle obsluhy
83846	ČSN ISO 19499	Vibrace - Vyvažování - Informace o vyvažovacích normách a návod k jejich používání
91464	ČSN ISO 21940-13	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 13: Kritéria a bezpečnostní opatření pro vyvažování středních a velkých rotorů in situ
92645	ČSN ISO 21940-14	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 14: Posuzování chyb vyvážení
93015	ČSN ISO 21940-21	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 21: Popis a hodnocení vyvažovacích strojů
92194	ČSN ISO 21940-23	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 23: Kryty a jiná ochranná opatření pro měřicí stanoviště vyvažovacích strojů
95558	ČSN ISO 21940-31	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 31: Náchylnost a citlivost strojů na nevyváženost
91444	ČSN ISO 21940-32	Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 32: Zohlednění per u hřídelů a kol
69195	ČSN ISO 6954	Vibrace - Směrnice pro měření, zaznamenávání a hodnocení vibrací na osobních a obchodních lodích s ohledem na obyvatelnost plavidla
72117	ČSN ISO 13091-1	Vibrace - Prahy vibrotaktilního čítí při posuzování poruchy činnosti periferních nervů - Část 1: Metody měření na konečných prstech
87333	ČSN ISO 13091-1	Vibrace - Prahy vibrotaktilního čítí při posuzování poruchy činnosti periferních nervů - Část 1: Metody měření na konečných prstech
72118	ČSN ISO 13091-2	Vibrace - Prahy vibrotaktilního čítí při posuzování poruchy činnosti periferních nervů - Část 2: Analýza a interpretace měření na konečných prstech
76823	ČSN ISO 18431-1	Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 1: Obecný úvod
83814	ČSN ISO 18431-1	Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 1: Obecný úvod
73367	ČSN ISO 18431-2	Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 2: Časová okna pro analýzu Fourierovou transformací
82278	ČSN ISO 18431-2	Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 2: Časová okna pro analýzu Fourierovou transformací
79913	ČSN ISO 18431-4	Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 4: Analýza spektra rázové odezvy
73405	ČSN ISO 16587	Vibrace a rázy - Výkonnostní parametry pro monitorování stavu konstrukcí
75578	ČSN ISO 15261	Systémy generující vibrace a rázy - Slovník
92646	ČSN ISO 18437-1	Vibrace a rázy - Určování dynamických

		mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 1: Principy a pokyny
77275	ČSN ISO 18437-2	Vibrace a rázy - Určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 2: Rezonanční metoda
88032	ČSN ISO 18437-2	Vibrace a rázy - Určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 2: Rezonanční metoda
77276	ČSN ISO 18437-3	Vibrace a rázy - Určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 3: Metoda smykově buzeného konzolového nosníku
88033	ČSN ISO 18437-3	Vibrace a rázy - Určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 3: Metoda smykově buzeného konzolového nosníku
89280	ČSN ISO 18437-5	Vibrace a rázy - Určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - Část 5: Poissonův poměr na základě porovnání mezi měřeními a analýzou provedenou metodou konečných prvků
77106	ČSN ISO 2017-1	Vibrace a rázy - Pružné systémy uložení - Část 1: Technické informace pro provedení izolace vibrací
83168	ČSN ISO 2017-2	Vibrace a rázy - Pružné systémy uložení - Část 2: Technická data pro provádění vibroizolace kolejových systémů
91692	ČSN ISO 18312-1	Vibrace a rázy - Měření toku vibračního výkonu od strojů do připojených nosných konstrukcí - Část 1: Přímá metoda
91382	ČSN ISO 18312-2	Vibrace a rázy - Měření toku vibračního výkonu od strojů do připojených nosných konstrukcí - Část 2: Nepřímá metoda
73876	ČSN ISO 18649	Vibrace - Vyhodnocení výsledků měření z dynamických zkoušek a vyšetřování na mostech
73877	ČSN ISO 14963	Vibrace a rázy - Směrnice pro provádění dynamických zkoušek a dynamických vyšetřování mostů a viaduktů
92204	ČSN ISO 14839-1+Amd. 1	Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 1: Slovník
92213	ČSN ISO 14839-2	Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 2: Hodnocení vibrací
93295	ČSN ISO 14839-3	Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 3: Hodnocení hranice stability
93357	ČSN ISO 14839-4	Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 4: Technické pokyny
82705	ČSN EN ISO	Akustika a vibrace - Laboratorní měření

	10846-1	vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 1: Principy a směrnice
82706	ČSN EN ISO 10846-2	Akustika a vibrace - Laboratorní měření vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 2: Přímá metoda pro stanovení dynamické tuhosti pružných podpor pro translační pohyb
66787	ČSN EN ISO 10846-3	Akustika a vibrace - Laboratorní měření vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 3: Nepřímá metoda určení dynamické tuhosti pružných podpor pro translační pohyb
71394	ČSN EN ISO 10846-4	Akustika a vibrace - Laboratorní měření vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 4: Dynamická tuhost prvků s výjimkou pružných podpor pro translační pohyb
84101	ČSN EN ISO 10846-5	Akustika a vibrace - Laboratorní měření vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 5: Metoda měření v budicím bodě pro stanovení nízkofrekvenční přenosové tuhosti pružných podpor pro translační pohyb
15425	ČSN IEC 721-2-6	Klasifikace podmínek prostředí. Část 2: Podmínky vyskytující se v přírodě. Vibrace a otřesy při zemětřesení
72800	ČSN EN 3841-511	Letectví a kosmonautika - Jističe - Zkušební metody - Část 511: Kombinovaná zkouška: teplota, výška a vibrace
78974	ČSN EN 2349-413	Letectví a kosmonautika - Požadavky a zkušební postupy pro relé a stykače - Část 413: Vibrace, sinusové a náhodné
91910	ČSN EN 2591-403	Letectví a kosmonautika - Prvky elektrického a optického propojení - Zkušební metody - Část 403: Sinusové a náhodné vibrace
65687	ČSN EN 2591-428	Letectví a kosmonautika - Prvky elektrického a optického propojení - Zkušební metody - Část 428: Sinusové vibrace mačkaných koncovek zatížených proudem
64357	ČSN EN 2591-6403	Letectví a kosmonautika - Prvky elektrického a optického propojení - Zkušební metody - Část 6403: Optické prvky - Vibrace
86527	ČSN EN 4662	Letectví a kosmonautika - Specifikace zkoušky dílů tlumících vibrace
84154	ČSN ISO 20283-2	Vibrace - Měření vibrací na lodích - Část 2: Měření konstrukčních vibrací
87660	ČSN EN 61373 ed. 2	Drážní zařízení - Zařízení drážních vozidel - Zkoušky rázy a vibracemi
94234	ČSN EN 61373 ed. 2	Drážní zařízení - Zařízení drážních vozidel - Zkoušky rázy a vibracemi
94260	ČSN EN 61373 ed. 2	Drážní zařízení - Zařízení drážních vozidel - Zkoušky rázy a vibracemi

74554	ČSN EN 60068-2-47 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-47: Zkoušky - Upevnění vzorků pro zkoušky vibracemi, nárazy a obdobné dynamické zkoušky
87039	ČSN EN 60068-2-53	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-53: Zkoušky a návod - Kombinované klimatické (teplotou/vlhkostí) a dynamické (vibracemi/rázy) zkoušky
60166	ČSN EN 60068-2-57	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-57: Zkoušky - Zkouška Ff: Vibrace - Metoda časového průběhu
94403	ČSN EN 60068-2-57	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-57: Zkoušky - Zkouška Ff: Vibrace - Metoda časového průběhu
94402	ČSN EN 60068-2-57 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-57: Zkoušky - Zkouška Ff: Vibrace - Metoda časového průběhu a sinusových impulsů
17181	ČSN EN 60068-2-59	Zkoušení vlivů prostředí. Část 2: Zkušební metody - Zkouška Fe: Vibrace - Metoda sinusových impulsů
94676	ČSN EN 60068-2-59	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2: Zkušební metody - Zkouška Fe: Vibrace - Metoda sinusových impulsů
81803	ČSN EN 60068-2-6 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-6: Zkoušky - Zkouška Fc: Vibrace (sinusové)
83010	ČSN EN 60068-2-64 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-64: Zkoušky - Zkouška Fh: Širokopásmové náhodné vibrace a návod
18395	ČSN EN 60068-2-65	Zkoušení vlivů prostředí. Část 2: Zkušební metody. Zkouška Fg: Vibrace, akusticky indukované
93986	ČSN EN 60068-2-65	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2: Zkušební metody - Zkouška Fg: Vibrace, akusticky indukované
93985	ČSN EN 60068-2-65 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-65: Zkoušky - Zkouška Fg: Vibrace - Akusticky indukovaná metoda
74727	ČSN EN 60068-2-80	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-80: Zkoušky - Zkouška Fi: Vibrace - Smíšený mód
70725	ČSN EN 60068-3-8	Zkoušení vlivů prostředí - Část 3-8: Doprovodná dokumentace a návod - Volba zkoušek vibracemi
69524	ČSN EN 50289-3-13	Komunikační kabely - Specifikace zkušebních metod - Část 3-13: Mechanické zkušební metody - Vibrace způsobené větrem
71037	ČSN EN 60034-14 ed. 2	Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací
80608	ČSN EN 60034-14 ed. 2	Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací
65913	ČSN EN 60512-6-4	Konektory pro elektronická zařízení - Zkoušky a měření - Část 6-4: Zkoušky dynamickým namáháním - Zkouška 6d: Vibrace (sinusové)
59166	ČSN EN 60512-6-5	Elektromechanické součástky pro elektronická zařízení - Základní zkušební postupy a měřicí metody - Část 6: Zkoušky dynamickým namáháním - Oddíl 5:

		Zkouška 6e: Náhodné vibrace
91618	ČSN ISO 2954	Vibrace strojních zařízení s rotačním a vratným pohybem - Požadavky na přístroje pro měření mohutnosti vibrací
56660	ČSN ISO 5348	Vibrace a rázy - Mechanické připevnění akcelerometrů
90486	ČSN EN 62047-12	Polovodičové součástky - Mikroelektromechanické součástky - Část 12: Metoda zkoušení ohybové únavy tenkovrstvých materiálů využívající rezonanční vibrace struktur MEMS
66847	ČSN EN 60749-12	Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 12: Vibrace, proměnlivý kmitočet
78324	ČSN EN 60749-12	Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 12: Vibrace, proměnlivý kmitočet
85943	ČSN EN 61300-2-1 ed. 2	Spojovací prvky a pasivní součástky vláknové optiky - Základní zkušební a měřicí postupy - Část 2-1: Zkoušky - Vibrace (sinusové)
74725	ČSN EN ISO 8041	Vibrace působící na člověka - Měřicí přístroje
83505	ČSN EN ISO 8041	Vibrace působící na člověka - Měřicí přístroje
79831	ČSN EN ISO 12680-1	Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky - Část 1: Stanovení dynamického Youngova modulu (MOE) z vibrace vybuzeu úderem
67367	ČSN EN ISO 2247	Obaly - Kompletní přepravní balení a manipulační jednotky - Zkoušky vibracemi se stálým nízkým kmitočtem
67366	ČSN EN ISO 8318	Obaly - Kompletní přepravní balení a manipulační jednotky - Zkouška sinusovými vibracemi s proměnným kmitočtem
69132	ČSN EN ISO 13355	Obaly - Kompletní přepravní balení a manipulační jednotky - Zkouška náhodnými vertikálními vibracemi

Příloha č. 2

Tab. 6 Parametry drsnosti povrchu m. č. 1

ISO 4287						
		Context	Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	15.255	4.0065	10.400	33.866
Rv	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	12.134	1.2573	9.3128	16.696
Rz	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	27.389	4.8865	20.314	47.226
Rc	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	21.345	6.3768	8.3138	33.124
Rt	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	27.472	4.9237	20.314	47.226
Ra	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	6.6776	0.92991	4.6234	8.6369
Rq	µm	Gaussian filter, 0.8 mm	7.7367	1.1171	5.5992	10.794
Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm	0.27714	0.18615	-0.04917	1.0026
Rku		Gaussian filter, 0.8 mm	1.8723	0.32475	1.5202	3.8791
Spacing parameters - Roughness profile						
RSm	mm	Gaussian filter, 0.8 mm	0.20793	0.071802	0.061608	0.39721

Tab. 7 Parametry drsnosti povrchu m. č. 2

ISO 4287						
		Context	Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	19.890	0.74393	17.691	22.246
Rv	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	29.871	1.5841	26.496	34.418
Rz	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	49.760	1.8417	45.992	55.761
Rc	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	32.542	6.4917	19.285	42.192
Rt	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	49.760	1.8417	45.992	55.761
Ra	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	12.312	0.29212	11.714	12.768
Rq	μm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	13.974	0.26699	13.344	14.434
Rsk		Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	-0.51053	0.06241	-0.61289	-0.34696
Rku		Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	1.9706	0.076385	1.7868	2.1026
Spacing parameters - Roughness profile						
RSm	mm	Gaussian filter, 2.5 mm, End-effects managed	0.60373	0.14352	0.29412	0.82041

Tab. 8 Parametry drsnosti povrchu m. č. 3

ISO 4287						
		Context	Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	2.5724	0.57895	1.7958	5.3098
Rv	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	2.9489	0.52125	2.0350	5.6901
Rz	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	5.5213	1.0150	4.0807	9.6414
Rc	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	3.7158	0.88515	2.1916	8.0829
Rt	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	9.1051	2.1578	5.2406	23.984
Ra	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	1.0635	0.16533	0.80816	1.7166
Rq	μm	Gaussian filter, 0.25 mm	1.3089	0.23082	0.96667	2.2613
Rsk		Gaussian filter, 0.25 mm	-0.16023	0.18848	-0.76193	0.58455
Rku		Gaussian filter, 0.25 mm	2.7116	0.35847	2.1555	5.3752
Spacing parameters - Roughness profile						
RSm	mm	Gaussian filter, 0.25 mm	0.092137	0.017802	0.056398	0.17224

Tab. 9 Parametry drsnosti povrchu m. č. 4

ISO 4287						
		Context	Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	4.8249	0.43233	3.6009	5.8700
Rv	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	6.8930	0.91968	4.8371	11.226
Rz	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	11.718	1.0092	8.9096	16.730
Rc	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	5.8419	1.3951	2.7370	10.207
Rt	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	11.718	1.0092	8.9096	16.730
Ra	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	1.7634	0.17120	1.3334	2.1111
Rq	μm	Gaussian filter, 0.8 mm	2.3200	0.21520	1.7095	2.7364
Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm	-0.78074	0.27612	-1.660	-0.098619
Rku		Gaussian filter, 0.8 mm	3.6659	0.64310	2.7247	6.4114
Spacing parameters - Roughness profile						
RSm	mm	Gaussian filter, 0.8 mm	0.17902	0.056034	0.076191	0.31692