

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vibrací obráběcích strojů
Zdeněk Černý

Bakalářská práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk Černý**
Osobní číslo: **I09416**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Analýza vibrací obráběcích strojů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Většina obráběcích strojů obsahuje rychle rotující části, tyto části často mimo rotačního pohybu vykonávají i parazitní pohyby vlivem mechanických nedokonalostí, které vnímáme jako vibrace. Vlivem mechanického namáhání stroje ať už je spojeno s jeho použitím nebo právě vlivem vibrací dochází k opotřebení namáhaných částí, například ložisek. Během opotřebení dochází ke změně rozložení sil a tím i ke změně charakteru vibrací. Tato změna intenzity a charakteru vibrací může být dobrým indikátorem opotřebení stroje/strojní části.

Úkolem teoretické části práce bude popis problematiky, popis možností měření vibrací, možností jejich vyhodnocení (intenzita, frekvence, výchylka). Praktická část se pak bude zabývat návrhem měření vibrací a zpracováním naměřených dat a návrhem automatizovaného vyhodnocení potřeby servisního zásahu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4

ĎAĎO, S.; KREIDL, M. Senzory a měřicí obvody. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999. ISNB 80-01-02057-6

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **21. prosince 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 05. 2013

Zdeněk Černý

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za cenné rady a připomínky k mé práci. Děkuji firmě Misan s.r.o., sídlem v Lysé nad Labem, za možnost měření vibrací vřeten na jejích strojích. Děkuji rodině, přátelům a známým za korekturu textu a také za podporu ve studiu.

Autor

Anotace

Analýza vibrací obráběcích strojů

Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou.

Teoretická část se zabývá popisem problematiky vibrací rotujících částí obráběcích strojů a jejich vlivem na proces obrábění, popisem možností měření vibrací, možnostmi jejich vyhodnocení (intenzita, frekvence, výchylka).

Praktická část zahrnuje návrh metody měření vibrací na vřetenech obráběcích strojů pomocí vibrometru, návrh postupu zpracování naměřených dat s cílem automatizovaného vyhodnocení potřeby servisního zásahu.

Klíčová slova

Vibrace, intenzita, frekvence, výchylka, vibrometr

Annotation

Vibration analysis of machine tools

The work is divided into two parts – theoretical and practical. The theoretical part deals with the issues related to the rotating parts of machine tools and their impact on the machining process. Addressed are the means of vibrations' measurement and the results analysis alternatives (intensity, frequency, deviation).

The practical part includes a proposal for a method of vibrations' measurement of machine tools' spindles using a vibrometer. Processing of the measured data is optimised aiming at establishing an automated decision routine for spindle service requirements.

Key words

Vibration, intensity, frequency, deviation, vibrometer

Obsah

Obsah.....	7
Seznam zkratk	8
Seznam Obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod.....	11
Cíl práce	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Obecně vibrace	12
1.2 Obráběcí stroje obecně	13
1.3 Vřetena obráběcích strojů	15
1.3.1 Příčiny poruch vřeten.....	15
1.3.2 Mazání vřetenových ložisek	16
1.4 Základní pojmy o vibračních signálech.....	17
1.5 Diagnostika.....	20
1.5.1 Diagnostické parametry (veličiny).....	22
1.6 Způsoby měření vibrací	23
1.6.1 Měření mohutnosti vibrací.....	23
1.6.2 Měření obálky vysokofrekvenčních vibrací.....	23
1.6.3 Metoda akustické emise – SEE.....	23
1.6.4 Crest faktor.....	24
1.6.5 Q faktor	24
1.6.6 Audio záznam vibračního signálu ze snímače	24
1.6.7 Měření amplitudy a fáze	24
1.6.8 Hladina akustického tlaku v blízkosti vřetene	24
1.6.9 Harmonická analýza – vibrací i hluku	25
1.7 Kalibrace.....	25
1.8 Nejistota měření.....	25
2 Praktická část.....	28
2.1 Měřicí zařízení	28
2.2 Návrh metodiky měření	29
2.3 Umístění snímače (vibrometru) při prováděném měření:.....	33
2.4 Ověření použité metodiky	37
2.4.1 Frekvenční analýza	42
2.5 Navržený software pro vyhodnocování	47
3. Závěr.....	50
Použitá literatura	51
Seznam příloh.....	53

Seznam zkratek

FFT – Fast Fourier Transform

NC – Numeric Control

CNC – Computer Numerical Control

RMS – Root Mean Square

BPFO – Ball-Passing Frequency Outer-race (frekvence vnějšího kroužku)

BPFI – Ball-Passing Frequency Inner-race (frekvence vnitřního kroužku)

BSF – Ball-Spin Frequency (frekvence průchodu kuliček)

FTF – Fun-damental Train Frequency (frekvence poškození klece)

X,Y – vstup a výstup

DO – diagnostický objekt

JS – styková jednotka

ŘB – řídicí blok

DM – diagnostický model

VZ – vyhodnocovací zařízení

GVP – generátor vstupních podmínek

Seznam Obrázků

Obrázek 1. – Postup odstranění zdroje vibračních projevů.....	13
Obrázek 2. – Uložení vřetene v řezu [25]	15
Obrázek 3. – Hladina kmitání [23].....	16
Obrázek 4. – Způsoby mazání vřetenových ložisek.....	16
Obrázek 5. – Znázornění časového rozvinutí harmonického kmitání [12].....	17
Obrázek 6. – Znázornění periody [24]	17
Obrázek 7. – Grafické znázornění a) špičkové hodnoty; b) střídavé střední hodnoty; c) střední hodnoty; d) efektivní hodnoty jednoduchého signálu [12]	18
Obrázek 8. – Průběh výchylky, rychlosti a zrychlení [12].....	19
Obrázek 9. – Časové průběhy a kmitočtová spektra a) sinusového; b) periodického složeného signálu (spektra diskrétní); c) a d) neperiodického signálu (spektra spojitá) [12].....	20
Obrázek 10. – Schéma diagnostického systému Off-line	21
Obrázek 11. – Schéma diagnostického systému On-line	21
Obrázek 12. – Aparatura	28
Obrázek 13. – Připravený senzor	29
Obrázek 14. – Připojení aparatury.....	29
Obrázek 15. – Příklad spuštění programu	29
Obrázek 16. – Synchronizace PC/Modul	30
Obrázek 17. – Potvrzení synchronizace tlačítkem OK.....	30
Obrázek 18. – Ikona předvolby pro nahrání.....	30
Obrázek 19. – Nahrání měřících bodů	31
Obrázek 20. – Úspěšné potvrzení pro nahrání měřících bodů tlačítkem OK.....	31
Obrázek 21. – Zapnutí přístroje.....	32
Obrázek 22. – Měření vibrací [25]	32
Obrázek 23. – sp.front.0rpm V	33
Obrázek 24. – sp.front.0rpm H.....	33
Obrázek 25. – sp.front.0rpm A.....	34
Obrázek 26. – sp.rear.0rpm V	34
Obrázek 27. – sp.rear.0rpm H	35
Obrázek 28. – sp.rear.0rpm A	35
Obrázek 29. – Synchronizace Modul/PC	36
Obrázek 30. – Ikona pro nahrání bodů z modulu do PC	36
Obrázek 31. – Naměřené body	36
Obrázek 32. – Uspořádání ložisek 1.) do „O“, 2.) do „X“ [25].....	37
Obrázek 33. – CNC řízený soustruh se dvěma řízenými osami X a Z [25].....	38
Obrázek 34. – Hodnota obálky zrychlení při 3000 otáčkách v Horizontálním směru přední strany vřetena po opravě stroje.....	42
Obrázek 35. – Hodnota obálky zrychlení při 3000 otáčkách v horizontálním směru přední strany vřetena po 7 měsících dalšího provozu stroje.....	43

Obrázek 36. – Hodnota obálky zrychlení při 6000 otáčkách v horizontálním směru zadní strany vřetena po 7 měsících provozu stroje	43
Obrázek 37. – Obálka zrychlení na novém stroji v předváděcí hale.....	44
Obrázek 38. – Obálka zrychlení po kolizi stroje.....	44
Obrázek 39. – Naměřená obálka zrychlení po opravě stroje.....	45
Obrázek 40. – Zkoumání ojedinělé amplitudové špičky při 3000 otáčkách se nepotvrdilo	45
Obrázek 41. – Naměřená obálka zrychlení po 7 měsících dalšího provozu stroje.....	46
Obrázek 42. – Všechny tabulky v databázi	47
Obrázek 43. – Tabulka MeasuredDataFFT	47
Obrázek 44. – Tabulka MasterPoint v databázi	48
Obrázek 45. – Náhled na spuštěný software	49
Obrázek 46. – Ukázka chybového hlášení při překročení mezních hodnot po automatickém vyhodnocení	49

Seznam tabulek

Tabulka 1. – Mezní hodnoty.....	24
Tabulka 2. – Naměřené vibrace obráběcího stroje QTN100II po opravě.....	39
Tabulka 3. – Naměřené vibrace obráběcího stroje QTN100II po 7 měsících	40
Tabulka 4. – Naměřené vibrace nového obráběcího stroje v předváděcí hale firmy Misan s.r.o.....	41

Úvod

S každým novým obráběcím strojem musí dodavatel (výrobce) předat provozovateli podrobný a srozumitelný návod pro bezpečnou instalaci, obsluhu a údržbu. V návodu musí být upozorněno na bezpečnostní předpisy a normy. Každý provozovatel se musí postarat nejen o školení obsluhy, ale i údržbu stroje. U obráběcích strojů dochází často k poruchám způsobenými vibracemi rotujících částí (vřeten), proto je nutné zjistit jejich příčiny pomocí vibrační diagnostiky.

Již řadu let se měření vibrací strojů a průmyslových zařízení používá pro sledování jejich stavu a plánovanou údržbu. Především v souvislosti s rychlým rozvojem měřicí techniky, miniaturizací elektronických obvodů. Vibrační diagnostika je běžným prostředkem ochrany strojů a prevence jejich závažných závad.

Cíl práce

Cílem mé práce je nahlédnout na prostředky ochrany, údržby a prevence závažných závad obráběcích strojů. Z hlediska diagnostiky jde o oblast hluku, která je způsobena vibracemi otáčivých částí strojů. U obráběcích strojů ho způsobují hlavně vřetena. Ukázat na způsoby měření, vyhodnocení naměřených hodnot vibrací a další řešení této problematiky.

1 Teoretická část

1.1 Obecně vibrace

Vibrace prezentuje mechanický pohyb kolem rovnovážného referenčního bodu. Vynucené vibrace jsou vibrace stroje způsobené mechanickým podnětem. Pokud se podnět pravidelně opakuje nebo je trvalý, výsledný pohyb nakonec přejde do vyrovnaného stavu.

Mechanické vibrace strojů jsou uznávaným a spolehlivým indikátorem stavu stroje s vysokou vypovídací schopností. Vibrace vznikají výrobními nepřesnostmi součástí strojů, vůlemi mezi součástmi, nevyváženými rotačními hmotami, kmitavým a kývavým pohybem. Zdrojem chvění může být i řezný proces – přerušovaný řez.

Vibrace způsobují značné namáhání součástí, jsou zdrojem otřesů a způsobují hluk. Kmitání zhoršuje pracovní podmínky obsluhy, pracovní přesnosti a trvanlivost strojů a nástrojů, omezují výkon obráběcích strojů.

Akcelerometr je přístroj pro měření zrychlení, který se používá při vyšetřování pohyblivých částí strojů. Akcelerometry obvykle detekují daleko širší frekvenční rozsah, takže mohou zjišťovat signály, které jiné typy převodníků zjišťovat nedokážou. Jsou nejpoužívanějším převodníkem pro měření vibrací.

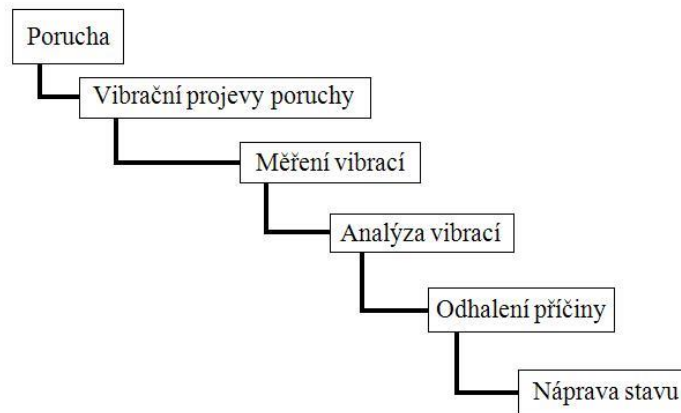
Snímač rychlosti vibrací, je zařízení, které generuje napěťový signál, jež je úměrný mechanické (vibrační) rychlosti tělesa. Většinou se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující) konstrukci zařízení. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívku, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.

Bezdotyková sonda, je zařízení, jehož výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo ověřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříni stroje. Snímač výchylky dává střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu. Většina snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Ve snímači se nachází cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud, a tato cívka generuje vysokofrekvenční magnetické pole [1].

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejdříve odpovídat průběhu mechanického kmitání. Mechanické kmitání určují vedle frekvence také výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou navzájem závislé.

Úkolem vibrační diagnostiky je, na základě speciálních měření odhadovat příčiny zhoršeného stavu stroje, určovat nápravná opatření, preventivní kontroly, popřípadě servisní zásah. Mezi stavem stroje a hladinou vibrací je úzká spojitost. Pomocí vhodné měřicí techniky lze provádět řadu jednoduchých i složitějších měření, která umožňují posoudit stav stroje z různých hledisek.

Při jakékoli poruše, která se projevuje vibracemi, je nutné odhalení příčiny poruchy pomocí vibrační diagnostiky. Úkolem diagnostického měření vibrací je odhalení příčiny poruchy, aby bylo možno provést nápravu a zdroj vibračních projevů odstranit.



Obrázek 1. – Postup odstranění zdroje vibračních projevů

1.2 Obráběcí stroje obecně

Význam strojírenství v každém průmyslově vyspělém státu a i jeho ekonomice je velký. Tedy na rozvoji strojírenství závisí i rozvoj dané země. Skoro na každém předmětu kolem nás je vidět stopa výrobního obráběcího stroje.

Rozdělení obráběcích strojů:

Velké množství druhů a variant obráběcích strojů rozdělujeme podle několika často používaných hledisek, kterými jsou:

- druh hlavního řezného pohybu
Podle druhu hlavního řezného pohybu dělíme obráběcí stroje na:
 - 1.) Stroje s rotačním hlavním řezným pohybem (např. soustruhy, brusky, vrtačky, frézky, obráběcí centra).
 - 2.) Stroje s přímočarým hlavním řezným pohybem (např. obrážečky, protahovačky).
 - 3.) Stroje s kombinovaným nebo obecním hlavním řezným pohybem (např. honovačky, lapovačky).
- použitá technologie obrábění
Dělení podle použité technologie obrábění:
 1. Stroje (technologie), pracující s nástrojem určitého geometrického tvaru.

druh stroje	technologie
a. soustruhy	soustružení
b. frézky	frézování
c. vyvrtávačky	vyvrtávání
d. vrtačky	vrtání
e. obrážečky	obrážení
f. protahovačky	protahování
g. pily na kov	řezání
h. závitořezy	řezání závitů
i. pilovací stroje	pilování

2. Stroje (technologie) pracující s nástrojem neurčitého geometrického tvaru.

druh stroje	technologie
a. brusky	broušení
b. lapovačky	lapování
c. honovačky	honování

3. Stroje pro nekonvenční způsoby obrábění.

- a. elektrojiskrové
- b. elektrochemické
- c. ultrazvukové

▪ tvar opracovávaných součástí

Dělení podle tvaru opracovávaných součástí

1. Stroje na výrobu rotačních součástí (např. soustruhy, soustružnická obráběcí centra).
2. Stroje na výrobu skříňových a plochých součástí obecných tvarů (např. frézky, obráběcí centra).

▪ univerzálnost

1. Stroje univerzální
2. Stroje speciální
3. Stroje jednoúčelové

▪ způsob řízení

1. Stroje ručně řízené (konvenční)
2. Stroje programově řízené (NC a CNC stroje)

Chceme-li dosáhnout i v malosériové a kusové výrobě snížení výrobních nákladů při vysoké výkonnosti, musíme stroje pružně přizpůsobit měnícímu se sortimentu obrobků. Takové pružnosti je možno u obráběcích strojů dosáhnout použitím CNC řízených strojů [8].

CNC stroje patří do skupiny tzv. programově řízených strojů, které jsou charakterizovány tím, že jejich seřizování při přechodu z jednoho typu obrobku na druhý se provádí buď částečně nebo úplně výměnou řídicího programu a vybavením příslušnou technologií třískového obrábění. Dále je pro CNC stroje typické, že ovládání všech funkcí stroje (pohyby, rychlost a směr pohybů, výměna nástrojů, obrobků či jiných činností) se provádí výhradně řídicím systémem stroje. Číslicově řízené stroje (pracující v automatickém cyklu) nesnižují výrobní náklady jenom tím, že jsou přizpůsobivé měnícímu se sortimentu součástí, ale i tím, že užitím nových konstrukčních principů jsou spolehlivé a tím uzpůsobeny pracovat na třísměnný provoz. CNC obráběcí stroj je tedy obráběcí stroj, který je numericky řízen a konstrukčně uzpůsoben tak, aby pracoval v automatickém cyklu a měl automatickou výměnu nástrojů [11].

Číslicově řízený obráběcí stroj má většinou šest hlavních pracovních celků:

- 1) polohování nástroje (obrobku)
- 2) vřetení s vřeteníkem
- 3) zásobník a výměník nástrojů
- 4) zásobník (výměník) obrobků
- 5) přívody média
- 6) ochranné kryty

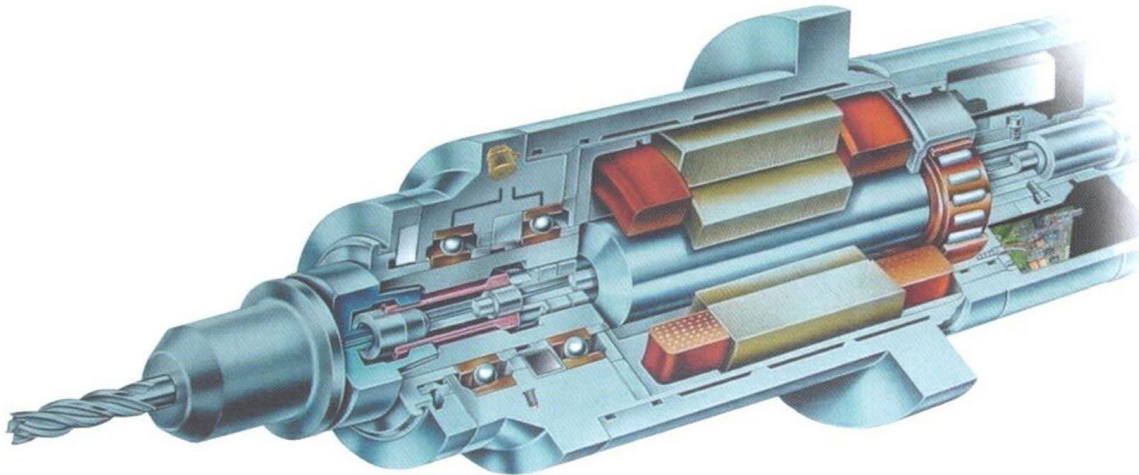
1.3 Vřetena obráběcích strojů

Úloha vřetena obráběcích strojů je zaručit obrobku (u soustruhů) nebo nástroji (u frézky, vrtačky, brusky) přesný otáčivý pohyb, tj. takový pohyb, při kterém se dráhy jednotlivých bodů obrobku nebo nástroje liší od kružnice jen v přípustných mezích.

Vřeteno je u CNC obráběcích strojů ukládáno z 99% do valivých ložisek. Zbývající 1% vřeten, je ukládáno do rotačních hydrostatických ložisek.

Požadavky na vřetena obráběcích strojů:

1. Přesnost chodu vřetena – určena radiálním a axiálním házením
2. Dokonalé vedení – vřeteno nesmí měnit svou polohu se změnou směru a smyslu zatížení
3. Pro dokonalé vedení musí být umožněno vymezení vůle v ložiskách, která vznikne opotřebením
4. Ztráty třením v ložiskách mají být co nejmenší, aby nedocházelo k zahřívání
5. Vřeteno má být tuhé, aby nedocházelo ke změně relativní polohy mezi nástrojem a obrobkem – zhoršení přesnosti



Obrázek 2. – Uložení vřetene v řezu [25]

1.3.1 Příčiny poruch vřeten

- Přetížení stroje
- Havárie stroje
- Nevyváženost stroje
- Chyba automatické výměny nástroje
- Špatná lubrikace
- Špatné chlazení
- Vnik chladicí kapaliny do ložiska
- Průchod elektrického proudu ložiskem
- Únava materiálu

Výskytům poruch vřeten (rotujících částí stroje) se může předcházet důkladnou přejímkou stroje od výrobce, i po případné opravě. Provést občasná měření, zejména po instalaci či opravě. Tedy pravidelným sledováním vytipovaných parametrů. Důležitý faktor je také pečlivý výběr maziva a jeho pravidelné doplňování.

Způsoby (strategie) údržby:

- Běžná údržba – kontrola, doplňování provozních kapalin a běžné ošetření.
- Neplánovaná údržba – po poruše.
- Plánovaná údržba – dle harmonogramu podle životnosti jednotlivých součástí.
- Preventivní údržba – provádí se v pravidelných intervalech.



Obrázek 3. – Hladina kmitání [23]

1.3.2 Mazání vřetenových ložisek

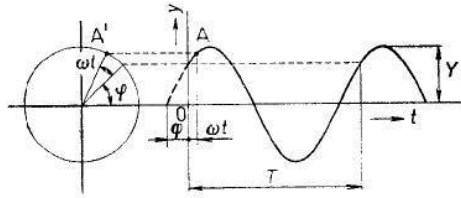
Hlavním důvodem mazání vřetenových ložisek je zmenšit tření, což vede ke snížení opotřeбенí. Mazání ložisek prodlužuje jejich životnost, snižuje riziko jejich poruch vlivem mechanického poškození a při vysokých otáčkách odvádí vzniklé teplo. Metoda mazání uložení vřeten obráběcích strojů závisí na konkrétních provozních podmínkách a požadavcích. Pokud požadujeme velkou přesnost chodu vřetena, je nutné redukovat teplo, které je závislé na typu ložiska, otáčkách a zatížení [11].



Obrázek 4. – Způsoby mazání vřetenových ložisek

1.4 Základní pojmy o vibračních signálech

Na obrázku 5 je znázorněno časové rozvinutí harmonického kmitání o amplitudě Y při úhlovém kmitočtu ω a fázovém posuvu φ .

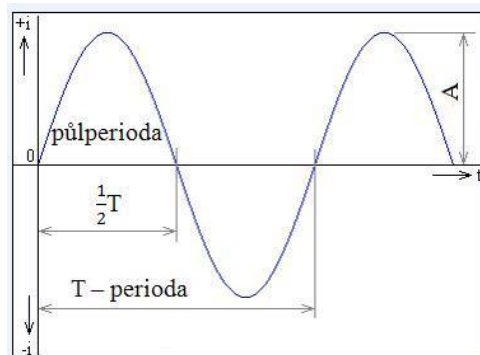


Obrázek 5. – Znázornění časového rozvinutí harmonického kmitání [12]

Perioda

Perioda je u kmitání doba kmitu a u otáčivého kmitu je perioda doba jedné otáčky (oběhu), je převrácenou hodnotou frekvence.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \text{ [s]} \quad (1)$$



Obrázek 6. – Znázornění periody [24]

Frekvence

Počet událostí, které se odehrají v určitém pevně stanoveném časovém období. Frekvence se také počítá jako převrácená hodnota periody (neboli jedna lomeno časovým obdobím). Frekvence se typicky vyjadřuje v hertzech (Hz), lze ji ale také vyjádřit v cyklech za minutu (c/m) nebo v otáčkách za minutu (rpm), když počet hertzů vynásobíme 60. Může být rovněž představována jako násobky rychlosti otáčení (neboli „úkony“), kdy se frekvence v otáčkách za minutu (rpm) dělí rychlostí otáčení stroje.

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

Harmonická frekvence

Hodnota sinusoidy, která má frekvenci tvořenou celočíselným násobkem (dvou-, třínásobek) základní frekvence (násobek).

Frekvenční oblast

Protože k vibraci dochází v určité oblasti času, pokud se na ni díváte prostřednictvím osciloskopu, představuje signál vibrace časová křivka. Při rozložení do grafu pak tato časová křivka představuje grafické znázornění výkmitu v určitém čase. Pokud bychom křivku transformovali do frekvenční oblasti, bude výsledkem spektrum představující grafické znázornění výkmitu při určité frekvenci [3].

Efektivní hodnota

Je střední kvadratická hodnota, která je definovaná pro periodickou funkce $v(t)$ s periodou T .

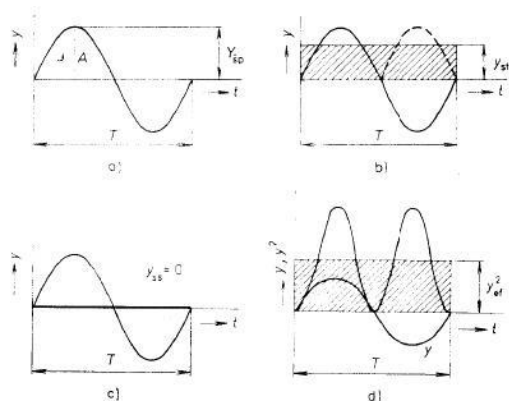
$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3)$$

$$v_{ef} = v_{RMS} \quad (4)$$

Špičková hodnota

Jinak se nazývá amplituda, je to maximální okamžitá hodnota výchylky v určitém časovém intervalu.

$$v(t)_{max} = |v_{max}| = Y \quad (5)$$



Obrázek 7. – Grafické znázornění a) špičkové hodnoty; b) střídavé střední hodnoty; c) střední hodnoty; d) efektivní hodnoty jednoduchého signálu [12]

Fáze dvou signálů

Je harmonicky proměnná veličina, pokud probíhají dva děje s okamžitými výchylkami y_1 a y_2 o shodném kmitočtu f , ale mají různé fázové úhly φ_1 a φ_2 . Fázový posun mezi oběma ději je rozdíl $\varphi_1 - \varphi_2$ [rad nebo $^\circ$].

Výchylka

Je obecně vektor jehož složkami jsou hodnoty souřadnic určujících polohu prvků kmitající mechanické soustavy vzhledem k jejich rovnovážným polohám.

Rychlost

Okamžitá rychlost pohybu je dána časovou změnou dráhy, derivací dráhy podle času.

$$v = \frac{dy}{dt} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (6)$$

Pro sinusové kmitání

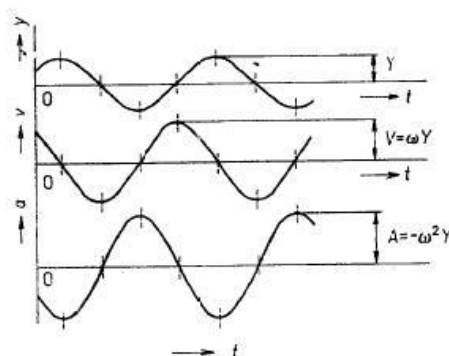
$$v = \omega Y \cos(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Zrychlení

Okamžité zrychlení je dáno časovou změnou rychlosti, derivací okamžité rychlosti podle času [21].

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 Y \sin(\omega t + \varphi) \quad [\text{m s}^{-2}] \quad (9)$$

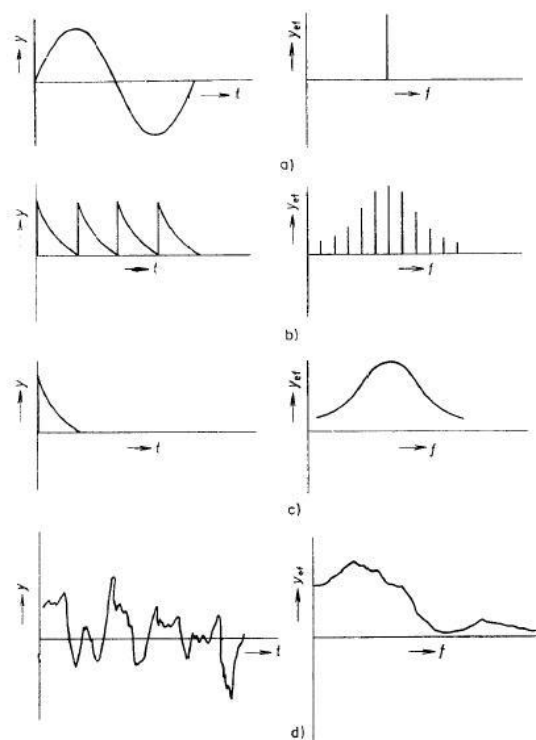
Časově rozvinuté průběhy výchylky, rychlosti a zrychlení hmotného bodu při jeho harmonickém kmitání jsou znázorněny na obrázku 8.



Obrázek 8. – Průběh výchylky, rychlosti a zrychlení [12]

Spektrum

Každý signál je možno vyjádřit pomocí harmonických signálů (od jediného až po nekonečný počet). Každý dílčí harmonický signál lze popsat dvojčíselným údajem (kmitočtem a efektivní hodnotou). Popis složeného signálu údajem kmitočtů a příslušných efektivních hodnot jeho dílčích harmonických složek se nazývá kmitočtové spektrum. Spektrum se zakresluje do grafu, kde $y_{ef} = f(f)$ [12], [20].



Obrázek 9. – Časové průběhy a kmitočtová spektra a) sinusového; b) periodického složeného signálu (spektra diskrétní); c) a d) neperiodického signálu (spektra spojitá) [12]

1.5 Diagnostika

Technická diagnostika je obor, který se zabývá metodami a prostředky k určení technického stavu objektu. Tím se rozumí bezdemontážní a nedestruktivní zjišťování aktuálního stavu určeného objektu.

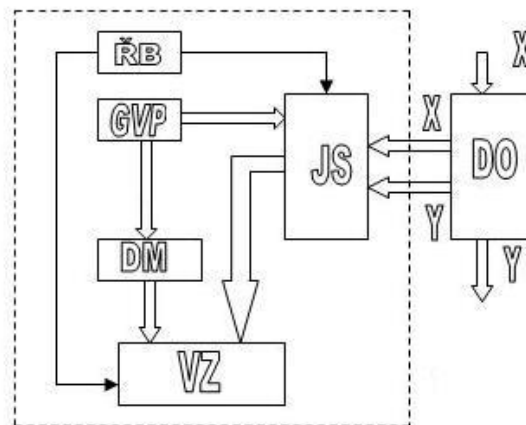
Diagnóza je vyhodnocení okamžitého stavu objektu, to určuje závěr z diagnostické analýzy. Jedná se o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných technických podmínek. Základními úkoly diagnózy jsou:

- Detekce vady nebo poruchy
- Lokalizace vady nebo poruchy
- Stanovení příčiny
- Predikce – určení prognózy zbytkové životnosti (času do nutné opravy)

Prognóza (z řeckého „prognosis“) je extrapolace vývoje technického stavu do budoucnosti. Geneze (z řeckého „genesis“) je analýza možných příčin vzniku poruchy nebo vady, tím předčasného zhoršení technického stavu daného objektu.

Důležité parametry můžeme sledovat pomocí diagnostických systémů:

- **Off-line**
Tyto diagnostické systémy jsou používány pro testování před spuštěním strojů (na začátku směny) nebo při diagnostice poruchy.



Obrázek 10. – Schéma diagnostického systému Off-line

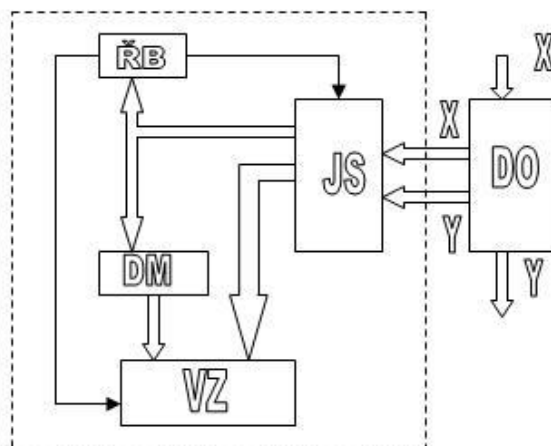
X,Y – vstup a výstup
 DO – diagnostický objekt
 JS – styková jednotka
 ŘB – řídicí blok
 DM – diagnostický model
 VZ – vyhodnocovací zařízení
 GVP – generátor vstupních podmínek

Výhody off-line diagnostiky

- Nízké počáteční náklady
- Menší množství dat
- Jednoduchost

▪ **On-line**

Tyto diagnostické systémy sledují diagnostické veličiny během normální činnosti stroje, cyklicky i nepřetržitě, obvykle automaticky, mají monitorování. Umožňují i prevenci poruch.



Obrázek 11. – Schéma diagnostického systému On-line

X,Y – vstup a výstup

DO – diagnostický objekt
JS – styková jednotka
ŘB – řídicí blok
DM – diagnostický model
VZ – vyhodnocovací zařízení

Výhody on-line diagnostiky

- Přímá vazba stavu vřetene
- Kontinuální měření stavu stroje bez přerušení provozu
- Včasné odhalení závady
- Vyšší efektivita využití ložiska
- Jednorázové umístění snímače v nepřístupných místech
- Nízké provozní náklady

1.5.1 Diagnostické parametry (veličiny)

Vibrodiagnostika je jedním z nejvýznamnějších oborů technické diagnostiky, řídí se obecnými projevy strojů zatěžovaných a opotřebovávaných v provozu. Podkladem pro vyhodnocovací metody jsou kvalitní údaje o sledovaném systému, které získáme buď jednorázovým změřením vibrací, nebo trvalým sledováním. V oblasti mechanického chvění se k diagnostickým účelům používá frekvence (kmitočet) a dále veličiny jako rychlost vibrací, zrychlení vibrací a výchylka vibrací.

Rychlost vibrací

Rychlost obecně představuje míru změny polohy. Měří se v jednotkách vzdálenosti za jednotku času. Při měření signálů vibrace představuje rychlost často míru změny posuvu a je vyjádřena v palcích (in) nebo milimetrech (mm) za sekundu.

Provozní rychlost je rychlost (obvykle vyjádřená v otáčkách za minutu (rpm)) spuštěného rotujícího zařízení. Také se vyjadřuje v hertzech, kdy se otáčky za minutu (rpm) dělí 60 [3], [19].

Zrychlení vibrací

Zrychlení obecně je tempo změny rychlosti; v metrickém systému je často vyjádřeno prostřednictvím jednotek „g“ nebo „mm/s²“, v anglosaském jako „palce/s²“. Zrychlení není konstantní, ale nabývá při cyklu vibrace různých hodnot. Maximálních hodnot dosáhne, když rychlost dosáhne minimálních hodnot. Obvykle se jedná o situaci, kdy určitá hmota zpomalila do klidu a chystá se opět zrychlit.

Ve vyšších frekvencích, kde se prvotně ložiskové vady objevují, je zrychlení jako parametr citlivější než rychlost vibrací. Měřicí rozsah (frekvenční pásmo) závisí na aplikaci a může být např. od 5 Hz do 10 kHz. Horní hranice pásma bývá často vyšší (např. u diagnostiky vysokootáčkových ložisek a ozubení). Lze zařadit i úzkopásmové filtry, pokud se sleduje specifické chování ložiska. Jednotky jsou ms⁻² (násobky gravitačního zrychlení g) [3], [21].

Výchylka vibrací

Je to hodnota souřadnice určující polohu prvku kmitající mechanické soustavy vzhledem k jeho rovnovážné poloze.

Teplota

Z hlediska diagnostiky poruch ložisek není teplota dostatečně dynamickou veličinou určující aktuální stav měřeného objektu. Měření teploty však slouží jako parametr charakterizující podmínky zkoušky (možnost porovnání trendových hodnot). Měření teploty má tedy informativní charakter [7].

Jako další diagnostické parametry se dají použít:

- Akustická emise
- Akustický tlak
- Napájecí proudy pohonů
- Průtoky chladiva a maziva
- Čistota mazacího oleje

1.6 Způsoby měření vibrací

Vibrační metody měření jsou rozděleny podle charakteru měřeného (vyhodnocovaného) parametru [7].

1.6.1 Měření mohutnosti vibrací

Měření Mohutnosti vibrací je v souladu s normou ČSN ISO 10816-1. Jde o měření celkových hodnot rychlosti vibrací v rozsahu 10 až 1000Hz, lze provádět i frekvenční analýzu. Obecné zásady pro vyhodnocení měření pro obráběcí stroje vychází z normy ČSN 200065 a pro obecné stroje z ČSN 101411.

1.6.2 Měření obálky vysokofrekvenčních vibrací

Je efektivní metoda pro zpracování signálů typu krátký impulz malé energetické úrovně (např. poruchy ložisek ozubených kol). Cílem je odfiltrovat nízkofrekvenční vibrační signály pocházející od motoru, převodů a další mechaniky stroje. Je potřeba zesílit signály vysokofrekvenční. Měření a zpracování signálu se provádí v různých frekvenčních pásmech (podle provozních podmínek). Z demodulovaného spektra lze vyhodnotit stav ložiska. Porucha na některém z komponentů ložiska se ukáže na specifické frekvenci pro dané otáčky a lze ji podle velikosti amplitudy detekovat. Tuto analýzu lze provádět ve spektru zrychlení nebo rychlosti.

1.6.3 Metoda akustické emise – SEE

Metoda SEE vyšetřuje ultrazvukovou emisi ve frekvenčním pásmu 250 až 350 kHz, vznikající při tření kovu o kov.

Vznik ultrazvukové emise ovlivňují:

- Nedostatečné mazání
- Vznikající závada ložiska
- Znečištění mazacího tuku
- Mikroprokluzování
- Tření ložiska

Metoda je nesmírně citlivá, je zapotřebí správně přiřadit zmíněnou emisi skutečnému zdroji. Parametrem je bezrozměrné číslo, které je porovnáváno s mezními hodnotami (Tab. 1). Metoda je patentována a distribuována výhradně firmou SKF, včetně speciálních snímačů a vyhodnocovacího SW. Lze měřit jednoduchým přístrojem SEE-pen. Jde o podpůrnou metodu diagnostiky.

Tabulka 1. – Mezní hodnoty

Stav ložiska	Hodnota [SEE]
elektrický šum, bezporuchový stav, dobré mazání	5÷7
vznik mikrotrhlinek, porucha mazání	10÷100
blízká destrukce ložiska (orientačně) – nutno ověřit	200÷300

1.6.4 Crest faktor

Zpracovává již dříve vypočtené hodnoty celkových vibrací. Je poměrem RMS/PEAK. Používá se především u zrychlení vibrací. Nevýhodou je, že hodnoty se při velkém poškození opět vrací na stav, který odpovídá nepoškozenému ložisku.

1.6.5 Q faktor

Metoda je založená na stejném principu jako Crest faktor. Porovnává střední hodnotu/PEAK.

1.6.6 Audio záznam vibračního signálu ze snímače

Jde o informativní metodu vibrační diagnostiky, která je příliš citlivá na subjektivní hodnocení měřící osoby. Audio záznam lze pořídit například přístrojem Adash A 4900, který zpracovává signál z akcelerometru a převádí jej na akustický signál (např. do sluchátek). Přes propojovací kabel se analogová data ukládají na disk v PC ve formátu wav.

1.6.7 Měření amplitudy a fáze

Spočívá v měření amplitudy kmitání na otáčkové, nebo jinak stanovené frekvenci. Při tomto měření je nutné mít k analyzátoru připojenou otáčkovou sondu, podle které se stanoví otáčková frekvence. Přístroj vyhodnocuje amplitudu na zvolené frekvenci.

1.6.8 Hladina akustického tlaku v blízkosti vřetene

Informativní měření hladiny akustického tlaku slouží k dokreslení podmínek měření. Měření se provádí např. přenosným integračním hlukoměrem v blízké vzdálenosti.

1.6.9 Harmonická analýza – vibrací i hluku

Cílem měření je identifikovat harmonické složky v měřeném signálu. Základní harmonická složka je většinou otáčková frekvence. Umožňuje rozeznání kmitavých dějů závislých na otáčkách (harmonické složky) a dějů nezávislých (vlastní frekvence, nezávislé zdroje). Je prováděna za provozu stroje a postihuje vliv rotujících částí (ložisek). Neumožňuje zjištění dynamické poddajnosti [7].

1.7 Kalibrace

Před hlavním měřením a jeho nejistotou by bylo dobré říct si něco o kalibraci měřicího přístroje.

Provozní kalibrace při měření akustického tlaku se provádí na začátku řady měření. Kalibrace celého měřicího zařízení se provádí mezi referenčním signálem akustického kalibrátoru a výstupem z mikrofonu. Mikrofon se zasune do kalibrátoru, který generuje harmonický signál. Z analyzátoru se odečte naměřená hodnota a upraví se automaticky koeficient citlivosti mikrofonu (celé měřicí cesty). Hodnota takto upravené citlivosti se zapíše do protokolu. Tímto způsobem se kalibrují všechny použité mikrofony.

Provozní kalibrace pro měření zrychlení se určuje porovnáním mezi referenčním zdrojem vibrací a výstupem z kontrolovaného akcelerometru. Tento akcelerometr se připevní na referenční zdroj vibrací, který generuje harmonický signál. Z analyzátoru se odečte naměřená hodnota a upraví se koeficient citlivosti akcelerometru (pro celou měřicí cestu), tak aby naměřené zrychlení odpovídalo referenční hodnotě zrychlení. Hodnota takto upravené citlivosti se zapíše do protokolu. Tímto způsobem se kalibrují všechny použité akcelerometry (do hmotnosti 70g).

Některé akcelerometry pro diagnostická měření přesahují svojí hmotností přípustnou mez použití. Neprovádí se tedy provozní kalibrace před každým měřením, ale pouze kontrola citlivosti snímačů jednou za čas (např. jedenkrát za tři roky). Kontrola citlivosti snímačů (celého měřicího zařízení) se provádí porovnáním výstupního signálu referenčního a „kalibrovaného“ akcelerometru dle normy ČSN ISO 16063-21 [7].

1.8 Nejistota měření

Monitorování vibrací za účelem monitorování stavu je založeno na úvaze, že sledované vibrace se mění vlivem vnějších podmínek a provozních podmínek stroje. Nejistota měření (při analýze frekvenčního spektra) se skládá z měření amplitudy, frekvence a fáze vibrací. Rozhodují pro diagnostickou praxi je výpočet nejistoty amplitudy vibrací [7].

Nejistotu měření ovlivňuje:

1. Nejistota přenosu signálu ze snímače – poškození snímačů, upevnění kabelů, jejich odstínění.
2. Druh upevnění snímače a příslušné zkreslení signálu.
3. Přesnost měřicího zařízení zpracovávající signál ze snímače.
4. Nastavení parametrů FFT analyzátoru (při vyhodnocování frekvenčních spekter).

5. Příčné vibrace (vzhledem k ose snímače).
6. Nelinearita FRF snímače ve vysokých frekvencích.

Další faktory přesnost výsledku jednorázového měření neovlivňují, ale hrají svou roli při opakovatelnosti měření (trendování).

7. Teplota v blízkosti ložisek.
8. Poloha vřetene.
9. Je nutné zajistit stejné podmínky zkoušky.

Obecně zanedbatelné faktory:

10. Kolísání provozních podmínek zkoušeného stroje (otáčky).
11. Hluk vřetene, okolí.
12. Elektrické a magnetické pole, výkyvy vlhkosti.

Možnosti eliminace vlivů:

1. Použité snímače vibrací jsou kalibrovány, hodnota kalibrace by se teoreticky neměla měnit.
2. Způsob upevnění snímače viz. ČSN ISO 5348:1999, Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů. Při opakovaném měření (trendování) je důležité umístit snímač vždy na stejné místo. Dále je nutné pečlivě vybrat umístění snímačů (nejlépe na tuhé části konstrukce).
3. Přesnost měřícího zařízení je opět dána kalibrací kdy, součástí kalibrace je i zkouška celého měřícího řetězce
4. Nutno dbát na dodržení zásad zpracování signálu a údaje zaznamenat a uložit spolu s měřením.
5. Dbát na pečlivé umístění snímačů (kolmo na měřící plochu) z důvodu malé citlivosti v příčném směru.

Na ukázkou jsem uvedl několik výpočtů nejistot [7].

Rozšířená nejistota U je dána vztahem:

$$U = k_r \cdot u_c \quad (11)$$

kde: k_r – je koeficient rozšíření
 u_c – je kombinovaná standardní nejistota

Pro výpočet kombinované standardní nejistoty používáme vztah:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (12)$$

kde: u_A – je standardní nejistota typu A
 u_B – je standardní nejistota typu B

Metoda vyhodnocení standardní nejistoty typu A vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Minimální počet měření je 10. Je-li y měřená veličina, platí pro standardní nejistotu typu A vztah:

$$u_{Ay} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

kde: u_{Ay} – je standardní nejistota typu A
 y_i – veličina y naměřená při i -tém měření
 \bar{y} - průměr veličiny y z n měření
 i – index měření
 n – počet měření

Metoda vyhodnocení standardní nejistoty typu B je založena na jiných než statistických přístupech k analýze sériového pozorování (měření) Standardní nejistotu typu B určíme podle vztahu:

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 \cdot u_{Bzj}^2} \quad (14)$$

kde: u_{By} – je standardní nejistota typu B
 u_{Bzj} – standardní nejistota typu B jednotlivých zdrojů
 A_j – součinitel citlivosti jednotlivých zdrojů
 j – index zdrojů nejistot
 p – počet zdrojů nejistot

Standardní nejistoty typu B od jednotlivých zdrojů se vypočítají podle vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (15)$$

kde: z_{jmax} – je maximální odchylka způsobená j -tým zdrojem nejistoty
 k – je součinitel vycházející ze zákona rozdělení

Součinitel citlivosti jednotlivých zdrojů se stanoví za předpokladu, že veličina y je funkcí j -tého počtu vstupních veličin x , jako:

$$A_j = \frac{\partial y}{\partial x_j} \quad (16)$$

Ke zjištění standardní nejistoty typu B je tedy zapotřebí určit zdroje chyb Z_j v měřicím řetězci [7].

2 Praktická část

Tato část zahrnuje popis měřicího zařízení, návrh metody měření vibrací na vřetenech obráběcích strojů. Dále kapitola zahrnuje stručný popis nastavení měřících bodů a doporučené umístění snímače při měření. Na závěr této části je popsáno vyhodnocení měření CNC řízeného soustruhu se dvěma řízenými osami X a Z.

2.1 Měřicí zařízení

Pro měření jsem použil přístroj používaný firmou Misan s.r.o. Přístroj je ideální pro takovéto měření a pro vyhodnocení servisního zásahu je dostačující. Investice do lepšího a přesnějšího měřicího zařízení by pro firmu byla nenávratná – není reálné pořídit velkou aparaturu v řádech set tisíc Kč, proto volím jednodušší vibrometr, používaný firmou Misan s.r.o., ovšem s možností záznamu a provedením analýzy frekvenčních spekter.



Obrázek 12. – Aparatura

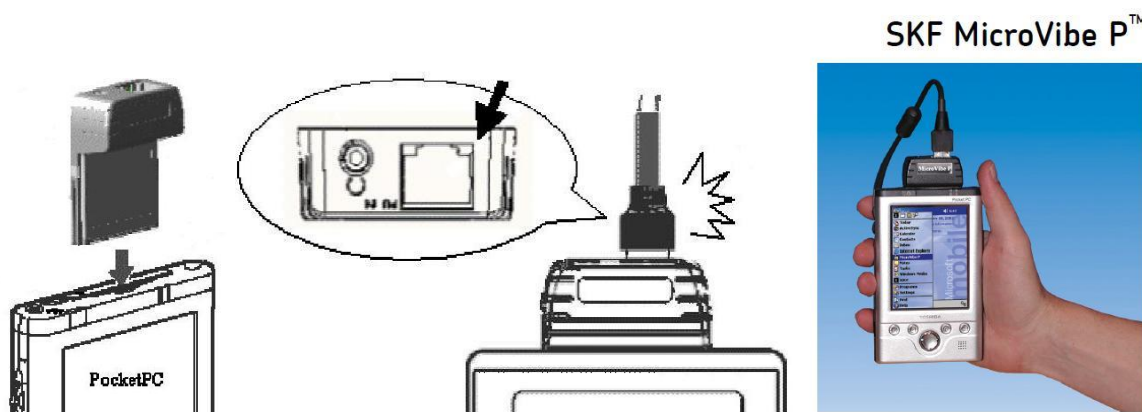
- Výrobce: SKF Condition Monitoring, Inc.
5271 Viewridge Court
San Diego, California 92123
(858) 496-3400
- Typ: SKF MicroVibe P
Model No. CMVL3850
- Použitá verze: Version: 2.01
- Databáze: Version: 1.04
- Senzor: CMSS3811



Obrázek 13. – Připravený senzor

2.2 Návrh metodiky měření

Tato podkapitola slouží jako navržená metodika pro měření vibrací pomocí SKF MicroVibe P. Nejdříve doporučuji jednoduché sestavení měřicí aparatury (Obrázek 14) a připravit se tak na měření vibrací.

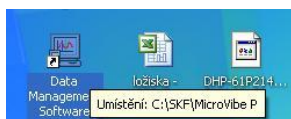


Obrázek 14. – Připojení aparatury

Dále postupuji spuštěním aplikačního programu „Data management software“ potřebného pro používaný způsob měření vibrací včetně obráběcích strojů ve firmě Misan s. o. r. v Lysé nad Labem.

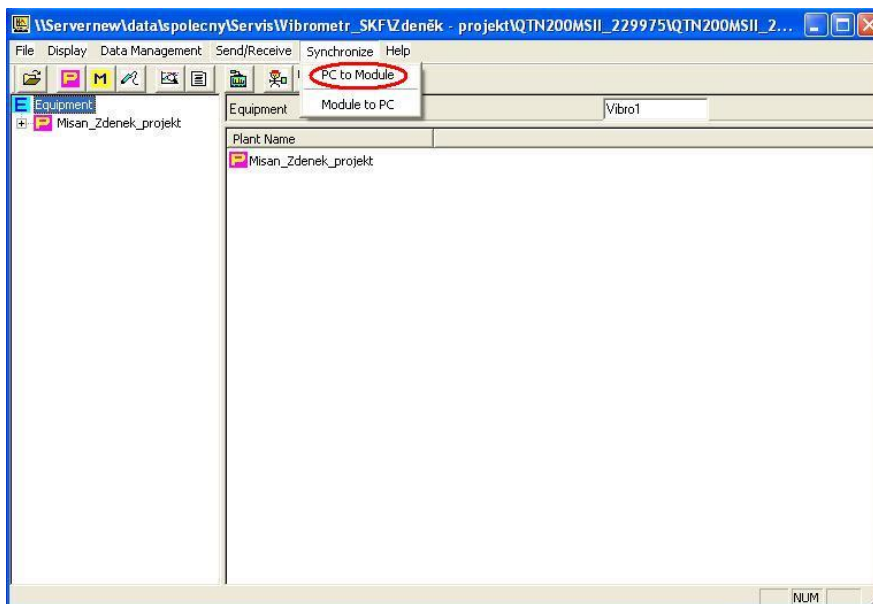
Volba měřících otáček je stanovena na 0%, 25%, 50%, 75% a 100% maximálních otáček měřeného stroje.

- Spuštění softwaru a otevření pracovního prostředí programu (např. ikona na ploše)



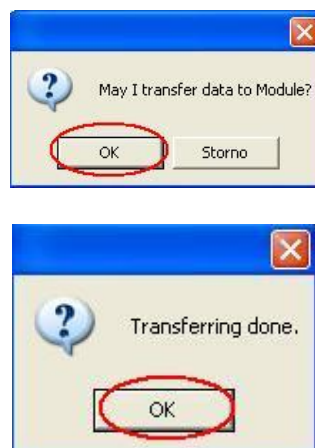
Obrázek 15. – Příklad spuštění programu

- Synchronizace počítače s měřícím přístrojem



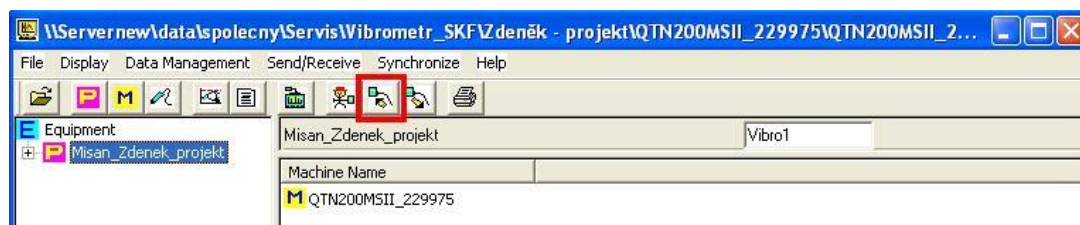
Obrázek 16. – Synchronizace PC/Modul

- Potvrzení synchronizace



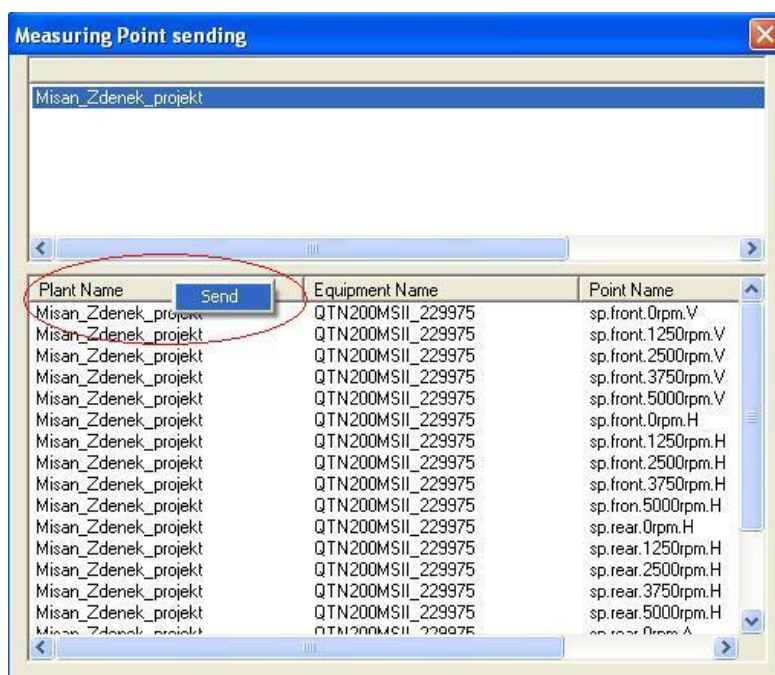
Obrázek 17. – Potvrzení synchronizace tlačítkem OK

- Spuštění předvolby pro nahrání zvolených měřících bodů do měřícího zařízení



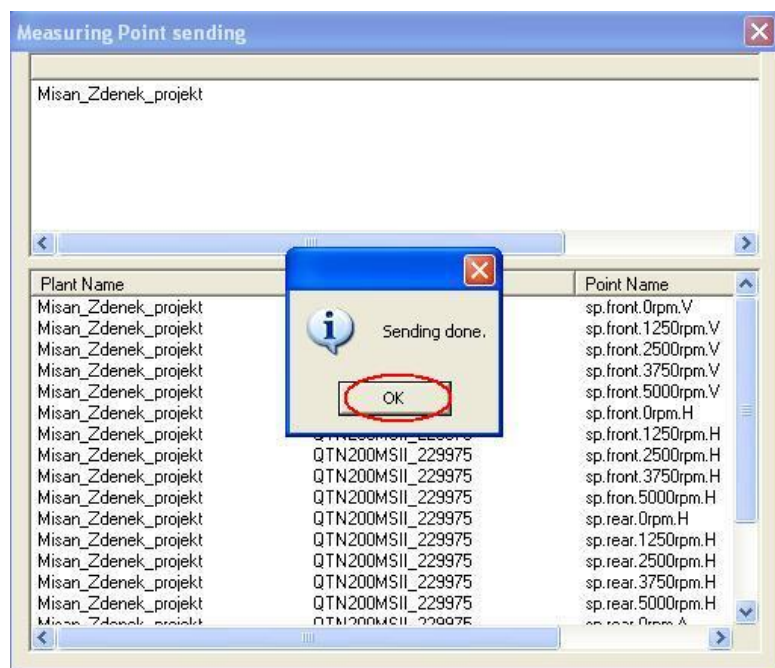
Obrázek 18. – Ikona předvolby pro nahrání

- Nahrání zvolených měřících bodů



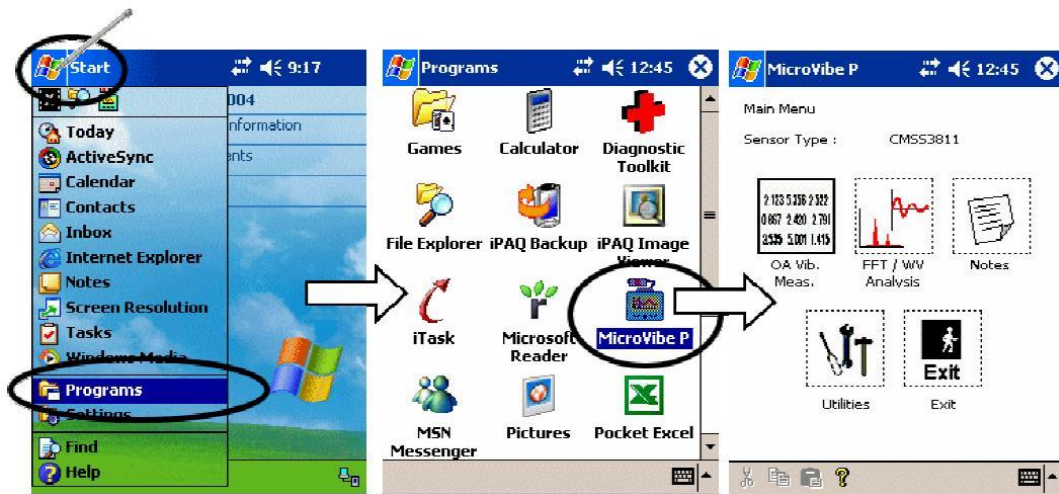
Obrázek 19. – Nahrání měřících bodů

- Úspěšné nahrání měřících bodů do zařízení



Obrázek 20. – Úspěšné potvrzení pro nahrání měřících bodů tlačítkem OK

Pokud je vše úspěšně připravené zapneme měřicí program v přístroji.



Obrázek 21. – Zapnutí přístroje

Nyní můžeme přistoupit k samotnému měření vibrací.

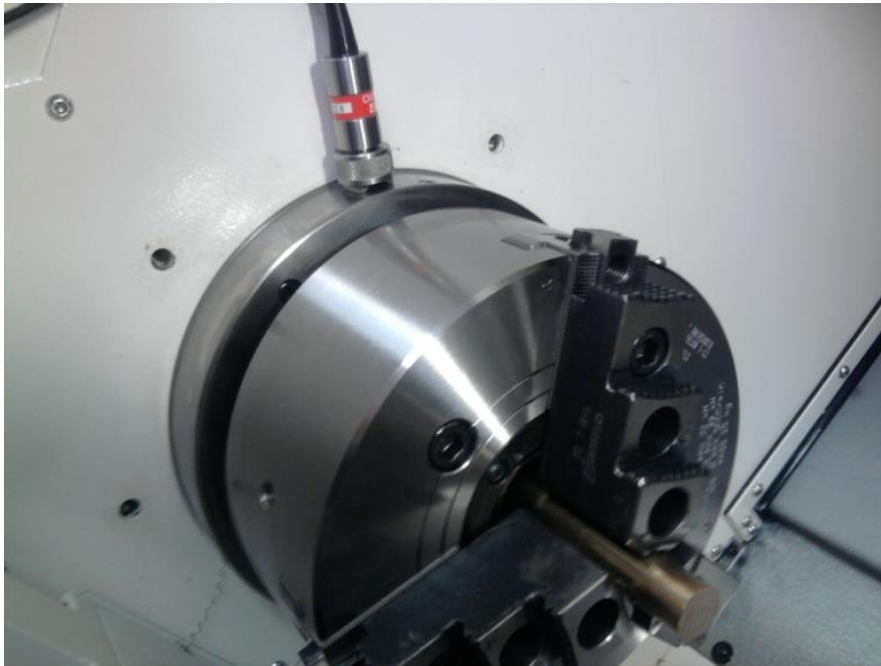


Obrázek 22. – Měření vibrací [25]

2.3 Umístění snímače (vibrometru) při prováděném měření:

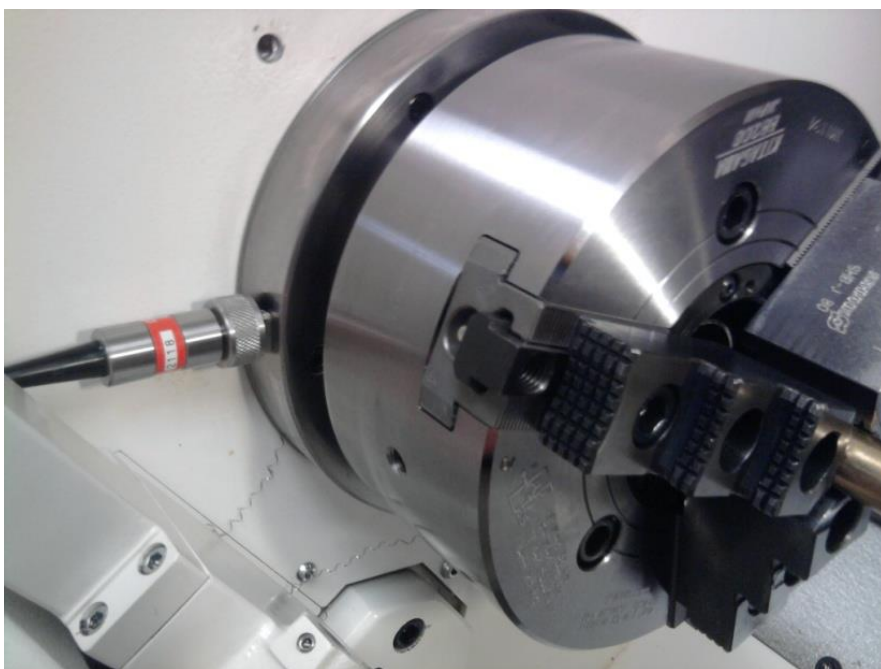
Doporučuji umístit snímače podle obrázků 23 až 28, zde jsou popsány všechny směry měření vřetena. Názvy obrázků mám podle přehledného řazení programu „Data management software“ (Příklad: sp.front.0rpm V – měřící bod zepředu vřetena vertikálního směru při nulových otáčkách).

- Snímač umístěn radiálně na osu vřetene shora ve vertikálním směru



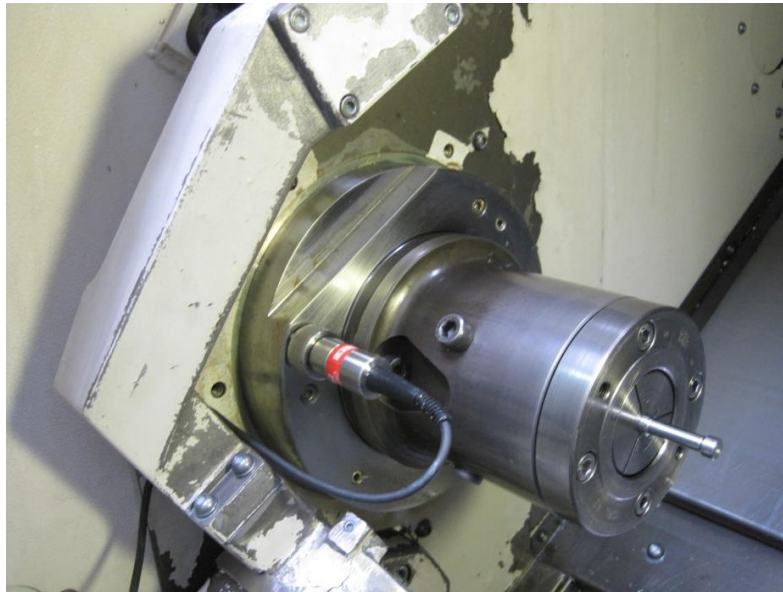
Obrázek 23. – sp.front.0rpm V

- Snímač umístěn radiálně na osu vřetene zepředu v horizontálním směru



Obrázek 24. – sp.front.0rpm H

- Snímač umístěn axiálně na osu vřetene vpředu v horizontálním směru



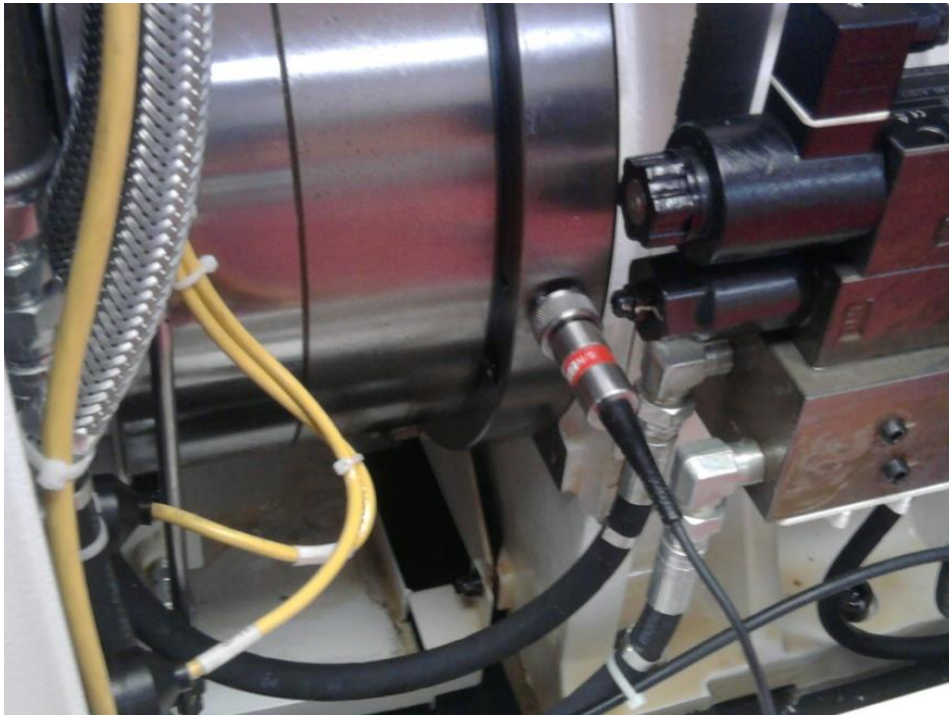
Obrázek 25. – sp.front.0rpm A

- Snímač umístěn radiálně na osu vřetene vzadu ve vertikálním směru



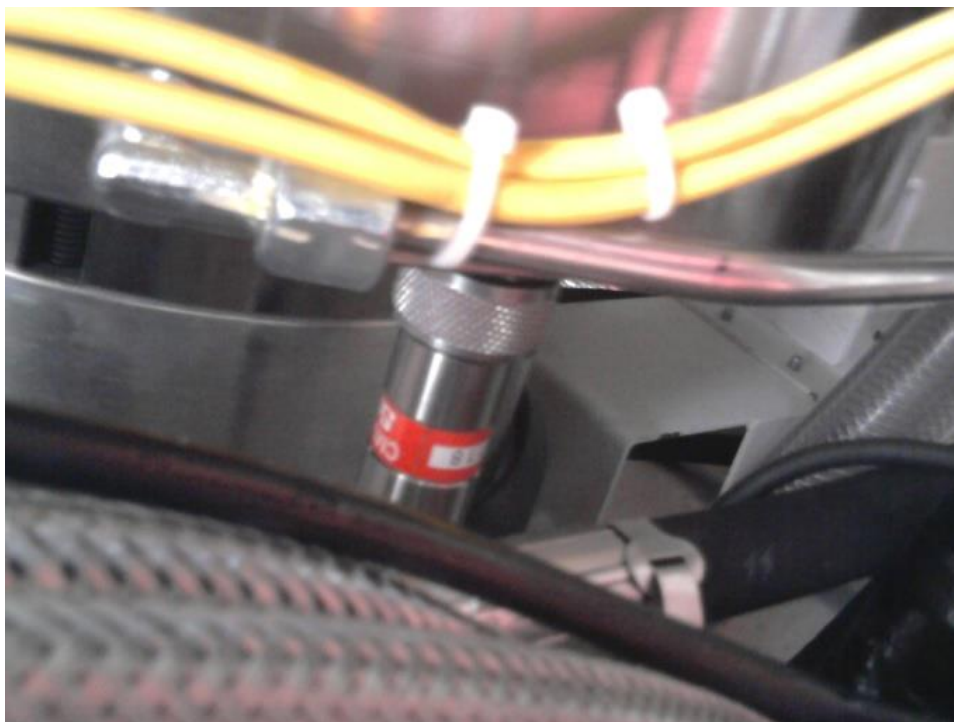
Obrázek 26. – sp.rear.0rpm V

- Snímač umístěn radiálně na osu vřetene vzadu v horizontálním směru



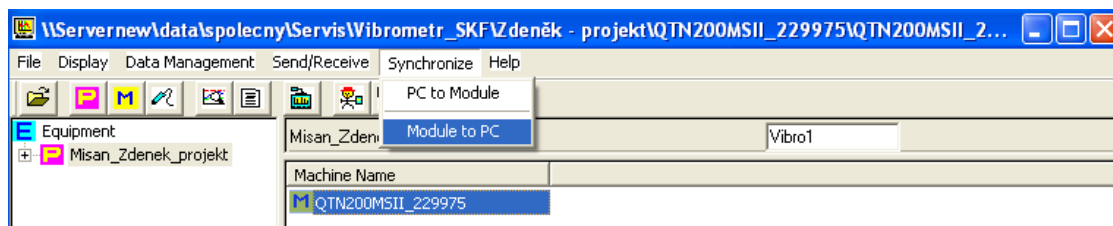
Obrázek 27. – sp.rear.0rpm H

- Snímač umístěn axiálně na osu vřetene vzadu v horizontálním směru

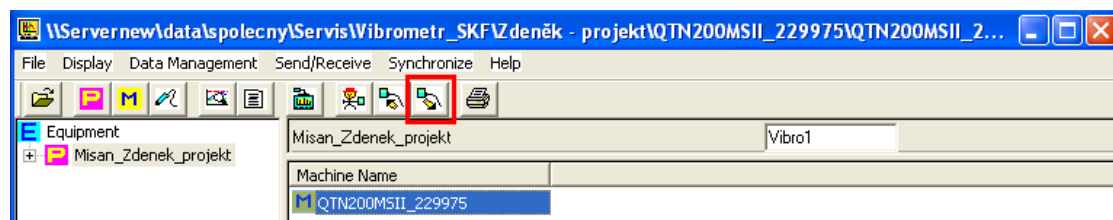


Obrázek 28. – sp.rear.0rpm A

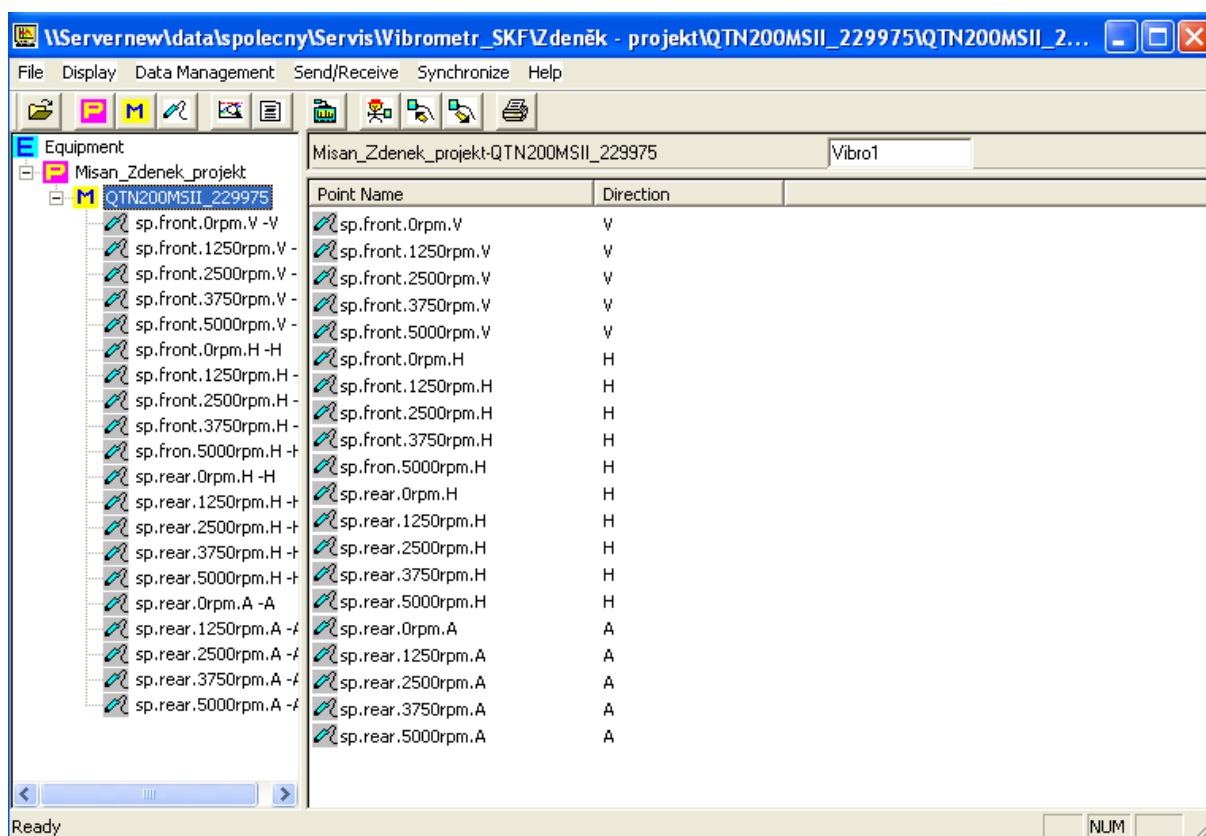
Pokud máme vše naměřené, opět propojíme přístroj s počítačem a zaznamenaná data nahrajeme do programu. Nejprve musíme opět synchronizovat Modul/PC.



Obrázek 29. – Synchronizace Modul/PC



Obrázek 30. – Ikona pro nahrání bodů z modulu do PC



Obrázek 31. – Naměřené body

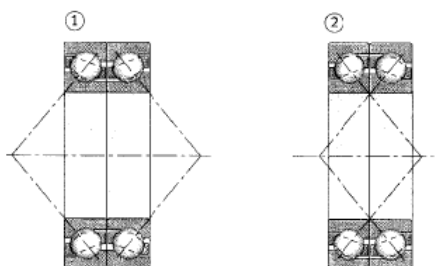
Po úspěšném nahrání můžeme prohlížet či vyhodnocovat naměřené hodnoty jednotlivých bodů a prohlížet naměřená frekvenční spektra.

2.4 Ověření použité metodiky

Praktické ověření jsem provedl na číslicově řízeném soustruhu typu QTN100II od japonského výrobce Mazak, umístěném u koncového zákazníka.

Stroj QTN100II je vybaven vřetenem s integrovaným pohonem (bez řemenů a řemenic) zaručující dokonalé opracování povrchu s vysokou geometrickou přesností obrobených ploch. Motor a vřeteno tvoří jedinou konstrukční skupinu bez použití převodovky, neboť integrovaný motor má vysoký krouticí moment a široký rozsah konstantního výkonu. Menší počet dílů pak znamená zvýšení spolehlivosti. Použití lineárního vedení u soustruhu zajišťuje rychlost a přesnost polohování. Lineární vedení má nízký koeficient tření a tím odstraňuje jakýkoliv trhavý pohyb. Současně při polohování rychloposuvem vzniká jenom nepatrné množství tepla, takže je dlouhodobě zajištěno obrábění s vysokou přesností.

Uložení vřetene je patrné z přílohy 4. Jedná se tedy o uložení ve valivých ložiskách. Přední ložisková skupina sestavená z trojice jednořadých kuličkových ložisek typu 7018 ACD konstrukčně uspořádaných do „O“ (Obrázek 32), což zajišťuje přenos radiálních i axiálních sil. Zadní uložení vřetene je realizováno jedním jednořadým válečkovým ložiskem typu N1016 zajišťující přenos radiálních sil v zadní části vřetene. Mazání všech vřetenových ložisek je realizováno pomocí mazací vazelíny typu Klüber NBU15 (namazáno výrobcem stroje při montáži vřetene).



Obrázek 32. – Uspořádání ložisek 1.) do „O“, 2.) do „X“ [25]

V tabulkách 2 (měření po opravě – strana 39), 3 (po 7 měsících provozu – strana 40) a 4 (nový stroj – strana 41) jsou hodnoty naměřených vibrací. V příloze 1 jsou zobrazeny nejvyšší amplitudy zrychlení s příslušnými frekvencemi. V příloze 2 jsou přehledně znázorněny ložiskové frekvence vřetene tohoto stroje při určitých otáčkách. Na obrázku 33 je uveden analyzovaný obráběcí stroj. Jeho podrobnější popis je uveden v příloze 3.



Obrázek 33. – CNC řízený soustruh se dvěma řízenými osami X a Z [25]

Měření vibrační bylo provedeno pomocí vibrometru SKF Microvibe CMVL3850-ML, při upnutém vyváženém přípravku bez zatížení reznými silami. Měření zaznamenané na přední přírubě vřetene (přední ložiska) a na zadní přírubě motoru vřetena (zadní ložisko) ve všech polohách. Měření bylo provedeno při otáčkách odpovídajících 0%, 25%, 50%, 75% a 100% nominálních otáček vřetene. Zaznamenávána byla jednak efektivní hodnota rychlosti kmitání v_e , jednak vrcholová hodnota výchylky kmitání s_e (dle normy ČSN 20 0065 „Metody měření a hodnocení mechanického kmitání, mezní hodnoty kmitání“). Naměřené hodnoty jsou přehledně zpracovány v tabulkách 2, 3 a 4, ve kterých je rovněž vypočten aritmetický průměr měřených hodnot v jednotlivých směrech – dle požadavků výše zmiňované normy pro porovnání s mezními hodnotami kmitání. Mezní hodnoty dle ČSN 20 0065 pro kategorii strojů „Obráběcí centra a bezobslužné obráběcí stroje s vodorovnou osou pro rotační obrobky“ (průměr obrobku nad 200mm) jsou následující:

$$V_{\text{emez}}=1,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$S_{\text{emez}}=1,6 \text{ } \mu\text{m}$$

Testované vřeteno po opravě z hlediska efektivních hodnot rychlosti kmitání je srovnatelné s hodnotami nového stroje ve všech směrech. Z porovnání naměřených hodnot v rozmezí provedeného měření (7 měsíců) došlo k mírnému zhoršení stavu uložení vřetene. Výrazné zhoršení nebylo očekáváno s ohledem na bezproblémový provoz stroje (v mezidobí). Zejména nedošlo k žádné kolizi vřetene. Naměřené hodnoty nepředstavují žádné alarmující výsledky. Jedná se o stav vřetene, který odpovídá jeho provozní historii.

Tabulka 2. – Naměřené vibrace obráběcího stroje QTN100II po opravě

1.	Místo a směr umístění snímače											
	1						2					
	V		H		A		V		H		A	
	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e
A (hlavní vypínač vypnut, přenos kmitání z okolí)												
B (hlavní vypínač zapnut, vliv uzemnění)												
$n_1=0$	0,03	0,18	0,03	0,21	0,02	0,44	0,03	0,15	0,02	0,17	0,02	0,48
$n_2=0,25 \times n_{max}$	0,02	0,33	0,03	0,36	0,02	0,34	0,04	0,49	0,05	0,41	0,03	0,55
$n_3=0,5 \times n_{max}$	0,06	0,65	0,1	1,06	0,07	0,6	0,11	0,79	0,15	1,34	0,09	0,81
$n_4=0,75 \times n_{max}$	0,21	1,46	0,46	3	0,47	3,09	0,31	1,98	0,94	6,09	0,55	3,62
$n_5=n_{max}$	0,14	0,79	0,54	2,77	0,23	1,28	0,33	2,11	0,8	3,85	0,3	1,59
Výsledné aritmetické průměry	0,09	0,68	0,23	1,48	0,16	1,15	0,16	1,1	0,39	2,37	0,2	1,41
v_e - efektivní hodnota rychlosti kmitání [$mm \cdot s^{-1}$] s_e - efektivní hodnota výchylky kmitání [μm] n_x - otáčky vřetena (ot/min) $v_{mez}=1,18 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ $s_{mez}=16 \mu m$ $n_{max}=6000 \text{ ot/min}$ Umístění snímače: poloha 1: přední příruba vřetena (přední ložiska) poloha 2: zadní příruba motoru vřetena (zad.ložiska) Poloha stroje: X=0,000 Z=0,000 Stroj: QTN100II Výrobní číslo: 201724 Datum: 29.8.2012 Měření provedl: Zdeněk Černý Poznámky: mezní hodnoty dle ČSN 20 0065												

Tabulka 3. – Naměřené vibrace obráběcího stroje QTN100II po 7 měsících

2.	Místo a směr umístění snímače											
	1						2					
	V		H		A		V		H		A	
	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e
A (hlavní vypínač vypnut, přenos kmitání z okolí)												
B (hlavní vypínač zapnut, vliv uzemnění)												
$n_1=0$	0,01	0,22	0,03	0,3	0,02	0,14	0,02	0,17	0,03	0,83	0,02	0,26
$n_2=0,25 \times n_{max}$	0,03	0,36	0,06	0,85	0,05	0,69	0,04	0,58	0,08	1,28	0,07	0,96
$n_3=0,5 \times n_{max}$	0,1	1,01	0,18	1,4	0,15	1,03	0,1	0,82	0,24	2,45	0,17	1,28
$n_4=0,75 \times n_{max}$	0,36	2,19	0,78	4,81	0,87	5,88	0,29	2,08	1,44	9,05	0,85	5,65
$n_5=n_{max}$	0,43	2,49	0,36	2,27	0,3	1,46	0,4	2,4	0,82	4,5	0,35	2,03
Výsledné aritmetické průměry	0,19	1,25	0,28	1,92	0,28	1,84	0,17	1,21	0,52	3,62	0,29	2,03
v_e - efektivní hodnota rychlosti kmitání [$mm \cdot s^{-1}$] s_e - efektivní hodnota výchylky kmitání [μm] n_x - otáčky vřetena (ot/min) $v_{mez}=1,18 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ $s_{mez}=16 \mu m$ $n_{max}=6000 \text{ ot/min}$ Umístění snímače: poloha 1: přední příruba vřetena (přední ložiska) poloha 2: zadní příruba motoru vřetena (zad.ložiska) Poloha stroje: X=0,000 Z=0,000 Stroj: QTN100II Výrobní číslo: 201724 Datum: 29.3.2013 Měření provedl: Zdeněk Černý Poznámky: mezní hodnoty dle ČSN 20 0065												

Tabulka 4. – Naměřené vibrace nového obráběcího stroje v předváděcí hale firmy Misan s.r.o.

3.	Místo a směr umístění snímače											
	1						2					
	V		H		A		V		H		A	
	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e	v_e	s_e
A (hlavní vypínač vypnut, přenos kmitání z okolí)												
B (hlavní vypínač zapnut, vliv uzemnění)												
$n_1=0$	0,02	0,16	0,03	0,16	0,02	0,3	0,02	0,14	0,02	0,22	0,02	0,44
$n_2=0,25 \times n_{max}$	0,02	0,4	0,04	0,62	0,02	0,2	0,02	0,3	0,04	0,56	0,03	0,39
$n_3=0,5 \times n_{max}$	0,07	0,73	0,05	0,39	0,07	0,5	0,09	0,5	0,1	1,09	0,08	0,65
$n_4=0,75 \times n_{max}$	0,28	2,08	0,54	3,55	0,45	2,5	0,19	0,9	0,96	6,03	0,46	2,87
$n_5=n_{max}$	0,18	0,96	0,11	0,57	0,19	1,13	0,2	1,5	0,31	1,65	0,1	0,72
Výsledné aritmetické průměry	0,11	0,87	0,15	1,06	0,15	0,93	0,1	0,67	0,29	1,91	0,14	1,01
v_e - efektivní hodnota rychlosti kmitání [$mm \cdot s^{-1}$] s_e - efektivní hodnota výchylky kmitání [μm] n_x - otáčky vřetena (ot/min) $v_{mez}=1,18 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ $s_{mez}=16 \mu m$ $n_{max}=6000 \text{ ot/min}$ Umístění snímače: poloha 1: přední příruba vřetena (přední ložiska) poloha 2: zadní příruba motoru vřetena (zad.ložiska) Poloha stroje: X=0,000 Z=0,000 Stroj: QTS100S Výrobní číslo: 229084 Datum: 5.9.2012 Měření provedl: Zdeněk Černý Poznámky: mezní hodnoty dle ČSN 20 0065												

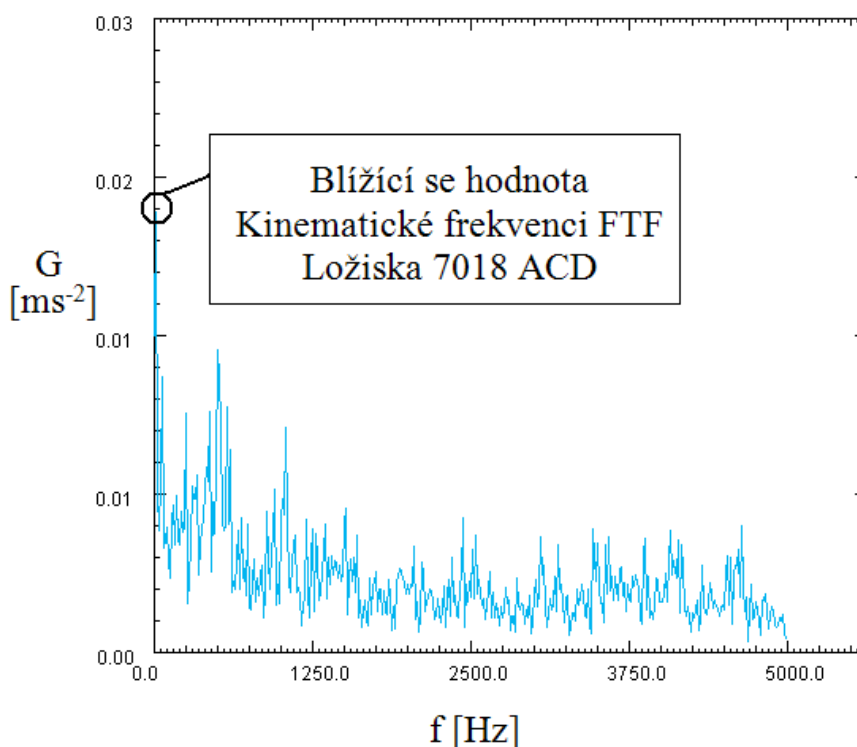
2.4.1 Frekvenční analýza

Z hlediska frekvenční analýzy měřenou filtrem E3 (obálováním E3) odpovídají amplitudy naměřených hodnot v celém frekvenčním pásmu (do 5kHz).

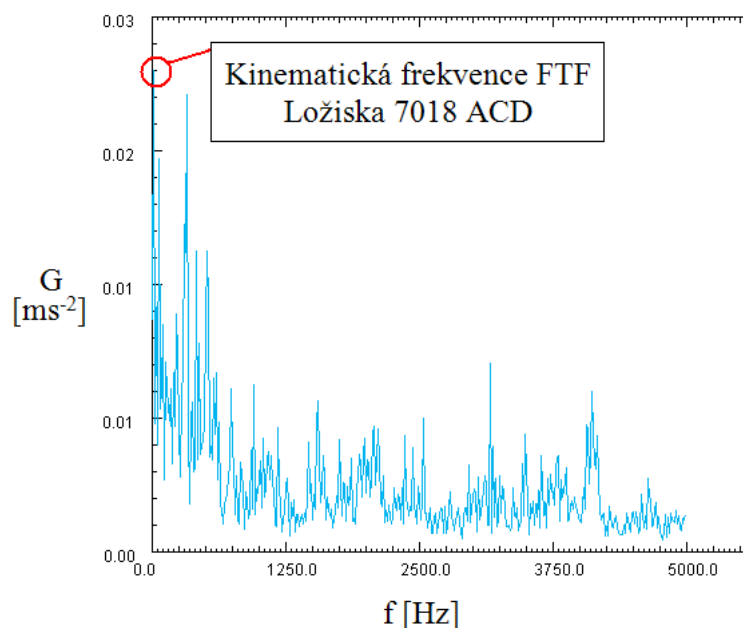
Zvýrazněné hodnoty v příloze 2 často ukazují na možnou chybu klece ložiska. To může být následek konstrukční náročnosti klecí. Zejména v případě zadního ložiska se jedná o mosaznou klec, která je robustnější a proto může vykazovat takové hodnoty zrychlení na nízkých frekvencích. Mosazné klece mají výhodu při zahřívání, například když chybí mazivo, se do jisté míry nic neděje. V případě předního ložiska se polyethylenová klec může změnou teploty deformovat.

Z praktické zkušenosti firmy Misan s.r.o., při opravách vřeten, lze konstatovat soulad ve smyslu častého poškození klecí, zejména v případě provedení z polyetylenu, kdy při zvýšení teploty ložiska v důsledku opotřebení nebo závady dochází k deformaci klece.

Na obrázku 34 a 35 vidíme mírný nárůst amplitud zrychlení, zejména na frekvenci 21,88 Hz což odpovídá ložiskové frekvenci klece. Doporučuji pravidelnou kontrolu vibrometrem a předejít poruše, která může způsobit hlučnost vřetena.

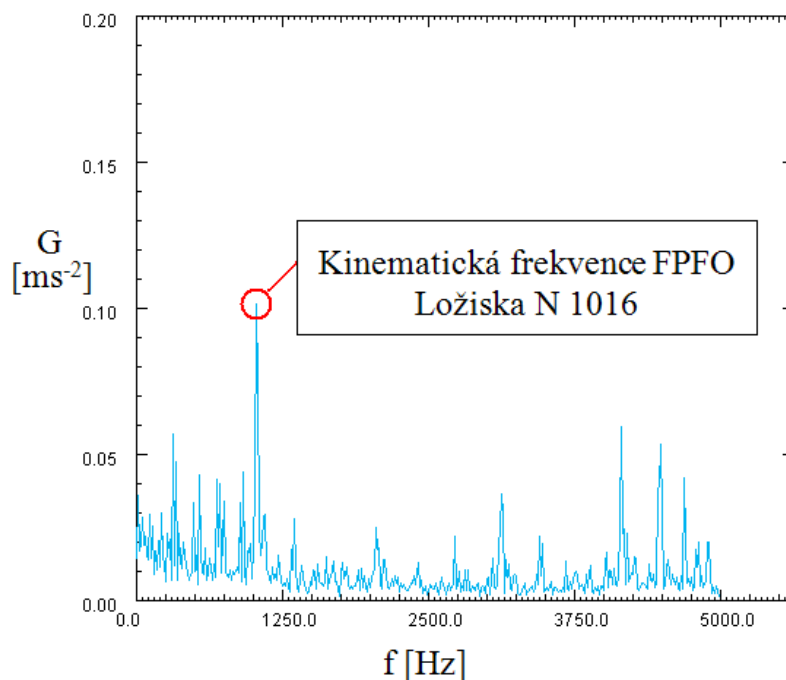


Obrázek 34. – Hodnota obálky zrychlení při 3000 otáčkách v Horizontálním směru přední strany vřetena po opravě stroje



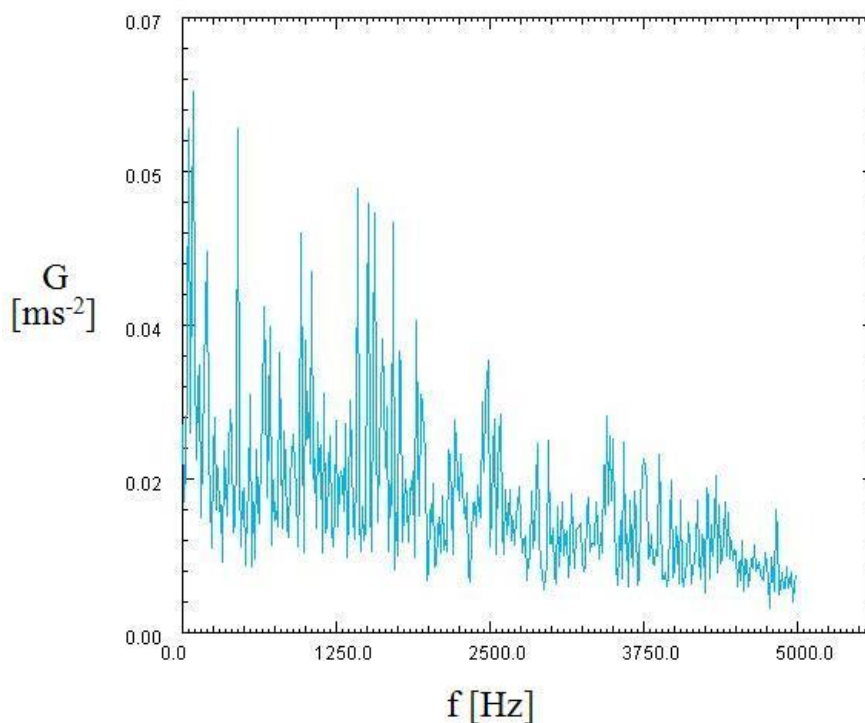
Obrázek 35. – Hodnota obálky zrychlení při 3000 otáčkách v horizontálním směru přední strany vřetena po 7 měsících dalšího provozu stroje

Dále na obrázku 36 vidíme na frekvenci 1038 Hz (což je kinematická frekvence vnějšího kroužku), kde po opravě je patrná malá špička amplitud obálky zrychlení. Po 7 měsících provozu došlo k viditelnému zvýšení amplitudy, lze tedy doporučit zaměřit se v rámci dalšího pozorování vřetena stroje na tuto frekvenční oblast, respektive na zadní vřetenové ložisko jako takové.

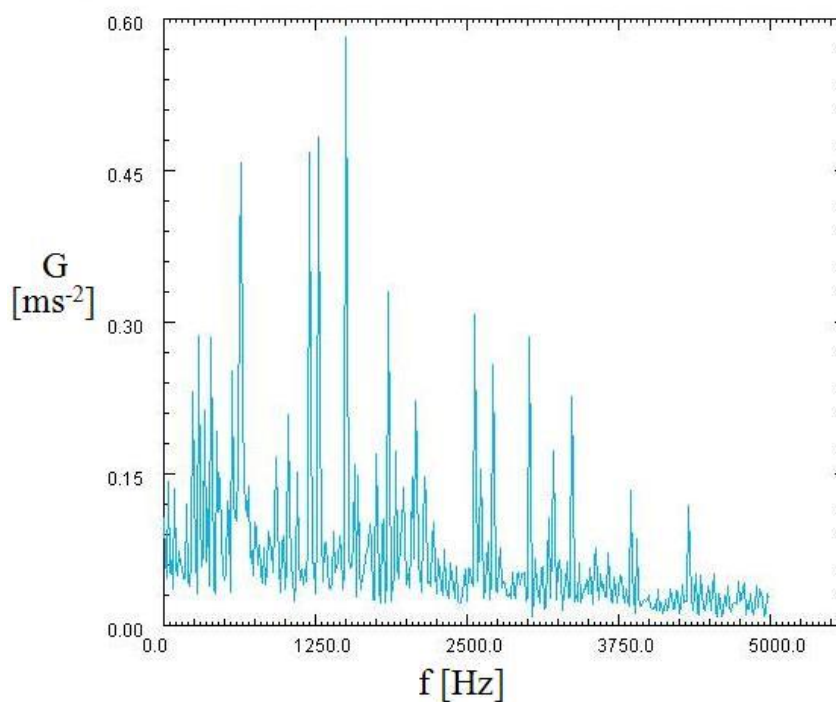


Obrázek 36. – Hodnota obálky zrychlení při 6000 otáčkách v horizontálním směru zadní strany vřetena po 7 měsících provozu stroje

Pro další srovnání jsou uvedeny grafy naměřených hodnot z téhož stroje QTN100II v různých provozních situacích (nový stroj obrázek 37, po kolizi stroje obrázek 38, po opravě vřetena obrázek 39 a po sedmi měsících dalšího provozu obrázek 41). Grafy jsou ze stejného měřicího místa (přední strana vřetene v horizontálním směru při otáčkách 6000 min^{-1}).

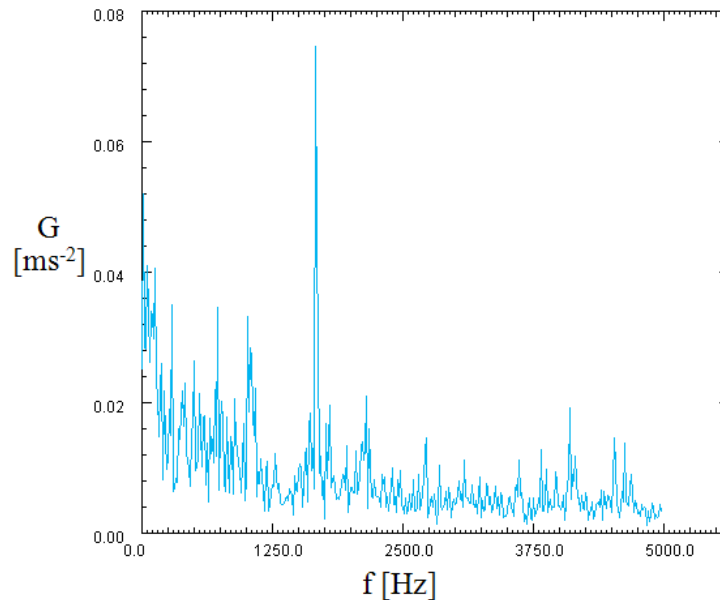


Obrázek 37. – Obálka zrychlení na novém stroji v předváděcí hale



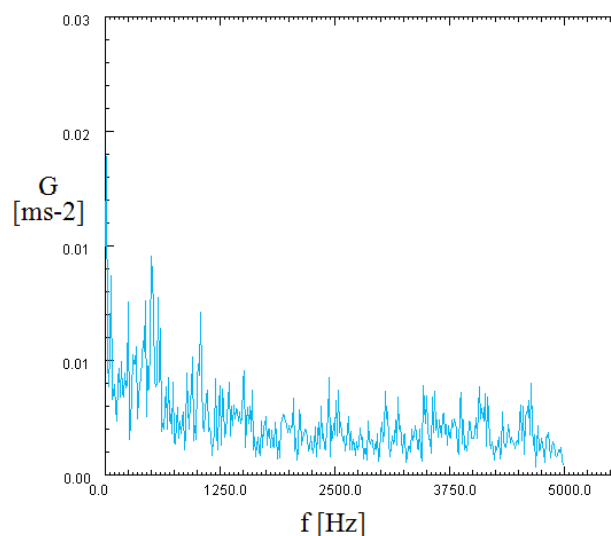
Obrázek 38. – Obálka zrychlení po kolizi stroje

Na frekvenčním spektru naměřeném po kolizi stroje je jednoznačně patrné výrazné zvýšení hodnot zrychlení vibrací v celém měřicím rozsahu frekvencí (do 5kHz). Nárůst amplitud oproti změřenému stavu nového stroje je cca desetinásobný. Oprava vřetenové jednotky je tudíž nezbytná. Stroj v tomto stavu není schopen vyrábět výrobky v požadované jakosti (přesnost rozměrů a tvarů, jakost povrchu). Při dalším provozování by s velkou pravděpodobností došlo k zadření vřetenové jednotky.

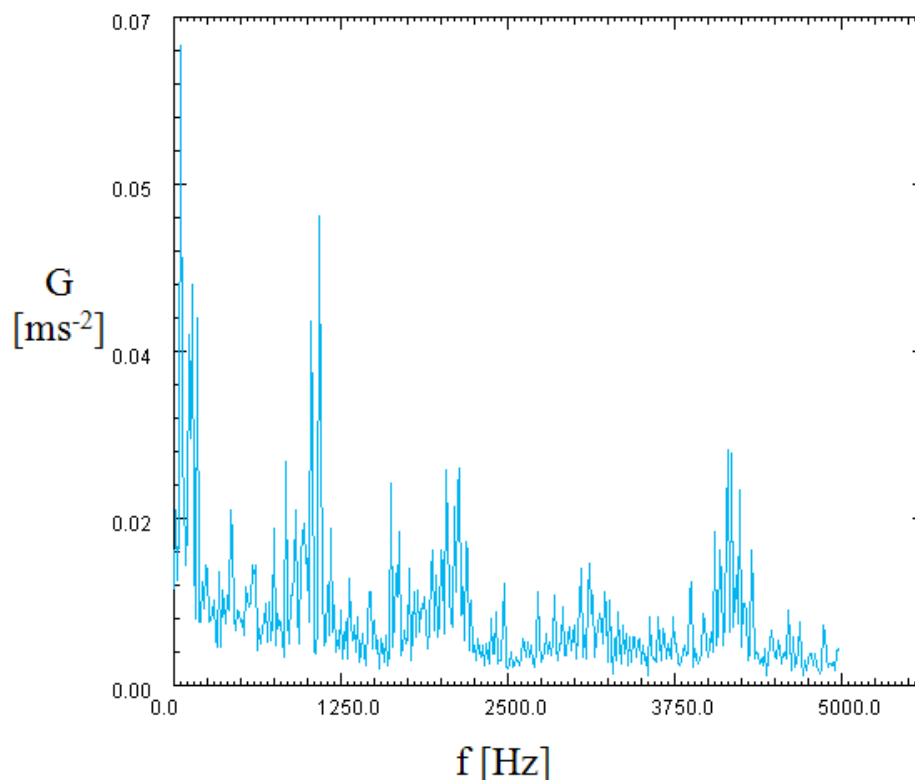


Obrázek 39. – Naměřená obálka zrychlení po opravě stroje

Měření vibrací vřetene stroje po opravě prokázalo návrat téměř na původní hodnoty vibrací nového stroje (srovnatelné amplitudy). Špičkovou amplitudu na frekvenci 1675 Hz se nepodařilo identifikovat z hlediska kinematických frekvencí jednotlivých ložisek vřetene. Tato špičková amplituda by měla být při 3000 otáčkách o 50 Hz níže (3000/60), to se nepotvrdilo (Obrázek 40). Další zkoumání ukázalo, že po 7 měsících dalšího provozu stroje už špičková amplituda není patrná (Obrázek 41), lze ji prohlásit za ojedinělou.



Obrázek 40. – Zkoumání ojedinělé amplitudové špičky při 3000 otáčkách se nepotvrdilo

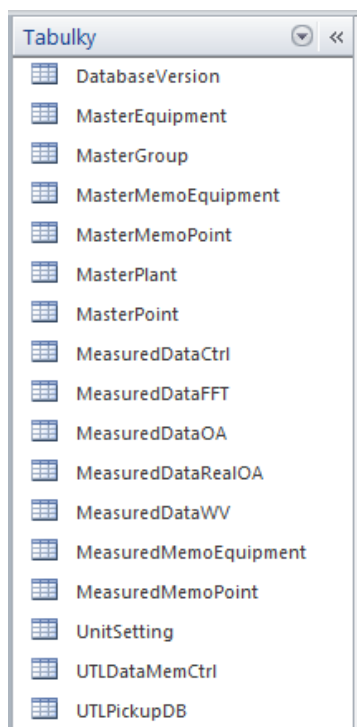


Obrázek 41. – Naměřená obálka zrychlení po 7 měsících dalšího provozu stroje

Po sedmi měsících provozu stroje nedošlo dle očekávání k žádnému výraznému zhoršení stavu vřetene. Je patrné mírné zvýšení amplitud zrychlení vibrací u frekvencí nad 1500 Hz. Do budoucna lze doporučit pravidelnou preventivní kontrolu vřetenové jednotky vibrometrem, která poskytne účinnou indikaci případné rozvíjející se poruchy, která může mít za následek, mimo jiné, zvýšenou hlučnost vřetena.

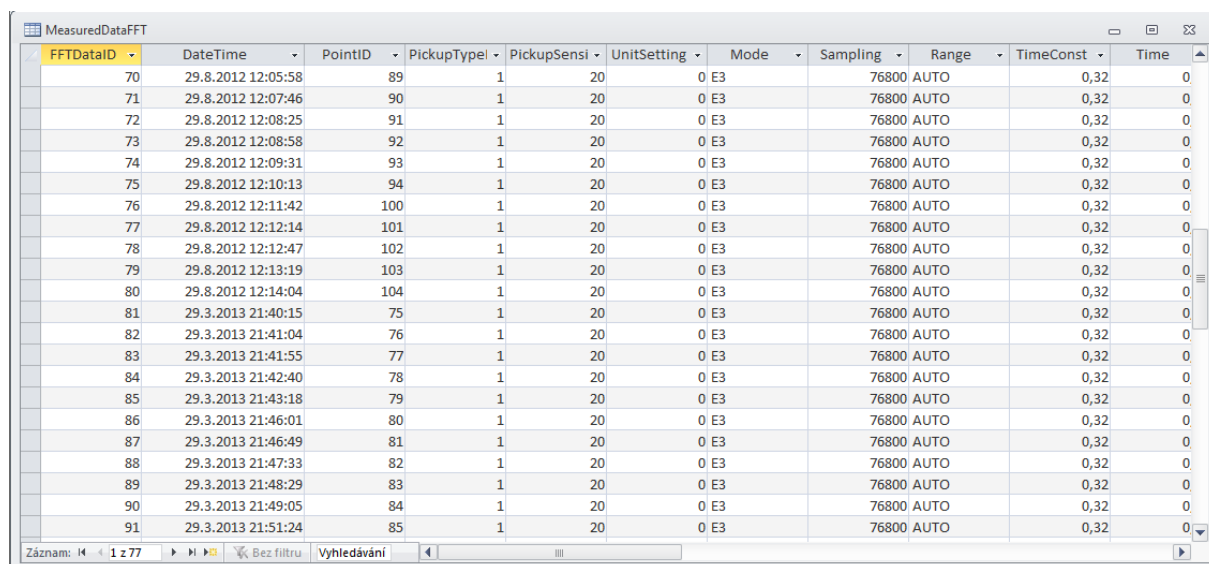
2.5 Navržený software pro vyhodnocování

V této kapitole se podíváme na návrh pomocného softwaru pro automatizované vyhodnocování měření vibrací rotačních částí obráběcích strojů, použitelný pro navrženou metodiku. Měřicí aparatura ukládá naměřená data ve formě databáze v programu Microsoft Office access, což je nástroj na správu relačních databází. K naměřeným datům se přistupuje pomocí mnoha tabulek v databázi (Obrázek 42).



Obrázek 42. – Všechny tabulky v databázi

Nejdůležitější tabulka je MeasuredDataFFT (Obrázek 43), pomocí které dokážeme vykreslit FFT spektrum. Hodnoty v ní jsou binární data, podle kterých se vykresluje spektrum.



FFTDataID	DateTime	PointID	PickupType	PickupSensi	UnitSetting	Mode	Sampling	Range	TimeConst	Time
70	29.8.2012 12:05:58	89	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
71	29.8.2012 12:07:46	90	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
72	29.8.2012 12:08:25	91	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
73	29.8.2012 12:08:58	92	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
74	29.8.2012 12:09:31	93	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
75	29.8.2012 12:10:13	94	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
76	29.8.2012 12:11:42	100	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
77	29.8.2012 12:12:14	101	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
78	29.8.2012 12:12:47	102	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
79	29.8.2012 12:13:19	103	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
80	29.8.2012 12:14:04	104	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
81	29.3.2013 21:40:15	75	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
82	29.3.2013 21:41:04	76	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
83	29.3.2013 21:41:55	77	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
84	29.3.2013 21:42:40	78	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
85	29.3.2013 21:43:18	79	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
86	29.3.2013 21:46:01	80	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
87	29.3.2013 21:46:49	81	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
88	29.3.2013 21:47:33	82	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
89	29.3.2013 21:48:29	83	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
90	29.3.2013 21:49:05	84	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0
91	29.3.2013 21:51:24	85	1	20	0 E3		76800 AUTO		0,32	0

Obrázek 43. – Tabulka MeasuredDataFFT

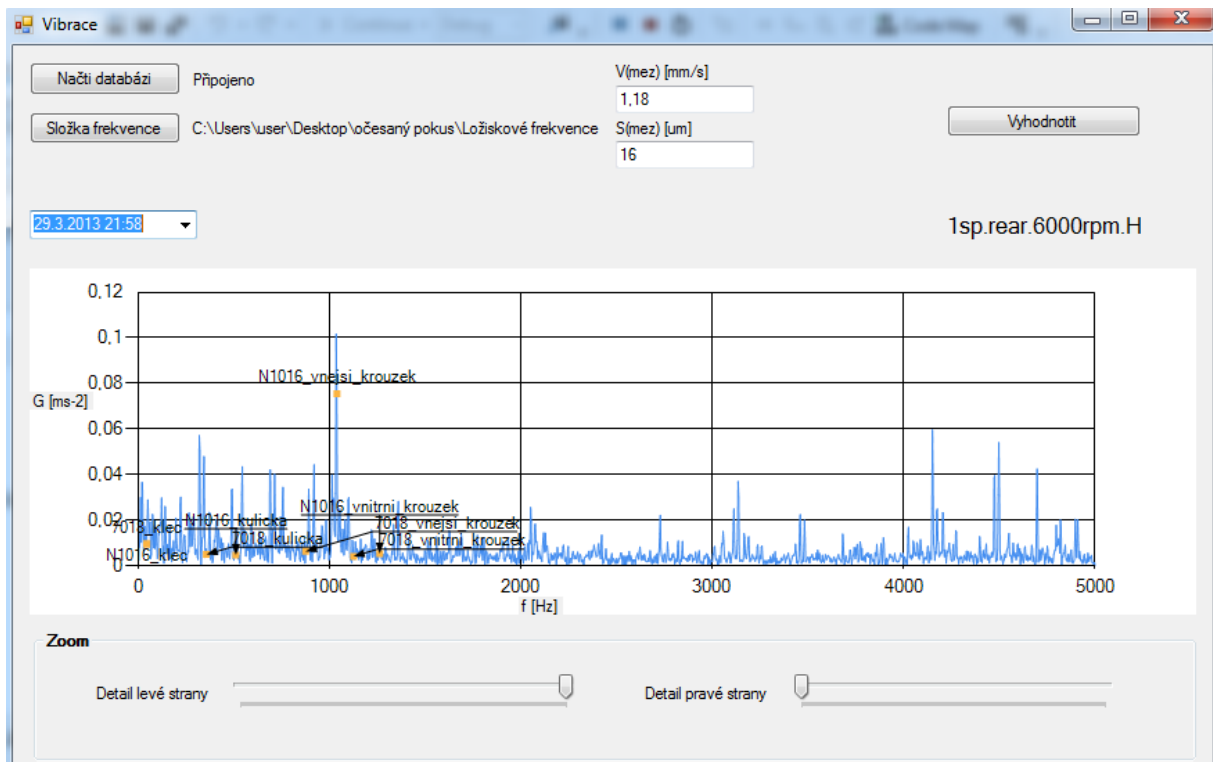
Podobně vypadající tabulka MeasuredDataOA ukládá naměřené efektivní hodnoty rychlosti kmitání (sloupec V_RMS) a výchylky kmitání (sloupec D_PEAK).

Další důležitá tabulka je MasterPoint (Obrázek 44), kde jednotlivým měřicím bodům jsou podle názvu přiřazeny PointID, pomocí tohoto identifikátoru přistupujeme do ostatních tabulek. Pro vyhodnocovací software je důležité, abychom věděli k jakým měřicím bodům přiřadit tabulky s ložiskovými frekvencemi (specifické pro každé konstrukční uspořádání vřetene – nutno vytvořit samostatně, přiřadit podle PointID v tabulce databáze).

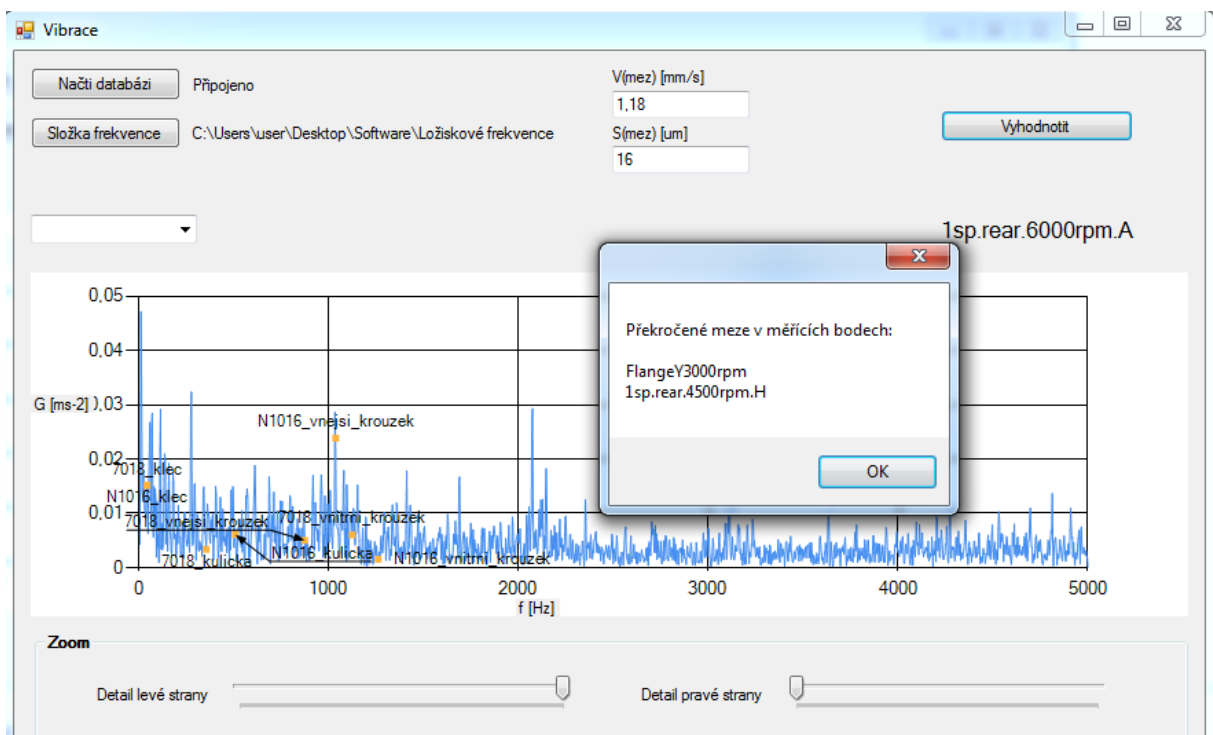
PointID	PointName	Editable	PointNo	MachineID	Direction	PointMemo	PointMemo	PointMemo	PointMemo	PointMemo
75	1sp.front.0rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
76	1sp.front.1500rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
77	1sp.front.3000rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
78	1sp.front.4500rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
79	1sp.front.6000rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
80	1sp.front.0rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
81	1sp.front.1500rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
82	1sp.front.3000rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
83	1sp.front.4500rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
84	1sp.front.6000rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
85	1sp.front.0rpm.A	0			12 V	1	2	3	4	
86	1sp.front.1500rpm.A	0			12 V	1	2	3	4	
87	1sp.front.3000rpm.A	0			12 V	1	2	3	4	
88	1sp.front.4500rpm.A	0			12 V	1	2	3	4	
89	1sp.front.6000rpm.A	0			12 V	1	2	3	4	
90	1sp.rear.0rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
91	1sp.rear.1500rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
92	1sp.rear.3000rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
93	1sp.rear.4500rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
94	1sp.rear.6000rpm.H	0			12 V	1	2	3	4	
95	1sp.rear.0rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	
96	1sp.rear.1500rpm.V	0			12 V	1	2	3	4	

Obrázek 44. – Tabulka MasterPoint v databázi

Náhled na hlavní okno programu je na obrázku 45. Jako první vybereme načtení databáze naměřených dat pro vyhodnocení, vygenerovanou měřicí aparaturou. Pokračujeme tak, že vybereme složku, kde máme chybové frekvence ložiskových komponent. Zadáváme mezní hodnoty rychlosti kmitání a výchylky kmitání, dle ČSN 20 0065 pro kategorii strojů „Obráběcí centra a bezobslužné obráběcí stroje s vodorovnou osou pro rotační obrobky“ (průměr obrobku nad 200mm). Spektra FFT vybíráme podle data provedeného měření z databáze a můžeme prohlížet odpovídající graf, u každého grafu se ukáže místo umístění snímače. Tlačítko vyhodnotit nám umožní vyhodnocení a vypsání měřicích bodů, kde byla překročena povolená mezní hodnota. Po další prohlídce grafů můžeme vidět překročené mezní hodnoty v podobě červeného podbarvení. Ve spodní části softwaru je Zoom, kde můžeme detailně prohlížet spektrum a rozpoznat tak případné chyby rotujících částí vřetena obráběcího stroje. Celý program je v příloze na CD ve složce Software.



Obrázek 45. – Náhled na spuštěný software



Obrázek 46. – Ukázka chybového hlášení při překročení mezních hodnot po automatickém vyhodnocení

3. Závěr

V první teoretické části jsem se zabýval obecně vibracemi a obráběcími stroji. Dále diagnostikou a způsoby měření vibrací.

Druhá praktická část spočívala v popisu vhodné metodiky pro měření vibrací obráběcích strojů (zejména vřeten) a její praktické odzkoušení ve firmě Misan s.r.o. Jedná se o měření vibrací pomocí vibrometru SKF Microvibe P CMVL3850-ML, zpracování naměřených dat a použití navrženého pomocného softwaru pro jejich automatizované vyhodnocení.

Tato metoda je vhodná pro opakovatelná měření (trendování) z důvodu snadného porovnání naměřených hodnot v jednotlivých polohách snímačů. Je možné sledovat daný stroj a porovnávat naměřené hodnoty v jednotlivých fázích v provozu stroje (před uvedením do provozu, v intervalech během provozu, po kolizích a jejich opravách). Je vhodná i pro plánování údržby strojů (výměna ložisek rotačních částí strojů). Mezní hodnoty naměřených veličin pro kategorii strojů „Obráběcí centra a obslužné obráběcí stroje s vodorovnou osou pro rotační obrobky“ jsou dány normou ČSN 20 0065. Porovnáním s naměřenými hodnotami lze posoudit stav vřetene vzhledem k jeho provozní historii. Vibrodiagnostika by našla uplatnění i v jiných technických oborech například v automobilovém průmyslu (rotační části motorů, převodovky).

Navržený software v programovacím jazyku C# automatizuje vyhodnocení navržené metodiky pro měření vibrací na vřetenech obráběcích strojů. Slouží jako pomocné automatizované vyhodnocení potřeby servisního zásahu. Upozorní vypsáním příslušných bodů na překročení povolených hodnot jednotlivých veličin a tím poukáže na možnou poruchu rotujících částí vřeten obráběcích strojů. Při opakovaném měření v určitých časových intervalech na stejném stroji, lze porovnávat překročení povolených hodnot. V případě opakovaného překročení mezních hodnot je nutno provést servisní zásah (výměna ložisek).

Při zpracování této práce jsem získal mnoho zkušeností, jak z oblasti měření vibrací a jeho vyhodnocování, tak i z částí strojů a jejich konstrukčního provedení (z důvodu vhodného umístění snímačů při prováděném měření), které mohou dále využít při další praxi nebo případném zaměstnání ve firmě Misan s.r.o.

Použitá literatura

- [1] Andrlé, M. *Vibrodiagnostika rotujících částí*. Pardubice, 2011. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/42468/2/AndrleM_VibrodiagnostikaRotujicich_PJ_2011.pdf.> Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Petr Jílek, DiS.
- [2] Breník, P.; Píč, J. *Obráběcí stroje Konstrukce a výpočty*. Praha : SNTL, 1982. 573 s.
- [3] Ďaďo, S.; Kreidl, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [4] Fluke Corporation, *Slovníček terminů vibrace* [online]. [7.9.2012]. Dostupné na: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/centra-reseni/vibration/slovn%C3%AD%C4%8Dek-term%C3%ADn%C5%AF-vibrace.htm>>
- [5] Houša, J. *Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha : SNTL, 1985. 287 s.
- [6] Chvojka, P. *Technická diagnostika závad obráběcích strojů*. Praha : Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, 2010. 58 s.
- [7] Chvojka, P. *Měření vibrací III – Diagnostika (nejen vřeten)*. Praha : 2009.
- [8] Chvojka, P.; Burian, D.; Janota, M. *Měřicí předpis: MP-05-02 Diagnostická měření strojů*. Praha : Zkušební laboratoř VCSVTT, 2008. 33 s.
- [9] Kopecký, M.; Houša, J. *Základy stavby výrobních strojů*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1992. 385 s. ISBN 80-01-00085-0.
- [10] Kříž, R.; Vávra, P. *Strojírenská příručka 2. Svazek*. Praha : SCIENTIA, 1993. 224 s. ISBN 80-85827-00-X.
- [11] Leinveber, J.; Vávra, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly : Albra, 2005. 908 s. ISBN 80-7361-011-6.
- [12] Marek, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha :MM publishing, s. r. o, 2010. 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [13] Smetana, C. *Praktická elektroakustika*. Praha : SNTL, 1981. 692 s. ISBN 04-502-81.
- [14] Svoboda, E. *Přehled středoškolské fyziky*. Havlíčkův Brod : Prometheus, 2005. 499 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [15] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník I. díl A-D*. Praha : SNTL, 1981. 476 s.
- [16] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník II. díl E-I*. Praha : SNTL, 1982. 436 s.
- [17] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník III. díl J-L*. Praha : SNTL, 1982. 398 s.

- [18] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník IV. díl M-O*. Praha : SNTL, 1983. 438 s.
- [19] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník V. díl P-R*. Praha : SNTL, 1983. 564 s.
- [20] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník VI. díl Ř-T*. Praha : SNTL, 1985. 584 s.
- [21] Redakce teoretické literatury a technických slovníků. *Technický naučný slovník VII. díl U-Ž*. Praha : SNTL, 1986. 418 s.
- [22] RIPKA, P.; TIPEK, A. *Master Book of Sensors*. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4.
- [23] Obrázek, *Hladina kmitání*. [online]. [4.4.2013]. Strojírenský měsíčník. Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/41/4165.jpg>
- [24] Obrázek, *Znázornění Periody*. [online]. [25.3. 2013]. Dostupné na: http://www.edunet.souepl.cz/EZO/strp_02.gif
- [25] Interní materiály firmy Misan s.r.o. <http://www.Misan.cz>

Seznam příloh

Příloha 1. – Tabulky pěti nejvyšších amplitud zrychlení G s příslušnými frekvencemi pro jednotlivé měřené otáčky a jednotlivé měřící body

Příloha 2. – Ložiskové frekvence pro QTN100II

Příloha 3. – Popis stroje QTN100II

Příloha 4. – QTN100II sestava, válec a sklíčidlo

Příloha CD:

Obsah adresáře:

CernyZ_AnalyzaVibraci_PR_2013.pdf – vlastní text práce s přílohami

Složka s přidaným softwarem – Software

Příloha 1 – Tabulky pěti nejvyšších amplitud zrychlení G s příslušnými frekvencemi pro jednotlivé měřené otáčky a jednotlivé měřící body
 Tabulka 1. – Měření vibrací stroje po opravě stroje

1.	Otáčky/min									
	0		1500		3000		4500		6000	
	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G
V front	6,25	0,006	12,5	0,006	203,1	0,015	775	0,027	225	0,044
	4125	0,004	737,5	0,006	521,9	0,013	737,5	0,027	556,3	0,041
	4131	0,004	715,6	0,005	490,9	0,013	578,1	0,025	1275	0,032
	46,88	0,003	478,1	0,005	531,3	0,011	875	0,021	346,9	0,029
	25	0,003	103,1	0,004	12,5	0,011	128,1	0,019	43,75	0,023
H front	18,75	0,002	12,5	0,01	25	0,019	34,38	0,027	1675	0,075
	1463	0,001	300	0,01	515,6	0,013	484,4	0,022	15,63	0,052
	2250	0,001	34,38	0,01	443,8	0,011	3750	0,017	56,25	0,041
	293,8	0,001	212,5	0,009	1050	0,011	2978	0,016	137,5	0,041
	368,8	0,001	1284	0,009	603,1	0,01	2388	0,015	296,9	0,035
H rear	1281	0,003	43,75	0,006	518,8	0,019	787,5	0,013	493,8	0,064
	3700	0,003	475	0,006	490,6	0,012	100	0,013	43,75	0,043
	2416	0,003	65,63	0,005	206,3	0,011	3913	0,012	4175	0,033
	3663	0,002	246,9	0,004	28,13	0,011	812,5	0,011	715,6	0,03
	2275	0,002	543,8	0,004	100	0,011	3788	0,011	15,63	0,029
A rear	2250	0,003	534,4	0,004	509,4	0,006	331,3	0,009	1691	0,021
	2275	0,001	12,5	0,004	1969	0,006	3825	0,008	384,4	0,019
	2075	0,001	581,3	0,003	90,63	0,006	34,38	0,008	1019	0,016
	165,6	0,001	25	0,003	1400	0,005	125	0,008	1034	0,013
	3838	0,001	2125	0,003	743,8	0,005	68,75	0,007	437,5	0,013

Poznámka: V a H (A) front (rear) znamená: Vertikální a Horizontální (Axiální) směr předního (zadního) ložiska

Tabulka 2. – Měření vibrací po 7 měsících dalšího provozu stroje

2.	Otáčky/min									
	0		1500		3000		4500		6000	
	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G
V front	18,75	0,006	159,4	0,01	259,4	0,021	34,38	0,033	118,8	0,052
	1997	0,003	71,88	0,009	209,4	0,019	803,1	0,032	1809	0,038
	2019	0,003	221,9	0,008	537,5	0,014	768,8	0,03	596,9	0,037
	1978	0,002	403,1	0,008	53,13	0,014	100	0,028	496,9	0,032
	4050	0,002	537,5	0,007	468,8	0,013	90,63	0,025	1691	0,025
H front	18,75	0,004	234,4	0,008	21,88	0,027	12,5	0,033	62,5	0,067
	2019	0,003	3872	0,007	328,1	0,026	487,5	0,022	1100	0,049
	2000	0,002	62,5	0,007	68,75	0,022	34,38	0,017	140,6	0,042
	2038	0,002	275	0,006	303,3	0,018	125	0,017	184,4	0,039
	4019	0,002	3572	0,006	421,9	0,017	3988	0,016	1038	0,038
H rear	18,75	0,002	75	0,01	490,6	0,025	100	0,033	1038	0,102
	31,25	0,002	453,1	0,008	65,63	0,021	668,8	0,028	4153	0,06
	9,375	0,001	128,1	0,008	234,4	0,019	768,8	0,025	321,9	0,057
	100	0,001	306,3	0,007	112,5	0,019	803,1	0,024	4500	0,054
	2888	0,001	46,88	0,007	253,1	0,017	78,13	0,022	346,9	0,048
A rear	18,75	0,002	12,5	0,009	12,5	0,024	68,75	0,028	15,63	0,074
	25	0,001	3722	0,007	21,88	0,02	103,1	0,024	281,3	0,032
	6,25	0,001	350	0,007	68,75	0,016	37,5	0,021	2078	0,029
	2094	0,001	340,6	0,007	181,3	0,013	487,5	0,021	118,8	0,029
	75	0,001	75	0,007	531,3	0,013	837,5	0,02	1038	0,029

Poznámka: V a H (A) front (rear) znamená: Vertikální a Horizontální (Axiální) směr předního (zadního) ložiska

Tabulka 3. – Měření vibrací na novém stroji v předváděcí hale

3.	Otáčky/min									
	0		1500		3000		4500		6000	
	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G	f [Hz]	G
V front	490,6	0,005	765,6	0,021	953,1	0,045	831,3	0,06	606,3	0,068
	1763	0,004	1369	0,018	46,88	0,032	1563	0,041	100	0,059
	2250	0,003	1181	0,017	996,9	0,031	40,63	0,04	1584	0,057
	93,75	0,002	12,5	0,016	1688	0,031	75	0,04	975	0,055
	1272	0,002	868,8	0,016	1950	0,029	68,75	0,037	753,1	0,053
H front	1750	0,004	1019	0,019	25	0,025	625	0,03	100	0,062
	2997	0,003	312,5	0,018	500	0,022	896,9	0,029	53,13	0,058
	746,9	0,003	628,1	0,018	990,6	0,022	1666	0,029	459,4	0,057
	3500	0,003	393,8	0,016	2288	0,022	793,8	0,027	1431	0,051
	500	0,003	1206	0,016	1063	0,021	1034	0,026	1516	0,049
H rear	2250	0,004	65,63	0,02	68,75	0,035	34,38	0,028	181,3	0,05
	1738	0,003	818,8	0,015	509,4	0,033	865,6	0,023	665,6	0,045
	25	0,001	1831	0,015	1663	0,025	765,6	0,023	1775	0,039
	1897	0,001	703,1	0,014	43,75	0,025	68,75	0,023	387,5	0,039
	1888	0,001	765,6	0,014	153,1	0,022	2238	0,02	475	0,034
A rear	1725	0,004	12,5	0,02	2019	0,015	34,38	0,023	100	0,049
	2250	0,004	721,9	0,014	553,1	0,014	793,8	0,014	1522	0,04
	2106	0,001	1244	0,013	46,88	0,014	665,6	0,013	1034	0,038
	1938	0,001	25	0,013	21,88	0,014	200	0,013	37,5	0,032
	1903	0,001	1475	0,012	743,8	0,014	490,6	0,013	1559	0,025

Poznámka: V a H (A) front (rear) znamená: Vertikální a Horizontální (Axiální) směr předního (zadního) ložiska

Příloha 2 – Ložiskové frekvence pro QTN100II

QTN100 - Ložiskové frekvence											
Typ ložiska SKF		Počet valivých elementů	průměr valivých elementů	řád ložiska	Roztečný průměr ložiska	Úhel styku	Frekvence klece (FTF)	Frekvence kuličky (BSF)	Frekvence vnitřního kroužku (BPFI)	Frekvence vnějšího kroužku (BPFO)	
			mm.		mm.	Deg.					
7018	ACD	20	15,875	1	115,0	25	0,437	3,565	11,251	8,749	otáčky: 1500 min ⁻¹
							10,93613	89,13383	281,2775	218,7225	ot.frekvence: 25 Hz
7018	ACD	20	15,875	1	115,0	25	0,437	3,565	11,251	8,749	otáčky: 3000 min ⁻¹
							21,87225	178,2677	562,5549	437,4451	ot.frekvence: 50 Hz
7018	ACD	20	15,875	1	115,0	25	0,437	3,565	11,251	8,749	otáčky: 4500 min ⁻¹
							32,80838	267,4015	843,8324	656,1676	ot.frekvence: 75 Hz
7018	ACD	20	15,875	1	115,0	25	0,437	3,565	11,251	8,749	otáčky: 6000 min ⁻¹
							43,74451	356,5353	1125,11	874,8901	ot.frekvence: 100 Hz
N1016		23	10,000	1	103,0	0	0,451	5,101	12,617	10,383	otáčky: 1500 min ⁻¹
							11,28641	127,5364	315,4126	259,5874	ot.frekvence: 25 Hz
N1016		23	10,000	1	103,0	0	0,451	5,101	12,617	10,383	otáčky: 3000 min ⁻¹
							22,57282	255,0728	630,8252	519,1748	ot.frekvence: 50 Hz
N1016		23	10,000	1	103,0	0	0,451	5,101	12,617	10,383	otáčky: 4500 min ⁻¹
							33,85922	382,6092	946,2379	778,7621	ot.frekvence: 75 Hz
N1016		23	10,000	1	103,0	0	0,451	5,101	12,617	10,383	otáčky: 6000 min ⁻¹
							45,14563	510,1456	1261,65	1038,35	ot.frekvence: 100 Hz

Poznámka: Přední ložisko - 7018 ACD, zadní ložisko - N1016

Příloha 3. Popis stroje QTN100II

Technická data:

Pracovní prostor

Velikost sklíčidla	6 "
Max. oběžný Ø	550 mm
Obráběný Ø - standard	185 mm
Obráběný Ø - max.	280 mm
Obrábění z tyče Ø	42 mm
Při změně sklíčidla a up. válce	51 mm
Vzdál. vřeteno-revolver	109-434 mm

Max. hmotnost obrobku včetně upínače

Letmo	150 kg
Opřeno hrotem	200 kg

Vřeteno

Otáčky	35-6000 ot/min
Zakončení vřetene	A2-5 "
Vrtání vřetene	61 mm
Výkon trvalý	7,5 kW
Max. krouticí moment	184 N·m

NC koník

Upnutí hrotu	4 MK
Pojezd	350 mm
Max. síla	1962 N

Revolverová hlava

Počet nástrojových míst	12
Upnutí: vnější obrábění	20 mm
Upnutí: vnitřní obrábění - Ø	32 mm
Indexace: 1 poloha / 6 poloh	0,2/0,5 s

Rychloposuvy

Osa X	30 m/min
Osa Z	33 m/min

Pojezdy

Osa X	190 mm
Osa Z	330 mm

Ostatní

Objem nádrže chladicí kapaliny	130 L
Motor čerpadla	180 W

Strojní data

Příkon stroje: trvalý/30 min.	17,2/22,5 kVA
Výška osy vřetene	1020 mm

Šířka	1790 mm
Hloubka	1630 mm
Výška	1800 mm
Zastavěná plocha	2,92 m ²
Hmotnost stroje	3400 kg
Barva stroje	černá/šedá

Standardní příslušenství

- Hydraulické tříčelist'ové sklíčidlo včetně 1 sady měkkých čelistí
- Odměřování nástrojů (Tool Eye)
- Dvojitý nožní přepínač pro otvírání/zavírání sklíčidla
- Zpětné hlášení o stavu sklíčidla (otevřeno/zavřeno)
- NC programovatelný koník (pokud stroj nemá druhé vřetenno)
- Kompletní chladicí systém
- Plné zakrytování pracovního prostoru proti odletujícím třískám a odstříkující chladicí kapalině
- Osvětlení pracovního prostoru
- CNC řídicí systém Mazatrol MATRIX NEXUS - dialogové programování s barevným LCD displejem
- Bezpečnostní zamykání dveří
- Virtuální obrábění - kontrola drah nástroje programu během obrábění podle jiného programu
- Kontrola životnosti nástroje
- 2x USB rozhraní pro přenos dat
- LAN port
- Inteligentní teplotní štít
- Inteligentní bezpečnostní štít
- Hlasový poradce MAZAK
- 1 sada seřizovacích nástrojů
- 1 sada kotvícího vybavení
- 1 sada návodů k obsluze (česky a anglicky)
- 1 sada standardních nástrojových držáků

Počet Popis

2	Nožový držák, 20 mm
1	Držák pro čelní soustružení, 20 mm
3	Držák vyvrtávacích tyčí pro pouzdra Ø32 mm
1	Pouzdro vyvrtávací tyče, Ø20/32 mm
1	Pouzdro vyvrtávací tyče, Ø25/32 mm
1	Vrtací pouzdro s MK #1 / Ø32 mm
5	Rozpěrná destička pro upínání soustružnických nožů

