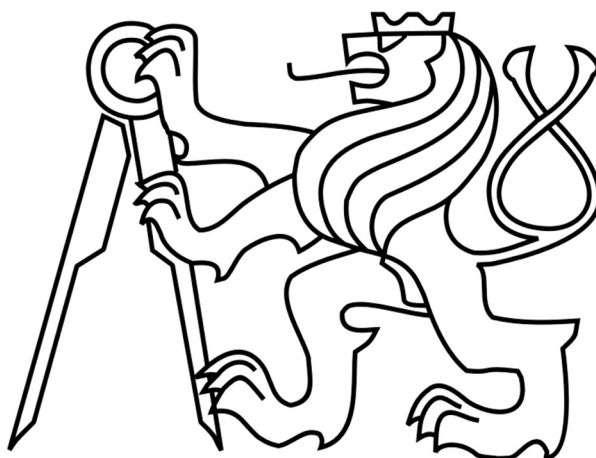


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Automatizované vyhodnocení dat vibrační diagnostiky vřeten
obráběcích strojů



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav výrobních strojů a zařízení

**Automatizované vyhodnocení
dat vibrační diagnostiky
vřeten obráběcích strojů**

Zadání



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav výrobních strojů a zařízení

**Automatizované vyhodnocení
dat vibrační diagnostiky
vřeten obráběcích strojů**



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 08. 01. 2016

.....

podpis



Anotace

- Jméno autora:* Petr Samuel
- Název DP:* Automatizované vyhodnocení dat vibrační diagnostiky vřeten obráběcích strojů
- Rozsah práce:* 158 str.
- Akad. rok vyhotovení:* 2016
- Ústav:* Ústav výrobních strojů a zařízení
- Vedoucí DP:* Ing. Petr Chvojka, Ph.D.
- Konzultant:* Ing. Karel Šnajdr
- Zadavatel tématu:* ČVUT FS, Ú12135
- Využití:* vyhodnocení rozběhových testů
- Klíčová slova:* diagnostika, rozběh, přesnost, vyhodnocení, program, automatizovaný
- Anotace:* Cílem této diplomové práce je tvorba aplikace pro automatické vyhodnocení dat vibrační diagnostiky. V aplikaci musí být zajištěn import dat z analyzátoru Adash VA4 a Bruel&Kjaer Pulse. Výstup z aplikace má být ve formě protokolu a grafu. Aplikaci se ověří na vybraných vřetenech.



Annotation

<i>Author:</i>	Petr Samuel
<i>Title of thesis:</i>	Automated evaluation of data obtained from vibration diagnostics of machine tool spindles
<i>Extent of work:</i>	158 pages
<i>Creation of work:</i>	2016
<i>Institution:</i>	Department of production machines and equipment
<i>Leader of work:</i>	Ing. Petr Chvojka, Ph.D.
<i>Consultant:</i>	Ing. Karel Šnajdr
<i>Partner of work:</i>	ČVUT FS, Ú12135
<i>Usage:</i>	evaluation of run up tests
<i>Key words:</i>	diagnostic, run up, precision, evaluation, program, automatic
<i>Annotation:</i>	A Goal of this thesis is to create an application for automatic vibration diagnostic data processing. One of necessary parts of the application is an import from analyzers ADASH VA4 and Bruel&Kjaer, Pulse. Application output is a protocol and a graph. This application will be tested on selected spindles.



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této diplomové práce. Zvláště pak vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Chvojkovi, Ph.D., za jeho cenné rady, připomínky a trpělivost, kterou mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Šnajdrovi ze společnosti Kovosvit MAS za pomoc při měření v Kovosvitu MAS a za rady, jak vylepšit aplikaci pro vyhodnocení dat. Ing. Jiřímu Mindlovi za pomoc při návrhu práce.

Také bych chtěl poděkovat pracovníkům RCMT, kteří mi byli nápomocní při měření strojů v RCMT.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali v průběhu celého studia a tvorbě mé diplomové práce.



Obsah:

Seznam obrázků	12
Seznam grafů	15
Seznam tabulek	17
Použité zkratky	19
Přehled použitých značek a jednotek	21
1. Úvod	23
1.1. Cíle diplomové práce	24
1.2. Metodika práce	25
2. Současné řešení dané problematiky	26
2.1. Charakter signálu	26
2.1.1. Periodická budící síla	26
2.1.2. Impulzní budící síla	27
2.1.3. Budící síla náhodného průběhu	28
2.1.4. Samobuzené kmitání	28
2.2. Základní veličiny kmitavého pohybu	29
2.3. Měřené veličiny	31
2.4. Měřicí hardware	33
2.4.1. Snímače vibrací	33
2.4.2. Vzorkování a Aliasing	37
2.4.3. Kvantování	39
2.4.4. Chyba únikem (chyba typu leakage)	40
2.4.5. Fourierova transformace	42
2.5. Nastavení analyzátoru	43
2.5.1. Počet spektrálních čar	43
2.5.2. Počet a typ průměrování a míra překrytí	44
2.6. Měřicí metody a vyhodnocení měření dle norem	46
2.6.1. Měření přesnosti chodu vřetene za rotace	46
2.6.2. Rozběhové a doběhové testy	48



2.6.3.	Norma ČSN 20 0065.....	51
2.6.4.	Norma ČSN ISO 10816-1, ČSN ISO 10816-3	53
2.6.5.	International standard NWIP-10	54
3.	Sběr vstupních dat.....	56
3.1.	Měření bruska	57
3.2.	Měření „Myšiplaš“	58
3.3.	Měření MCVL 1000	59
4.	Program na zpracování měření	60
4.1.	Instalace	63
4.1.1.	Memory Leak	63
4.2.	Načtení vstupních dat	64
4.2.1.	Příprava dat z analyzátoru PULSE	64
4.2.2.	Příprava dat z analyzátoru ADASH	65
4.2.3.	Společné dokončení načítání dat	67
4.3.	Zpracování dat	69
4.3.1.	Formuláře	69
4.3.2.	Algoritmus vlastních frekvencí.....	72
4.3.3.	Výběr hodnot pro zobrazení otáčkové frekvence.....	74
4.3.4.	Výpočet RMS	74
4.3.5.	Tvorba tabulky	75
4.3.6.	Grafy pro určení frekvencí	76
4.4.	Vyhodnocení měření	78
4.4.1.	Formulář	78
4.4.2.	Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1	82
4.4.3.	Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3	83
4.4.4.	Vyhodnocení podle normy: NWIP – 10.....	84
4.4.5.	Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065	85
4.4.6.	Vyhodnocení podle Berryho	86



4.5.	Tvorba protokolu	89
4.5.1.	Formulář protokolu	89
4.5.2.	Protokol.....	90
	Příloha (Grafy).....	92
4.5.3.	Formulář	92
4.5.4.	Popis jednotlivých grafů a jejich nastavení	96
4.6.	Uložení dat do databáze	105
4.6.1.	Formulář pro ukládání do databáze.....	106
5.	Aplikace softwaru na reálná měření.....	109
5.1.	Použité přístroje	110
5.1.1.	Měřicí přístroje s analyzátozem PULSE	110
5.1.2.	Měřicí přístroje s analyzátozem VA4.....	112
5.1.3.	Měřicí přístroj Lion Precision	114
5.2.	Měření KOVOSVIT MAS	116
5.2.1.	Kovosvit MCV 1000.....	116
5.2.2.	Kovosvit MCU 700V-5X.....	117
5.2.3.	Kovosvit MCV 1270.....	118
5.3.	Měření RCMT	120
5.3.1.	TAJMAC- ZPS MCFV 5050 LN (LM1)	120
5.3.2.	Haas TM1	121
5.3.3.	Kovosvit MCVL 1000.....	122
5.3.4.	Emco turn 342.....	123
6.	Vyhodnocení a porovnání	124
6.1.	Měřené stroje v KOVOSVITU MAS	124
6.1.1.	MCV 1000.....	126
6.1.2.	MCU 700V-5X.....	129
6.1.3.	MCV 1270	133
6.2.	Měřené stroje v RCMT	137



6.2.1.	TAJMAC- ZPS MCFV 5050 LN (LM1).....	138
6.2.2.	Haas TM1	140
6.2.3.	Kovosvit MCVL 1000.....	142
6.2.4.	Emco turn 342.....	144
6.3.	Porovnání strojů měřených v Kovosvitu MAS	147
6.3.1.	Porovnání dle přesnosti chodu vřetena za rotace.....	147
6.3.2.	Porovnání dle vibrací	149
7.	Závěr	151
8.	Seznam příloh a použitého softwaru	153
8.1.	Seznam příloh.....	154
8.2.	Seznam použitého softwaru	154
9.	Použitá literatura.....	155



Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly	27
Obrázek 2-2 Kmitání vyvolané opakující se impulzní silou	27
Obrázek 2-3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu	28
Obrázek 2-4 Vznik samobuzeného kmitání způsobené aerodynamickou silou	28
Obrázek 2-5 Veličiny popisující harmonický pohyb.....	29
Obrázek 2-6 Ukázka činitele výkmitu.....	30
Obrázek 2-7 Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením	31
Obrázek 2-8 Omezení při měření	32
Obrázek 2-9 Schéma analyzátoru vibrací.....	33
Obrázek 2-10 Schéma systému snímače výchylky na bázi vířivých proudů.....	34
Obrázek 2-11 Provedení snímače rychlosti	35
Obrázek 2-12 Snímač zrychlení (tlakový)	35
Obrázek 2-13 Typy akcelerometrů	36
Obrázek 2-14 Vzorkování signálu.....	38
Obrázek 2-15 Příklad aliasingu.....	39
Obrázek 2-16 Diskretizace signálu s kvantování chybou	40
Obrázek 2-17 Porovnání periodického a neperiodického signálu a oken.....	41
Obrázek 2-18 Princip frekvenční analýzy	42
Obrázek 2-19 Příklad rozkladu signálu pomocí FFT	42
Obrázek 2-20 Vliv počtu průměrů na šum	45
Obrázek 2-21 Průměrování bez překrytí (horní část) s překrytím 50 % (spodní část)]	45
Obrázek 2-22 Měření přesnosti chodu za rotace lab. úloha.....	46
Obrázek 2-23 Synchronní a asynchronní chyba v polárních souřadnicích	47
Obrázek 2-24 Metody separace synchronní a asynchronní chyby.....	48
Obrázek 2-25 Doběhový test ve frekvenčním spektru	49
Obrázek 2-26 Doběhový test v řádovém spektru.....	49
Obrázek 2-27 Vysvětlení order jednotky.....	50
Obrázek 2-28 Graf odr spektra.....	50
Obrázek 2-29 Rozdíl mezi odr a FFT spektrem.....	51
Obrázek 2-30 Umístění snímačů na vřeteno dle NWIP-10	54
Obrázek 3-1 Přístroj ADASH VA4	56
Obrázek 3-2 Měřená dvoukotoučová bruska	57
Obrázek 3-3 Měření na laboratorním standu	58



Obrázek 3-4 Měření MCVL 1000 v laboratořích RCMT	59
Obrázek 4-1 Protokol o měření.....	61
Obrázek 4-2 Příloha k měření - grafy	61
Obrázek 4-3 Ukázka prázdného programu (po stuštění) na zpracování měření	62
Obrázek 4-4 Formulář pro výběr načtení dat do programu	64
Obrázek 4-5 Excel s připravenými daty pro vyhodnocení měření (vyhodnocovat se budou data na listu „y rychlost“)	64
Obrázek 4-6 Postup exportu dat z přístroje ADASH VA4	66
Obrázek 4-7 Příklad špatného vstupu dat z přístroje PULSE.....	67
Obrázek 4-8 Obrázek tlačítek na listu Vstup_data s informacemi o měření	69
Obrázek 4-9 Formulář pro zadání frekvence a otáček	70
Obrázek 4-10 Formulář pro rozšířená nastavení	71
Obrázek 4-11 Zjednodušené schéma algoritmu hledání vlastních frekvencí	72
Obrázek 4-12 Vývojový diagram naimplementovaného kódu pro hledání vlastních frekvencí	73
Obrázek 4-13 Příklad vytvořené tabulky	76
Obrázek 4-14 Zobrazení grafu a kompletní tabulky s informacemi o měření na listu vstup_data	77
Obrázek 4-15 ovládání vyhodnocení	78
Obrázek 4-16 Formulář vyhodnocení měření	79
Obrázek 4-17 Varování uživatele na chybné zadání pásem otáček.....	80
Obrázek 4-18 vyhodnocení normy ČSN ISO 10816-1	83
Obrázek 4-19 Nesplněné podmínky pro normu ČSN ISO 10816-3.....	83
Obrázek 4-20 Vyhodnocení dle normy ČSN ISO 10816-3.....	83
Obrázek 4-21 Nesplněná podmínka maximálních otáček pro NWIP – 10.....	84
Obrázek 4-22 Upozornění na maximální hodnotu frekvence menší než 5kHz.....	84
Obrázek 4-23 Kompletní vyhodnocení dle NWIP – 10.....	85
Obrázek 4-24 Vyhodnocení dle normy ČSN 20 0065	85
Obrázek 4-25 Vyhodnocení podle Berryho.....	88
Obrázek 4-26 Tabulka mezních hodnot pro vyhodnocení podle Berryho.....	88
Obrázek 4-27 Formulář protokolu.....	90
Obrázek 4-28 Vytvořený protokol	91
Obrázek 4-29 Základní grafy	93
Obrázek 4-30 Rozšířené grafy	93
Obrázek 4-31 Příklad přepsaných dat pro 3D graf s kurzorem. Přepsání dat je po sloupcích (otáčky). Šířka čáry = 1	94
Obrázek 4-32 Formulář grafy	96



Obrázek 4-33 Obrázek s nastavením pro graf č. 4-4	97
Obrázek 4-34 Nastavení ke grafu č.4-5, 4-6	98
Obrázek 4-35 nastavení grafu č. 4-7, 4-8	100
Obrázek 4-36 Nastavení grafu č. 4-9.....	102
Obrázek 4-37 Nastavení grafu č. 4-10.....	103
Obrázek 4-38 Nastavení grafu č. 4-11.....	103
Obrázek 4-39 nastavení grafu č. 4-12	104
Obrázek 4-40 Ukládaná data a jejich datový typ.....	105
Obrázek 4-41 Formulář pro uložení dat do databáze.....	106
Obrázek 4-42 Ukázka dat v DB část 1.....	108
Obrázek 4-43 Ukázka dat v DB část 2.....	108
Obrázek 5-1 Přístroje pro měření vibrací s analyzátozem PULSE	111
Obrázek 5-2 Uchycení akcelerometrů pomocí vosku.....	111
Obrázek 5-3 Přístroj ADASH VA4	112
Obrázek 5-4 Uchycení akcelerometrů - ADASH	113
Obrázek 5-5 Analyzátor Lion Precision s NB.....	114
Obrázek 5-6 Frézka MCV 1000 s vřetenem Step-Tec	116
Obrázek 5-7 Pětiosé obráběcí centrum MCU 400V-5X	117
Obrázek 5-8 Frézka MCV 1270 s vřetenem Kovosvit	118
Obrázek 5-9 Stroj Tajmac LM1.....	120
Obrázek 5-10 Frézka Haas TM1	121
Obrázek 5-11 Frézka Kovosvit MCVL 1000.....	122
Obrázek 5-12 Soustruh Emco turn 342	123
Obrázek 6-1 Vypracovaný protokol o měření - publikováno se svolením RCMT.....	125



Seznam grafů

Graf 2-1 Měření frekvenční odezvy akcelerometru pro různé způsoby upevnění.....	37
Graf 2-2 Ukázka nejpoužívanějších váhových oken	41
Graf 2-3 vliv počtu spektrálních čar	43
Graf 4-1 Příklad oscilujících otáček	68
Graf 4-2 Zobrazení součtu hodnot podle naměřených frekvencí.....	72
Graf 4-3 Ukázka „kurzoru“ v 3D grafu.....	95
Graf 4-4 2D Graf zobrazující otáčkovou a zvolenou frekvenci	97
Graf 4-5 3D graf naměřených dat v lineárních hodnotách (naměřených).....	98
Graf 4-6 3D Graf naměřených dat v logaritmických hodnotách.....	99
Graf 4-7 3D graf naměřených dat, lineární – pohled z vrchu.....	100
Graf 4-8 3D Graf naměřených dat, logaritmický – pohled z vrchu.....	101
Graf 4-9 Graf řezem zvolených frekvencí	101
Graf 4-10 Graf řezem zvolených otáček	102
Graf 4-11 Graf řezem otáčkovou frekvencí.....	103
Graf 4-12 Graf RMS hodnot 10 Hz – 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz	104
Graf 6-1 3D Graf naměřených hodnot osy X frézky MCV 1000.....	127
Graf 6-2 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy X frézky MCV 1000	127
Graf 6-3 Graf hodnot RMS osy X frézky MCV 1000.....	127
Graf 6-4 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 2, stroj MCV 1000	129
Graf 6-5 3D Graf naměřených hodnot osy Y frézky MCU 700V-5X	130
Graf 6-6 graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky MCU 700V-5X.....	131
Graf 6-7 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCU 700V-5X	131
Graf 6-8 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 1 stroj, MCU 700	132
Graf 6-9 3D graf naměřených hodnot osy X frézky MCV 1270	134
Graf 6-10 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy X frézky MCV 1270	134
Graf 6-11 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCV 1270.....	134
Graf 6-12 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 1, stroj MCV 1270	136
Graf 6-13 3D graf naměřených hodnot osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN	139
Graf 6-14 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN	139
Graf 6-15 Graf hodnot RMS osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN.....	139
Graf 6-16 3D graf naměřených hodnot osy Z frézky Haas TM1	141



Graf 6-17 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Z frézky Haas TM1	141
Graf 6-18 Graf hodnot RMS osy Z frézky Haas TM1	141
Graf 6-19 3D graf naměřených hodnot osy Y frézky MCVL 1000	143
Graf 6-20 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky MCVL 1000	143
Graf 6-21 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCVL 1000.....	143
Graf 6-22 3D graf naměřených hodnot osy Z soustruhu Emco turn 342	145
Graf 6-23 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Z soustruhu Emco turn 342	145
Graf 6-24 Graf hodnot RMS osy Z soustruhu Emco turn 342	145
Graf 6-25 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v radiálním směru rovina X-Y ..	147
Graf 6-26 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v radiálním směru rovina X1-Y1	148
Graf 6-27 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v axiálním směru rovina Z	148
Graf 6-28 porovnání vřeten graf RMS - radiální směr horší osy.....	149
Graf 6-29 porovnání vřeten graf RMS - radiální směr lepší osy	149
Graf 6-30 porovnání vřeten graf RMS - axiální směr	150



Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Stanovení mezních hodnot kmitání pro frézky dle normy ČSN 20 0065...	52
Tabulka 2-2 Hodnoty normy ČSN ISO 10816-1 pro stanovení stavu stroje	53
Tabulka 2-3 Mezní hodnoty jednotlivých pásem normy ČSN ISO 10816-3.....	54
Tabulka 2-4 Vyhodnocení vibrací dle NWIP-10 pro stroje s menším výkonem než 5 kW	55
Tabulka 2-5 Vyhodnocení vibrací dle NWIP-10 pro stroje s větším výkonem než 5 kW	55
Tabulka 4-1 Hlavička o měření z přístroje PULSE	65
Tabulka 4-2 Hlavička o měření z přístroje ADASH	67
Tabulka 4-3 Druhá část tabulky s údaji o měření.....	76
Tabulka 4-4 Zadávané parametry do formuláře pro uložení dat do databáze	107
Tabulka 5-1 Přehled měřených strojů a jejich parametrů	109
Tabulka 5-2 Nastavení analyzátoru PULSE	110
Tabulka 5-3 Přístrojové vybavení k analyzátoru PULSE.....	110
Tabulka 5-4 Nastavení analyzátoru ADASH VA4	112
Tabulka 5-5 Přístrojové vybavení k analyzátoru ADASH VA4	113
Tabulka 5-6 Nastavení analyzátoru Lion	114
Tabulka 5-7 Přístrojové vybavení Lion Precision	115
Tabulka 5-8 Parametry vřetena Step-Tec u stroje MCV 1000.....	116
Tabulka 5-9 Výpis měřených otáček (ot/min) pro měření přesnosti chodu vřetena za rotace	117
Tabulka 5-10 Parametry vřetena Kessler u stroje MCU 700v-5X.....	117
Tabulka 5-11 Měřené otáčky (ot/min) aparaturou Lion na stroje MCU 700V-5X	118
Tabulka 5-12 parametry vřetena Kovosvit u stroje MCV 1270	118
Tabulka 5-13 Měřené otáčky (ot/min) aparaturou Lion na stroje MCV 1270	119
Tabulka 5-14 Parametry vřetena Kessler pro stroj LM1	120
Tabulka 5-15 Parametry vřetena frézky Haas TM1.....	121
Tabulka 5-16 Parametry vřetena Kessler u stroje MCVL 1000	122
Tabulka 5-17 Parametry vřetena stroje Emco turn 342.....	123
Tabulka 6-1 Vyhodnocení stroje MCV 1000 dle norem.....	126
Tabulka 6-2 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Step-Tec na stroji MCV 1000 – měření č. 2	128
Tabulka 6-3 Vyhodnocení stroje MCU 700 dle norem	130
Tabulka 6-4 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Kessler na stroji MCU 700 – měření č. 1	131



Tabulka 6-5 Vyhodnocení stroje MCV 1270 dle norem.....	133
Tabulka 6-6 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Kessler na stroji MCV 1270 – měření č. 1	135
Tabulka 6-7 Vyhodnocení stroje LM1 dle norem	138
Tabulka 6-8 Vyhodnocení stroje Haas dle norem	140
Tabulka 6-9 Vyhodnocení stroje MCVL 1000 dle norem.....	142
Tabulka 6-10 Vyhodnocení stroje Emco dle norem	144
Tabulka 6-11 tabulka parametrů porovnaných vřeten	147



Použité zkratky

A/D – analog/digital

atd. – a tak dále

BP – bakalářská práce

CD – compact disc

CSV - Comma-separated values

CTRL – control

č. - číslo

ČSN - česká technická norma

ČVUT – České učení technické

DB – databáze

Doc. – docent

DP - diplomová práce

FFT - fast Fourier transform – rychlá Fourierova transformace

FT - Fourierova transformace

HW – hardware

IFFT - zpětná Fourierovou transformace

Ing. – inženýr

ISO - Mezinárodní organizace pro normalizaci

MS – Microsoft

např. - například

obr. – obrázek

ot/min – otáček za minutu

PC - personal computer

Ph.D. – philosophiæ doctor

RCMT - Research Center of Manufacturing Technology

RMS - Root Mean Square

Sb. – sbírky

SW – software

tzv. – takzvaný

UFF - Universal File Format



UPR - undulations per revolution

VBA - Visual Basic for Applications

VUT – vysoké učení technické



Přehled použitých značek a jednotek

a_t	<i>zrychlení kmitání</i>	m/s^2
CF	<i>Crest factor</i>	-
ENBW	<i>efektivní pásmo šumu</i>	mm/s
F	<i>amplituda budící síly</i>	N
f	<i>frekvence</i>	Hz
f_{bs}	<i>vzorkovací frekvence</i>	Hz
f_e	<i>harmonická budící síla</i>	N
f_{max}	<i>frekvenční rozsah spektra</i>	Hz
f_{vst}	<i>frekvence spojitého výstupního signálu</i>	Hz
k	<i>tuhost</i>	N/mm
k_0	<i>velikost překrytí</i>	%
m	<i>hmotnost</i>	kg
n	<i>otáčky</i>	ot/min
N_{avg}	<i>počet průměrů</i>	-
n_{avg}	<i>nastavený počet průměrů</i>	-
n_i	<i>otáčky použité při měření kmitání</i>	ot/min
n_{max}	<i>největší otáčky vřetena</i>	ot/min
n_{min}	<i>nejmenší otáčky vřetena</i>	ot/min
N_s	<i>počet čar spektra FFT analyzátoru</i>	-
OA	<i>overall level of Spektrum or Band</i>	mm/s
q	<i>rozdíl mezi dvěma sousedními otáčkami</i>	ot/min
$s_{e\,mez}$	<i>mezní hodnota výchylky kmitání</i>	μm
T	<i>perioda</i>	s
t	<i>čas</i>	s
T_{avg}	<i>celková doba sběru dat časových vzorků</i>	s
T_s	<i>doba sběru dat jednoho měření</i>	s
$v_{e\,mez}$	<i>mezní hodnota rychlosti kmitání</i>	mm/s



v_{log}	<i>rychlost kmitání v logaritmických hodnotách</i>	<i>mm/s</i>
v_{mer}	<i>naměřená rychlost kmitání</i>	<i>mm/s</i>
v_t	<i>rychlost kmitání</i>	<i>mm/s</i>
x_a	<i>amplituda harmonického kmitání</i>	<i>m</i>
x_{avg}	<i>průměrná hodnota výchylky signálu</i>	<i>μm</i>
x_{avg-1}	<i>poslední průměrovaná hodnota signálu z celkových n_{avg}</i>	<i>-</i>
$x_{ef} = x_{RMS} = RMS$	<i>efektivní hodnota</i>	<i>-</i>
x_i	<i>okamžitá výchylka signálu</i>	<i>μm</i>
$x_{stř}$	<i>střední hodnota</i>	<i>-</i>
$x_{šp-šp}$	<i>rozkmít</i>	<i>-</i>
x_t	<i>výchylka kmitání</i>	<i>μm</i>
φ_F	<i>počáteční fázový posuv budící síly</i>	<i>rad</i>
Δt	<i>časový interval mezi jednotlivými průměry x_{avg} a x_{avg-1}</i>	<i>-</i>
X	<i>amplituda vynuceného kmitání</i>	<i>-</i>
Ω	<i>vlastní kruhová frekvence</i>	<i>rad/s</i>
φ	<i>fázový posun</i>	<i>rad</i>
ω	<i>kruhová frekvence budící síly</i>	<i>rad/s</i>



1. Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na ekonomičnost provozu. S tím jsou spojené nároky na minimální prostoje stroje. Pokud se stroj porouchá, je třeba rychle diagnostikovat poruchu, a to pokud možno bez demontáže celého, nebo části stroje. K tomuto účelu je vhodná vibrační diagnostika, která na rozdíl od jiných metod diagnostiky může detekovat všechna poškození stroje bez nutnosti mechanického zásahu na stroji.

Vibrační diagnostika je jednou z nedestruktivních metod pro zjištění stavu stroje. Každý stroj více či méně vibruje a ve většině případů se jedná o parazitní vliv, který je třeba minimalizovat. Vibrační diagnostika řeší dvě základní úlohy.

- a) Diagnostika mechanického (nevývaha, nesouosost, uvolnění atd.)
- b) Diagnostika stavu valivých ložisek

Nevýhodou programů dodávaných k analyzátoru vibrací je jejich cena za dodatečné licence a to, že není možné automaticky vyhodnotit měření dle vybraných norem. Z těchto důvodů byla ve spolupráci se společností KOVOSVIT MAS, a.s. vypsána diplomová práce na téma: Automatizované vyhodnocení dat vibrační diagnostiky vřeten obráběcích strojů. V rámci této práce měl vzniknout sw, který by výše uvedené nedostatky primárních měřičských aplikací částečně eliminoval. Výhodou takového programu je, že po měření je možné do pár minut vytvořit protokol o měření s vyhodnocením dle norem s přílohou ve formě grafů. To ocení zejména zákazníci, kteří dostanou předběžný protokol v den měření. Další předností takové aplikace je, že není vyžadována licence nebo hardwarový klíč a měření si lze prohlédnout na libovolném počítači s produktem MS Office.



1.1. Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je vytvořit program pro automatizované vyhodnocení naměřených dat vibrační diagnostiky v prostředí MS Office. Požadavky na aplikaci jsou:

- a) import dat z analyzátoru *Adash VA4* a *Bruel&Kjaer Pulse*
- b) vyhodnocení vibrací dle příslušných norem
- c) automatizovaná tvorba protokolu z měření
- d) přílohy protokolu ve formě grafů

Dále bylo součástí zadání naměřit vybraná vřetena a ve vytvořené aplikaci zhotovit protokoly o měření a následně vřetena kvalitativně porovnat.



1.2. Metodika práce

Aplikace na automatické vyhodnocení naměřených dat bude vzhledem k požadavku na výstup v MS Office vytvořena v programu Excel pomocí jazyka VBA (Visual Basic for Application). Pro jednoduché ovládání aplikace budou využity formuláře, kde uživatel bude moci zvolit nastavení jednotlivých parametrů.

Na základě požadavků vyplývajících z rešerše bude navržena výchozí verze vytvářené aplikace pro vyhodnocení dat vibrační diagnostiky, která bude otestována ve spolupráci se společností Kovosvit MAS a.s. Sezimovo ústí.

Jednotlivá měření se budou ukládat do databáze v programu MS Access nebo MS Excel.

Měření proběhne ve spolupráci se společností KOVOSVIT MAS a.s. Sezimovo ústí. Měření vibrací bude provedeno analyzátory ADASH i PULSE. Toto měření se na žádost pracovníků firmy Kovosvit MAS rozšíří o měření přesnosti chodu vřetena za rotace aparaturou LION PRECISION. K tomuto měření bude vypracován protokol dle zvyklostí RCMT (Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii).

Další měření proběhne v RCMT, kde budou naměřeny stroje pomocí analyzátoru PULSE a výsledné měření bude zpracováno vytvořenou aplikací. Nebude využito měření aparaturou Lion Precision.

Podle takto shromážděných dat bude aplikace upravena do finálního stavu.

Navržený SW nebude zpracovávat data naměřena aparaturou LION Precision

Do příloh diplomové práce budou vloženy tabulky a grafy z vyhodnocení, které se do práce nevešly.



2. Současné řešení dané problematiky

V první části rešerše této diplomové práce se budu zabývat druhy působící síly, definováním měřených veličin a jejich matematickým popisem. Následně popíši měřící hardware a funkci analyzátoru vibrací, kde se zaměřím na úpravu signálu od vstupu do analyzátoru, až po výpočet FFT. V závěru rešeršní části práce popíšu používané metody měření (přesnost chodu vřetena za rotace a rozběhové testy) a vyhodnocení měření dle vybraných norem.

2.1. Charakter signálu

Při každé diagnostice stroje analyzujeme odezvu stroje na původní příčinu. Při aplikaci vibrační diagnostiky jsou touto příčinou vibrace, které jsou závislé na druhu působící síly. Tři hlavní druhy budící síly jsou^[1]:

- a) periodická budící síla
- b) impulzní budící síla
- c) budící síla náhodného průběhu

2.1.1. Periodická budící síla

Nejjednodušší periodická síla má sinusový průběh. Jedná se o *harmonickou budící sílu*.

^[2] V praxi se čistě harmonická síla téměř nevyskytuje, ale většinu reálných sil u rotačních strojů lze vyjádřit jako součet harmonických sil. To umožňuje charakterizovat vlastnosti periodické síly a její vliv na vibrační odezvu pomocí harmonické síly a její odezvy^[1]. Působí-li na těleso harmonická síla (rov. 2-1), je pohyb tělesa po ustálení harmonický s kruhovou frekvencí ω , nicméně s jinou amplitudou (obr. č. 2-1) ^[1]. Toto kmitání se nazývá vynucené kmitání. Výchylka kmitání je vyjádřena rovnicí č. 2-2. ^[1]

$$f_t = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (2-1)$$

$$x_t = X \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (2-2)$$

Kde: f_e = harmonická budící síla

F = amplitud budící síly [N]

ω = kruhový frekvence budící síly [rad/s]

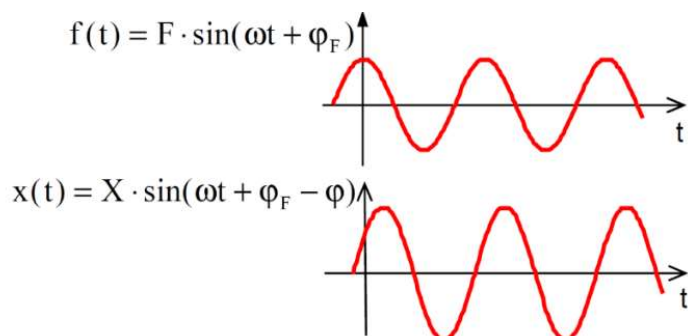
t = čas [s]

φ_F = počáteční fázový posuv budící síly

x_t = výchylka kmitání

X = amplituda vynuceného kmitání

φ = fázový posun – zpoždění výchylky za budící silou

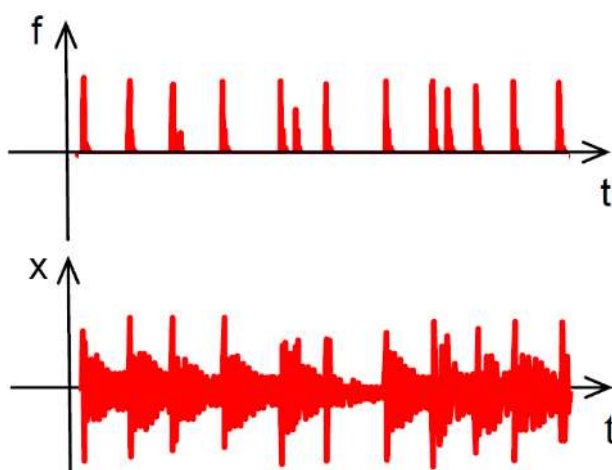


Obrázek 2-1 Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly [1]

Tento typ kmitání (periodická i budící síla jsou harmonické) vzniká např. při nesouososti nebo nevyváženosti [1].

2.1.2. Impulzní budící síla

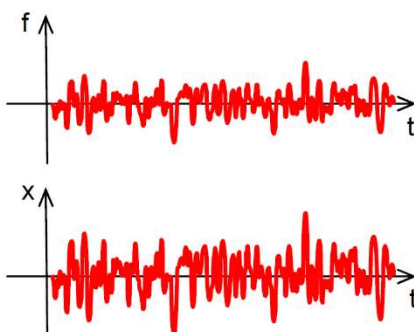
Pokud je těleso nebo mechanická soustava rozkmitána náhlým působením síly po zanedbatelně krátkou dobu, jedná se o rázové buzení, které se nazývá impulzní buzení (obr. č. 2-2) [3]. Tato soustava je vychýlena z rovnovážné polohy a kmitá na vlastních frekvencích soustavy až do ustálení. V diagnostice se impulzní budící síla používá při modálních zkouškách poklepáním modálním kladívkem na měřenou soustavu. S rázovým buzením se lze setkat např. při závadách na valivých ložiskách. [1]



Obrázek 2-2 Kmitání vyvolané opakující se impulzní silou [1]

2.1.3. Budící síla náhodného průběhu

Pokud síla náhodného průběhu působí na těleso, je odezva také náhodná (obr. č. 2-3). Zároveň mohou být vybudeny vlastní frekvence tělesa (jako u impulzního buzení). Náhodné buzení je přítomné vždy, nejčastěji jako šum, ale může se jednat i o turbulentní proudění.^[1] Pokud je potřeba provést měření s budící silou náhodného průběhu, jako zdroj budící síly se používá shaker (vibrátor), který je nastavený na bílý šum. Tímto způsobem se měří např. frekvenční odezva.

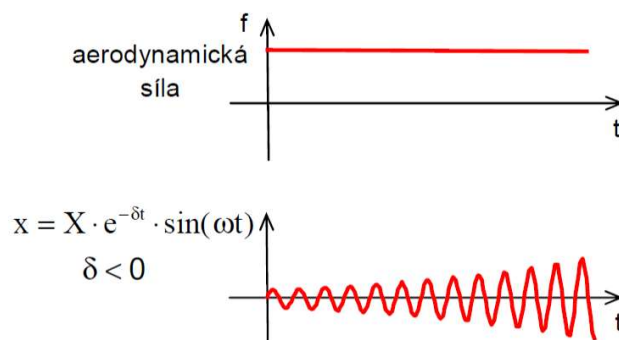


Obrázek 2-3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu [1].

2.1.4. Samobuzené kmitání

Samobuzené kmitání vzniká, pokud dojde ke zpětné vazbě mezi kmitáním tělesa na vlastní frekvenci a budící silou.

Budící síla může být aerodynamická síla působící na těleso tak, že toto těleso vybudí na jeho vlastní frekvenci.^[1] Dále může budící síla u samobuzeného kmitání vzniknout u obrábění. Kmitání vzniká vzájemným ovlivňováním řezného procesu a obráběcího stroje.^[4]



Obrázek 2-4 Vznik samobuzeného kmitání způsobené aerodynamickou silou [1]



2.2. Základní veličiny kmitavého pohybu

Těleso o hmotnosti m zavěšené na pružině o tuhosti k vykoná po vychýlení z rovnovážné polohy harmonický kmitavý pohyb. Při zanedbání tlumení těleso kmitá na vlastní frekvenci Ω . Pohyb má sinusový průběh s amplitudou X_a .^[1]

$$\Omega = \sqrt{k/m} \quad (2-3)$$

$$x_t = x_a \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \quad (2-4)$$

Kde: $x_a =$ amplitud harmonického kmitání [m]

$\Omega =$ vlastní kruhová frekvence [rad/s]

$\varphi =$ počáteční fázový úhel (dán počáteční úhlovou výchylkou)

$k =$ tuhost

$m =$ hmotnost

Pro diagnostiku se častěji než Ω nebo také ω v radiánech za sekundu používá frekvence vyjádřená v hertzech f

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \text{ [Hz]} \quad (2-5)$$

Perioda T je převrácenou hodnotou frekvence f

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \text{ [s]} \quad (2-6)$$

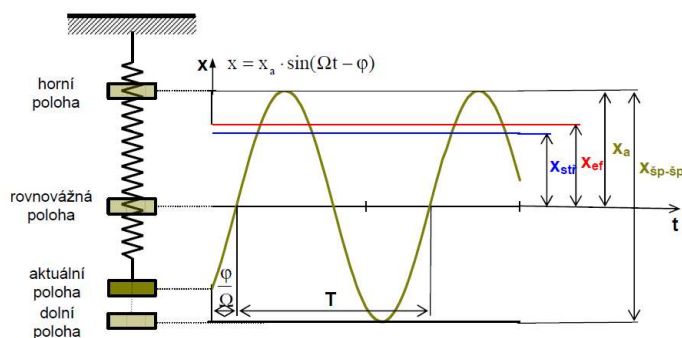
Při měření FFT spektra se často místo amplitudy (špička) používají jiné charakteristiky:^[1]

$$\text{efektivní hodnota} = \text{RMS} = 0,707 \cdot \text{amplituda} \quad x_{ef} = 0,707 \cdot x_a \quad (2-7)$$

$$\text{střední hodnota} = 0,637 \cdot \text{amplituda} \quad x_{stř} = 0,637 \cdot x_a \quad (2-8)$$

$$\text{rozkmít (špička – špička)} = 2 \cdot \text{amplituda} \quad x_{šp-šp} = 2 \cdot x_a \quad (2-9)$$

Veličina x v rovnicích 2-7, 2-8, 2-9 může být libovolná, nikoli jen výchylka.



Obrázek 2-5 Veličiny popisující harmonický pohyb [1]



Často používaná veličina pro popis vibračního signálu je hodnota RMS (Root Mean Square). Je to efektivní hodnota, která vyjadřuje průměrný výkon měřené veličiny. Získává se [1]:

- zachycením signálu za dobu T (nemusí jít o periodu)
- usměrněním signálu (signál nabývá kladných i záporných hodnot) umocněním
- součtem hodnot
- součet vydělíme dobou T
- výsledek odmocníme.

Vyjádření rovnicí:

$$x_{ef} = x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T X^2 \cdot dt} \quad (2-10)$$

Vzhledem k tomu, že doba T obvykle není doba periody, nelze získat při opakovaných měřeních stejnou hodnotu.

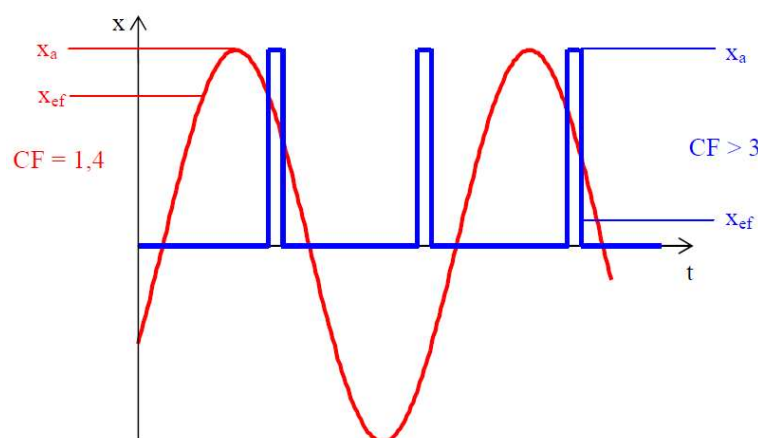
Střední hodnota se určí ze vztahu:

$$x_{stř} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| \cdot dt \quad (2-11)$$

Poměr mezi špičkovou hodnotou a RMS hodnotou se nazývá činitel výkmitu (ang. Crest factor).

$$CF = \frac{x_a}{x_{ef}} \quad (2-12)$$

Pro malé hodnoty CF (cca do 3) dominuje sinusový charakter. Pro větší hodnoty CF převládá charakter impulzní. Jedná se o jednu z metod pro zjištění stavu valivých ložisek. [1]



Obrázek 2-6 Ukázka činitele výkmitu [1]

2.3. Měřené veličiny

V mechanice je pohyb popsán výchylkou (dráhou), rychlostí a zrychlením. Tyto veličiny jsou vzájemně matematicky provázané. Z tohoto pohledu není podstatné, jakou veličinu pro popis vibrací zvolíme, změní se jen měřítko a časový posun (fáze).

- výchylka (ang. displacement) většinou v mikrometrech [μm]
- rychlost (ang. velocity) první derivace výchylky podle času většinou v [mm/s]
- zrychlení (ang. acceleration) druhá derivace výchylky podle času většinou v [m/s^2]

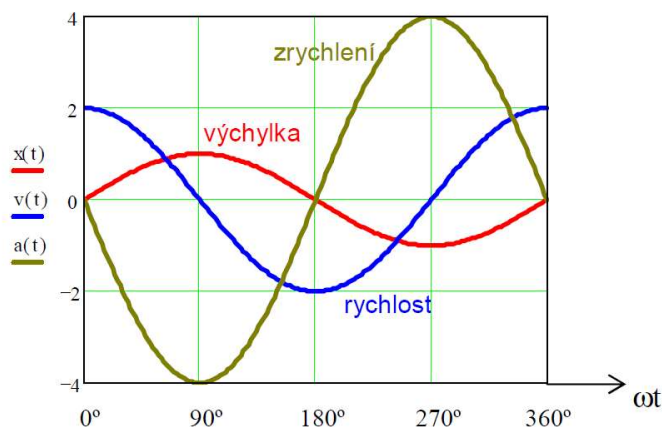
Na obr. č. 2-7 jsou znázorněny závislosti těchto veličin během jedné periody. Rychlost se vždy opožďuje za výchylkou o 90° a zrychlení se opožďuje o 90° za rychlostí.^[1]

Matematická závislost:

$$x_t = X \cdot \sin(\omega t) \quad (2-13)$$

$$v_t = \frac{dx}{dt} = X \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (2-14)$$

$$a_t = \frac{dv}{dt} = -X \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (2-15)$$



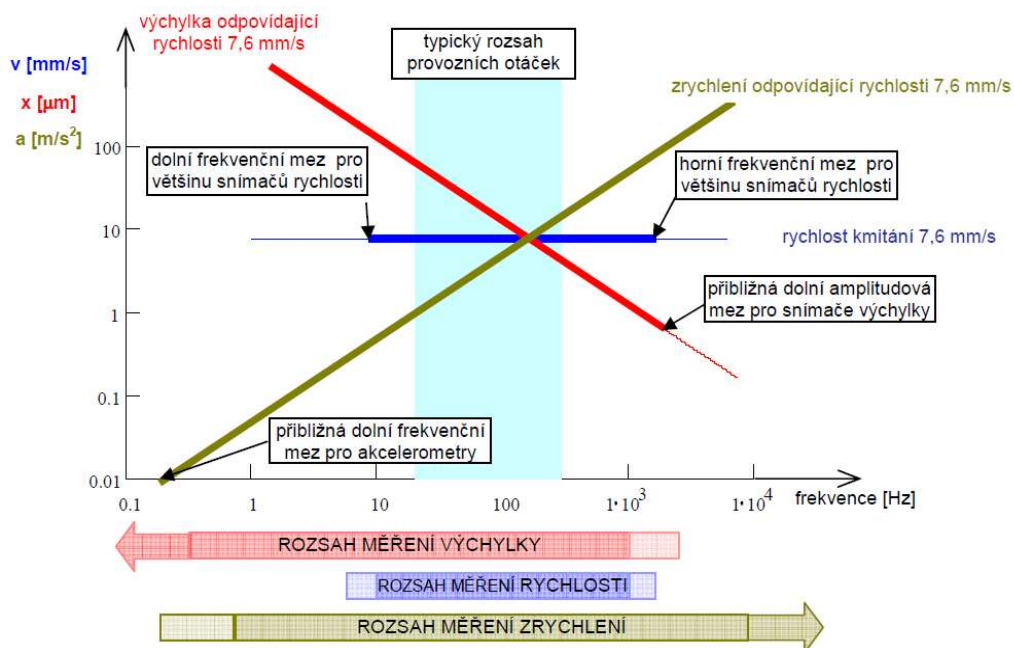
Obrázek 2-7 Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [1]

Při měření je ale nutno vzít v úvahu nepříznivé vlivy způsobující nepřesnosti měření. Měřená veličina se proto volí tak, aby byla co nejméně ovlivněna šumem. Při měření je šum přítomen vždy a u slabých signálů vede k větší nepřesnosti měření.

Na obr. č. 2-8 je znázorněno kmitání s hodnotou $7,6 \text{ mm/s}$ na všech frekvencích. Z obrázku je patrné, že při výběru měřené veličiny je jedním z důležitých faktorů měřený frekvenční rozsah. Při vzrůstající frekvenci hodnoty výchylky klesají, rychlost je



konstantní a zrychlení roste. Z tohoto důvodu je vhodné pro malé frekvence (do 10 Hz) měřit výchylku. Pro hodnoty 10 – 1000 Hz je vhodné měřit rychlost a hodnoty nad 1000 Hz ve zrychlení. Pokud se měří rychlost vibrací, tak není nutné uvádět otáčky měření. Pro ostatní dvě veličiny je nutné pro vyhodnocení stroje uvést otáčky stroje při měření [1].



Obrázek 2-8 Omezení při měření [1]

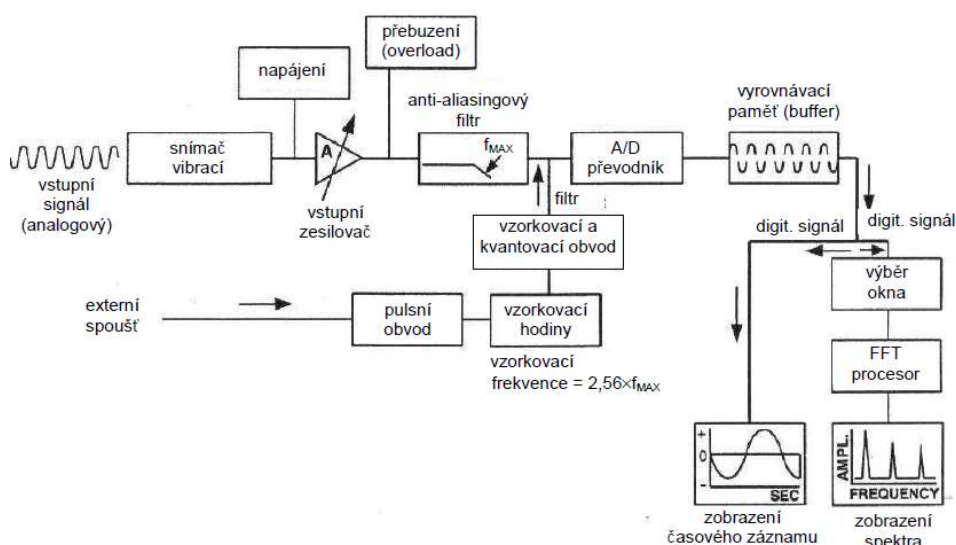
2.4. Měřící hardware

Pro změření vibrační stroje je zapotřebí měřící přístroj. Používají se jednoduchá měřidla až vícekanálové analyzátoři vybavené množstvím funkcí, které usnadňují měření a jejich analýzu.

Základní schéma analyzátoru je na obr. 2-9. Signál ze snímače vibrací prochází přes zesilovač, anti-aliasingový filtr a A/D převodník. Zde signál vstupuje do bufferu (vyrovnávací paměť) a dále se zobrazí jako časový záznam, nebo se zpracuje pomocí FFT analýzy do frekvenčního spektra. [1]

Na místo FFT analýzy lze zvolit jiný typ analýzy [5]:

- FFT
- CPB - oktávová
- řádová
- obálková



Obrázek 2-9 Schéma analyzátoru vibrací [1]

2.4.1. Snímače vibrací

Vibrace můžeme měřit podle tří fyzikálních veličin, které jsou snímány pomocí snímače:

- výchylky
- rychlosti (velometry)
- zrychlení (akcelerometry)

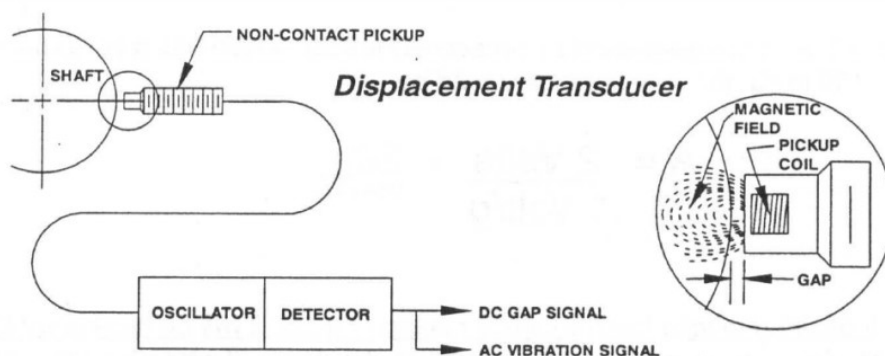
Snímače výchylky: V současné době se nejvíce používají bezkontaktní snímače výchylky. Tyto snímače fungují na principu změny Foucaultových proudů (vířivé



proudy) při změně odporu prostředí způsobené změnou vzdálenosti. Další typy snímačů výchylky jsou např. laserové, ultrazvukové, kapacitní a indukční. Ty se používají pro měření relativních vibrací hřídele.

Snímač výchylky na principu vířivých proudů měří vzdálenost mezi vodivým povrchem a špičkou snímače. Měřicí systém se skládá ze snímače, oscilátoru a detektoru. Oscilátor generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který prochází cívkou zabudovanou ve snímači a vytváří vysokofrekvenční magnetické pole. Elektromagnetické pole cívky indukuje ve vodivém materiálu vířivé proudy. Tyto vířivé proudy odvádějí energii ze systému, což se projeví na změně impedance cívky. Ta je vyhodnocena v detektoru, z kterého je již nízkofrekvenční signál poslán do vyhodnocovací jednotky.

Vzhledem k tomu, že měření je závislé na vodivosti měřeného materiálu a na jeho magnetické permeabilitě, tak snímače fungují, jsou kalibrovány jen na jeden materiál.^{[1],[8]}

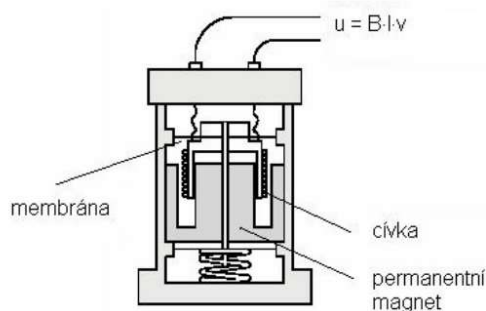


Obrázek 2-10 Schéma systému snímače výchylky na bázi vířivých proudů [8]

Snímače rychlosti: Fungují na principu elektromagnetické indukce. Při pohybu cívky v elektromagnetickém poli se na vývodu cívky vytvoří elektromagnetické napětí. Velikost indukovaného napětí je závislá na relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem. Snímač rychlosti se skládá ze dvou částí:

- permanentní magnet - je pevně spojen s pouzdem snímače
- cívka - je uložena na měkkých pružinách a vlivem setrvačnosti zůstává v klidu.

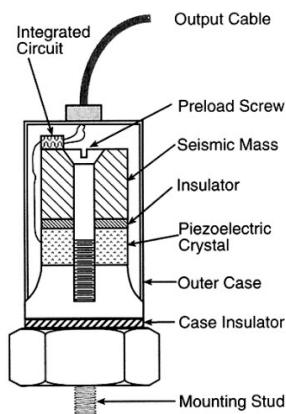
Moderní snímače rychlosti jsou laserové a fungují na principu Dopplerova jevu. Jejich nevýhodou je, že jsou velmi drahé a proto se téměř v diagnostice nepoužívají.^{[1],[8]}



Obrázek 2-11 Provedení snímače rychlosti [8]

Snímače zrychlení: nebo také akcelerometry, jsou pro své výhody (např. měření od 0 Hz) nejčastěji používané snímače vibrací. Pro získání rychlosti, nebo výchylky, je možné signál ze snímače integrovat.

Akcelerometry fungují na principu piezoelektrického materiálu, který při deformaci vytváří elektrický náboj. Piezoelektrická destička je umístěna mezi dvěma hmotami, z nichž jedna je pevně spojena s pouzdem snímačem (tedy strojem) a druhá hmota (setrvačná), je umístěna pružně. Pružné uložení je provedeno předepjatým šroubem s piezoelektrickou destičkou. Tím je zajištěn velký poměr tuhosti a hmotnosti, což má za následek vysoké vlastní frekvence snímače.



Obrázek 2-12 Snímač zrychlení (tlakový) [8]

Akcelerometr, na rozdíl od snímačů výchylky, měří vibrace absolutní. Referencí je nehybná setrvačná hmota. Snímače výchylky měří vibrace relativní - vibrace rotoru vůči statoru, který ovšem může taky kmitat.

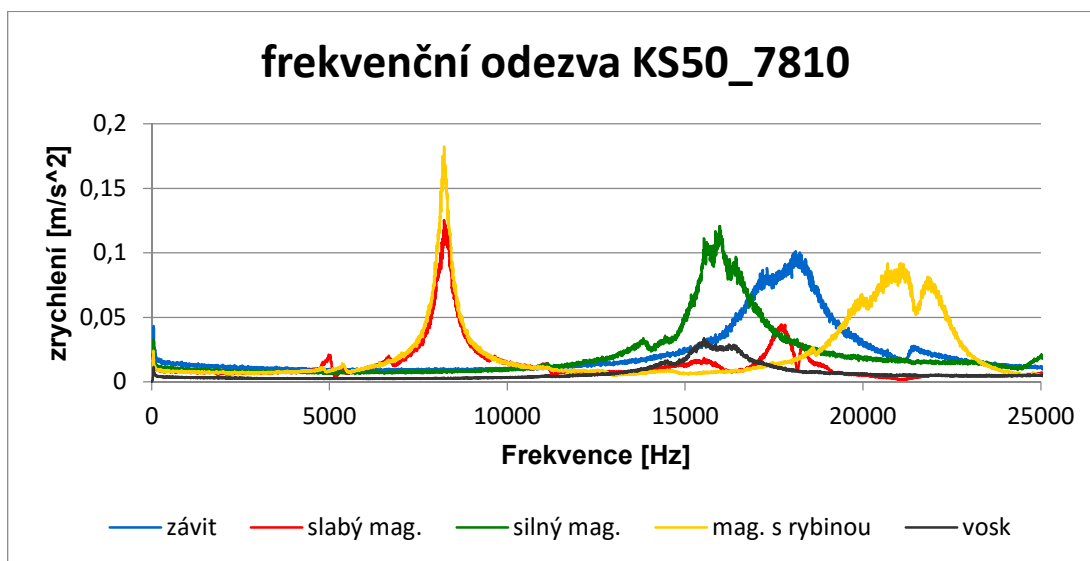
Akcelerometry se dělají ve třech typech (obr. 2-13, kde jsou popsány výhody jednotlivých typů):

- a) smykový
- b) tlakový
- c) ohybový

Typ akcelerometru	výhody	nevýhody
<p>smykový</p>	široký frekvenční rozsah relativně odolný nízký teplotní vliv	menší citlivost
<p>tlakový</p>	široký frekvenční rozsah odolný na rázy	náchylný na teplotní vlivy náchylný na deformaci základny
<p>ohybový</p>	měří velmi nízké frekvence má velmi vysokou citlivost	křehký, citlivý na rázy

Obrázek 2-13 Typy akcelerometrů [1]

Montáž akcelerometru: je velmi důležitá, protože akcelerometr může zachytit jen vibrace, které na něj působí. Nevhodné upevnění snímače ke stroji může zcela znehodnotit data, nebo výrazně omezit frekvenční rozsah přístroje. Způsob upevnění volíme na základě možnosti zásahu do stroje (ne vždy je možné navrtat díru se závitem do stroje) tak, abychom pokryli frekvenční rozsah, který nás zajímá. Způsobu upevnění akcelerometru se věnuje norma ČSN ISO 5348. Na grafu č. 2-1 je změřená odezva snímače MMF KS 50 při různém upevnění snímače. Z grafu vyplývá, že nejméně vhodný způsob je upevnění magnetem (obzvláště upevnění slabým magnetem). Používá se jen v provozních (pochůzkových) měřeních, protože je to rychlé a nenáročné. K upevnění akcelerometrů se také využívá včelí vosk. Tato metoda je rychlá, nenáročná a frekvenční rozsah snímače téměř nesnižuje. Nejvhodnější je přichycení snímače pomocí šroubu. To lze ale použít jen tehdy, pokud do testovaného objektu můžeme vyrobít závit. Pokud závit vytvořit nemůžeme, je možné vytvořit tzv. „měřicí plošku“. To je váleček, který má z jedné strany závit a z druhé hladkou plochu, kterou přilepíme speciálním lepidlem k měřené struktuře.^[10]



Graf 2-1 Měření frekvenční odezvy akcelerometru pro různé způsoby upevnění [10]

Další důležitou součástí při měření je dodržení pravidla umístění kabelu z akcelerometru do analyzátoru. Z akcelerometru vede velmi slabý elektrický signál, který může být rušen elektromagnetickým polem, které je ve výrobních závodech častým jevem. Je třeba zajistit, aby uzemnění bylo jen na jednom konci, jinak může dojít k uzavření zemní smyčky.

Po přivedení signálu z akcelerometru do analyzátoru je nutné nastavit dynamický rozsah. Na vstupu do analyzátoru je tzv. zesilovač/zeslabovač signálu, který upravuje signál tak, aby nedocházelo k přebuzení (OVERLOAD), ale zároveň signál musí být dostatečně silný. Nastavení zesilovače může být automatické nebo ruční.

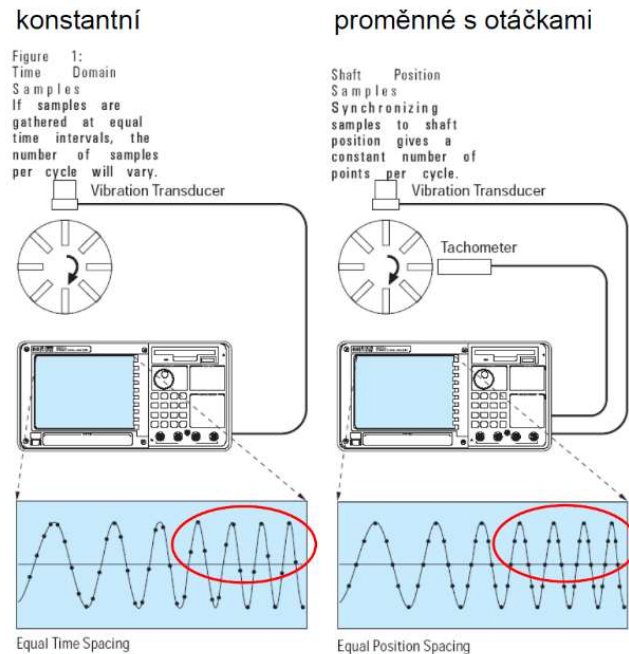
2.4.2. Vzorkování a Aliasing

Signál z akcelerometru je analogový. S analogovým signálem se dá pracovat pouze s analogovými zařízeními v reálném čase. Z toho plynou jistá omezení, jako jsou složitá úprava, klasifikace, nebo zobrazení takového signálu. Z těchto důvodů je lepší převést signál na diskrétní, který se dá digitálně upravovat nebo ukládat. Základní převod signálu je vzorkování, tedy časová diskretizace signálu. Většinou se jedná o hodnoty funkce $f(t)$, která je spojitá v čase. Příkladem takového signálu může být funkce se sinusovým průběhem, který je následně převeden A/D převodníkem.^[11]

Interval vzorkování může být:^[12]

- a) konstantní v čase

b) konstantní na otáčku



Obrázek 2-14 Vzorkování signálu [12]

Stanovení vzorkovací frekvence je náročné a důležité. Pokud je zvolena příliš vysoká vzorkovací frekvence (nazývá se převzorkování nebo oversampling), výrazně roste počet dat i přes to, že informace by byla zachována ve věrné podobě i při menším počtu dat. Pokud je zvolena příliš nízká vzorkovací frekvence (podvzorkování, subsampling), dochází ke ztrátě z původního signálu a při obnově již nelze získat původní signál [11].

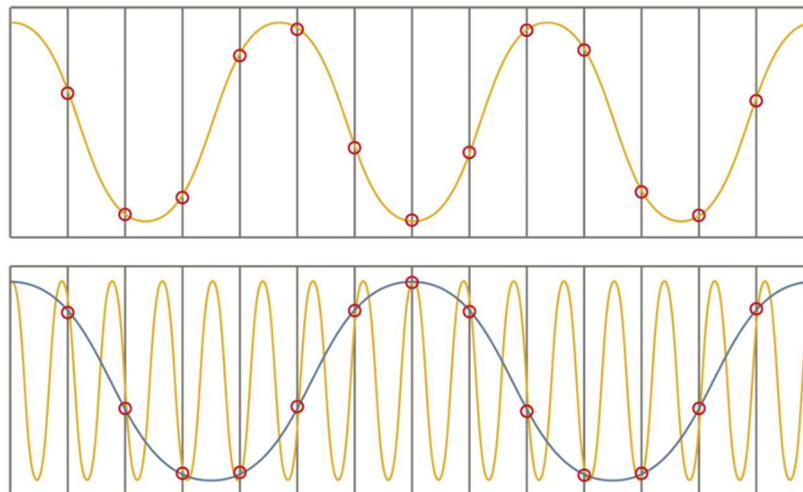
Minimální vzorkovací frekvence je dána Nyquistovým teorémem (někdy taky Shannonův teorém). Ten říká, že přesná rekonstrukce signálu z jeho vzorků je možná, jen pokud vzorkovací frekvence byla alespoň dvakrát větší než maximální frekvence rekonstruovaného signálu. Neboli musí být splněna následující rovnice [11]

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{vst} \quad (2-16)$$

Kde: f_{bs} = vzorkovací frekvence

f_{vst} = frekvence spojitého výstupního signálu

Pokud není dodržen Nyquistův teorém, dochází k ději zvanému Aliasing (obr. č. 2-15).



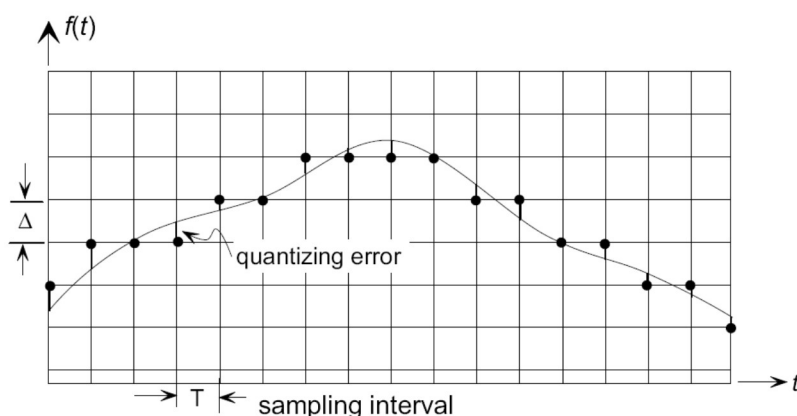
Obrázek 2-15 Příklad aliasingu [13]

Aliasingu lze zabránit dvěma způsoby. Prvním je dodržení Nyquistova teoremu, což ovšem u signálu z akcelerometru není vždy možné. Z tohoto důvodu je druhým způsobem použití antialiasingového filtru. Filtrování signálu se provádí před vstupem signálu do A/D převodníku a je nutnou součástí všech analyzátorů vibrací. Jedná se o dolnoproustný filtr se strmou hranou, který odstraní složky větší, než je polovina vzorkovací frekvence z původního signálu. I přesto, že charakteristika filtru je strmá, není úplně kolmá. Z tohoto důvodu se odstraňuje ještě horní část spektra (většinou od $0,8 \cdot f_{vz}/2$ do $f_{vz}/2$). Proto požadavek na vzorkovací frekvenci je ^[12]:

$$f_{vz} = 2,56 \cdot f_{vst} \quad (2-17)$$

2.4.3. Kvantování

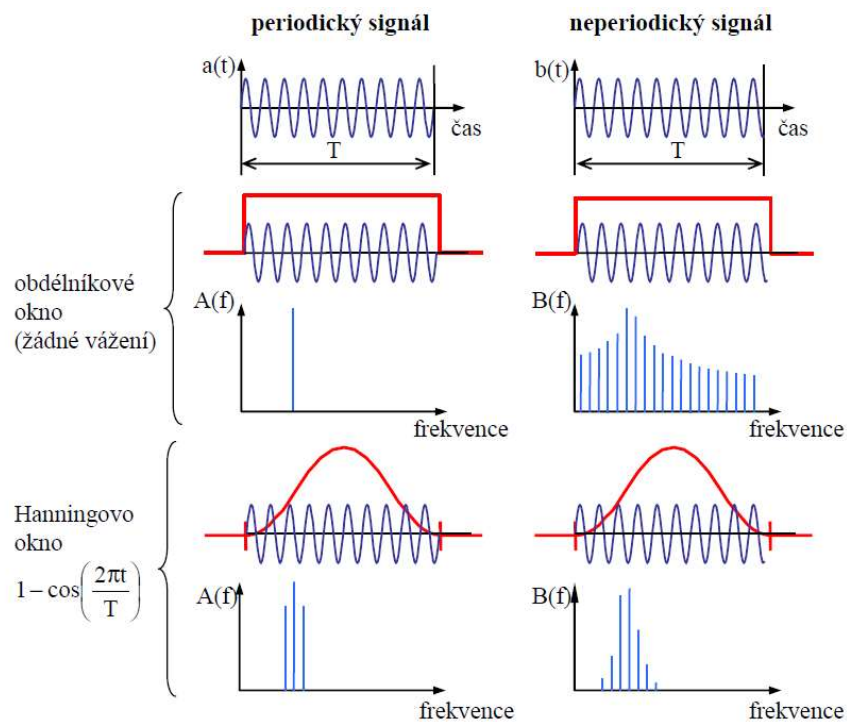
Analogový signál je nejen spojitý v čase, ale obsahuje také nekonečně mnoho hodnot amplitudy. Při převodu v A/D převodníku je nutné diskretizovat jeho amplitudovou modulaci. Tato diskretizace se nazývá *kvantování*, a jedná se o zaznamenání amplitudy. Je to proces ztrátový a nevratný. Kvantovací rozsah je množina ekvidistantních hodnot, která má stupňovitý charakter. Rozsah se volí jako mocnina 2^n , kde n znamená počet bitů reprezentace amplitudy. Na obr. č. 2-16 je znázorněna diskretizace signálu. U diskretizovaného signálu jsou postupně zaznamenány hodnoty na časové ose a k nim jsou přiřazeny hodnoty amplitudy. Na obr. č. 2-16 je T perioda vzorkování a Δ vyjadřuje velikost kvantizačního kroku. Při přiřazení hodnoty amplitudy k nejbližší kvantované hodnotě vzniká kvantizační chyba. Této chybě se v průběhu celého signálu říká kvantizační šum.^[11]



Obrázek 2-16 Diskretizace signálu s kvantovací chybou [11]

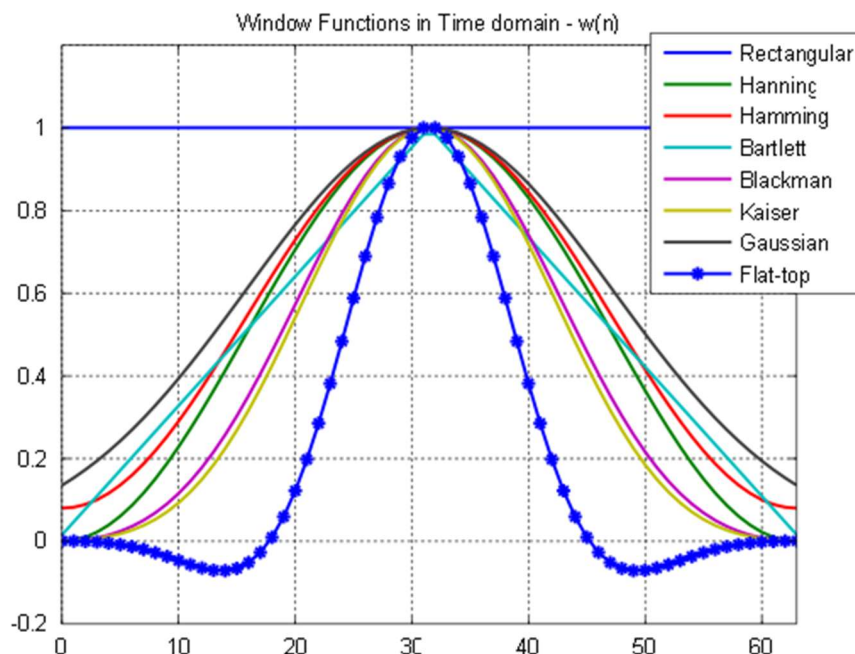
2.4.4. Chyba únikem (chyba typu leakage)

Aby Fourierova transformace mohla rozložit signál na základní sinusovky, musí být signál periodický. Skutečné signály vibrací ovšem periodické nejsou. To způsobuje zkreslení spektra signálu, tzv. únik (ang. leakage). Aby se tomu zamezilo, signál se musí upravit použitím váhového okna (obr. č. 2-17). Na obrázku 2-17 je ukázán princip funkčnosti váhového okna. Pokud je signál vstupující do Fourierovy transformace (v rámci periody T), není třeba používat váhové okno a výsledná transformace je jedna spektrální čára. Pokud signál není periodický (na obr. vpravo), algoritmus FFT se snaží vzniklou nespojitost vymodelovat pomocí mnoha sinusovek. Výsledek není jedna spektrální čára, jak by odpovídalo skutečnosti, ale mnoho čar. Toto zkreslení výsledného signálu moc nevypovídá o skutečnosti a mohou se v něm schovat důležité diagnostické informace. Tuto chybu je možno výrazně potlačit použitím váhového okna. Na obr. je ukázáno Hanningovo okno, které se používá nejčastěji. Signál je na obou koncích potlačen až k nule. Tím se odstraní nespojitost a signál se více blíží periodickému signálu. Výsledkem (viz obr.2-17) je jen několik čar. U periodického signálu sice dochází k mírnému zhoršení, ale RSM spektra zůstává zachováno.^{[14],[15]}



Obrázek 2-17 Porovnání periodického a neperiodického signálu a oken [14]

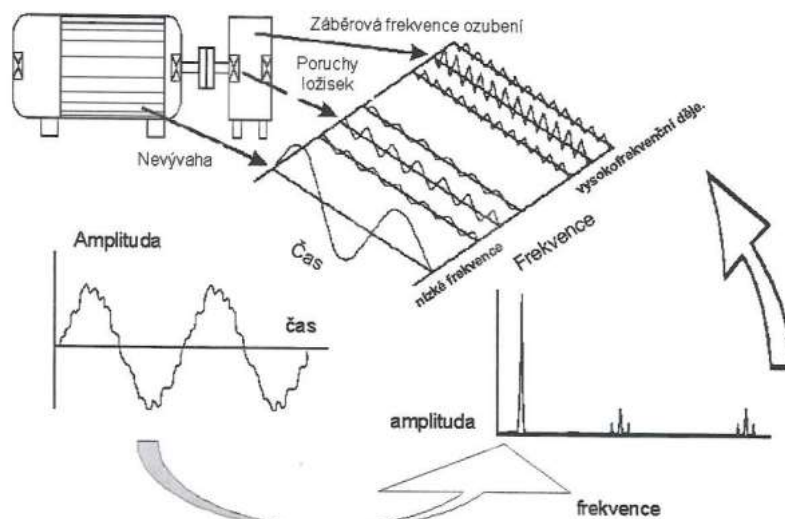
Příklady jednotlivých oken jsou na grafu č. 2-2. Jak již bylo řečeno, pro obecné měření se využívá Hanningovo okno. Dále se využívá okno Rectangular (měření bez okna). Pro kalibraci akcelerometrů se volí okno Flat-top.



Graf 2-2 Ukázka nejpoužívanějších váhových oken [16]

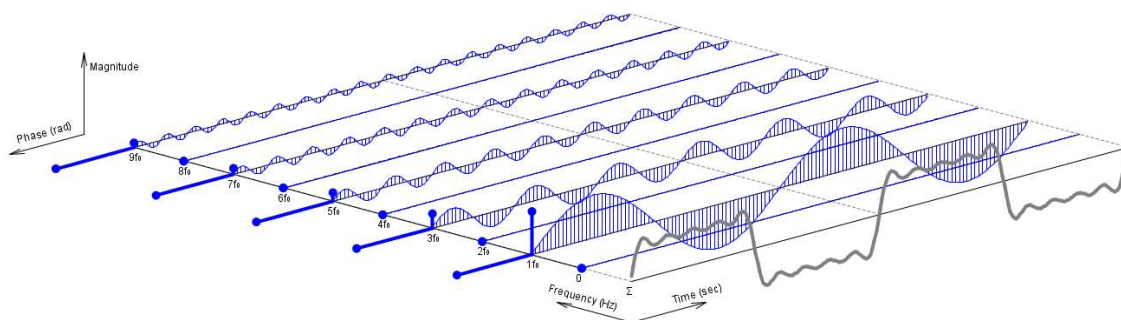
2.4.5. Fourierova transformace

Celkové vibrace stroje se skládají z vibrací jeho jednotlivých částí (obr. č. 2-18). Frekvenční analýza stroje se provádí pomocí Fourierovy transformace.



Obrázek 2-18 Princip frekvenční analýzy [6]

Fourierova transformace umožňuje rozklad periodického signálu na nekonečně mnoho základních sinusovek. Pokud bychom tyto sinusovky zpětně sečetli, dostali bychom původní signál (obr. č. 2-19).



Obrázek 2-19 Příklad rozkladu signálu pomocí FFT [7]

V současných analyzátoch se používá FFT (fast Fourier transform – rychlá Fourierova transformace). Vzhledem k tomu, že pro FFT se využívá diskretní signál, je třeba ošetřit některé rysy, které mohou vést k chybám. Jedná se o chybu typu aliasing a chybu únikem (leakage).^[1]



2.5. Nastavení analyzátoru

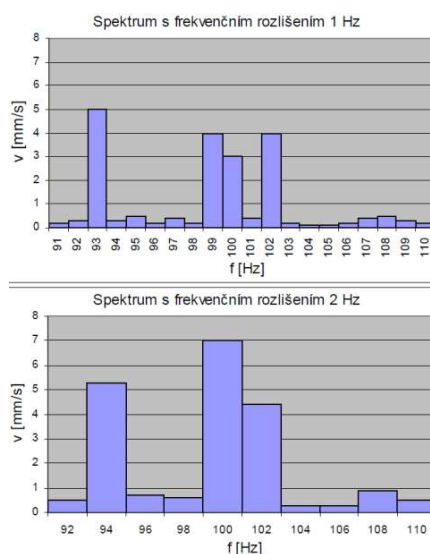
Pro správné vyhodnocení dat z FFT je nutné nastavit správné parametry k FFT. V této kapitole se zabývám parametry FFT analyzátoru, které je možno uživatelem nastavit. Jedná se o:

- frekvenční rozsah
- počet spektrálních čar
- typ průměrování
- počet průměrování
- míra překrytí
- typ spouště

Volba frekvenčního rozsahu byla popsána v kapitole 2.4.2. a proto se jí nadále zabývat nebudu.

2.5.1. Počet spektrálních čar

Volbou počtu spektrálních čar uživatel nastavuje rozlišení FFT. To je závislé na maximální frekvenci a počtu čar. Pokud je maximální frekvence zvolena například 1000 Hz a počet čar je také 1000, FFT je vyhodnoceno po 1 Hz. Toto rozlišení má vliv na hodnotu amplitudy (viz graf č. 2-3). Z tohoto obrázku je patrné, že při menším počtu spektrálních čar nebudou správně zobrazené hodnoty na 101 Hz. Při rozhodování u nastavení počtu spektrálních čar musíme vzít v úvahu, jak blízké frekvence se ve spektru mohou vyskytovat. Při malém rozlišení mohou některé složky splynout do jedné a při jemném nastavení dostaneme velký objem dat, což má vliv na rychlost zpracování a velikost uložených dat.^{[12]. [1]}



Graf 2-3 vliv počtu spektrálních čar [1]



2.5.2. Počet a typ průměrování a míra překrytí

Při měření vibrací je doba sběru jednoho vzorku dána:^[17]

$$T_s = \frac{N_s}{f_{max}} \quad (2-18)$$

Kde: T_s = doba sběru dat jednoho měření (délka časového vzorku)

N_s = počet čar spektra FFT analyzátoru

f_{max} = frekvenční rozsah spektra

Vzhledem k tomu, že se v signálu při měření vibrací vyskytuje šum, je potřeba měření opakovat a zprůměrovat, abychom dostali spolehlivá data. Většinou se používá průměrování ve frekvenční oblasti. Toto průměrování funguje tak, že se průměrují výsledky z FFT transformace měřeného časového úseku. Typy průměrování jsou:^[17]

a) lineární – všechny měření mají stejnou váhu:

$$x_{avg} = \sqrt{\frac{\sum_i^n x_i^2}{n_{avg}}} \quad (2-19)$$

kde: x_{avg} = průměrná hodnota výchylky signálu

x_i = okamžitá výchylka signálu

n_{avg} = nastavený počet průměrů

b) exponenciální – čím je měření novější, tím má větší váhu:

$$x_{avg} = x_{avg-1} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta t}{T_s}\right) + \frac{2 \cdot \Delta t}{T_s} \cdot x_i \quad (2-20)$$

Kde: x_{avg-1} = poslední průměrovaná hodnota signálu z celkových n_{avg}

Δt = časový interval mezi jednotlivými průměry x_{avg} a x_{avg-1}

c) s držetím špičky – neprůměruje se, ale uchovává se maximální hodnota na spektrální čáře.

Dalším parametrem je nastavení počtu průměrů. To má vliv na potlačení šumu (viz obr. č. 2-20), ale prodlužuje se tím délka měření. Obvykle se volí 10 průměrů, ale je vhodné postupovat tak, že se nastaví větší počet průměrů a sleduje se, od kdy je spektrum stabilní. U některých analyzátorů je možné nastavit, zda bude průměrování:

a) s konečným počtem průměrů – měření je ukončeno po získání nastaveného počtu průměrů

b) průběžné – měření běží stále, ale starší měření se nahrazují novějšími



Obrázek 2-20 Vliv počtu průměrů na šum [17]

Při průměrování se zvyšuje doba měření úměrně k počtu vzorků. Aby se doba měření zkrátila, je možné nastavit tzv. překrytí (OVERLAP). Jedná se o metodu, kterou jsou měřeny vzorky časového signálu. Překrytí znamená, že po zpracování FFT se nebere úplně nový signál, ale zahrne se i část předchozího signálu (ukázka na obr. č. 2-21). Na tomto obrázku je slabou čarou znázorněn skutečný signál, modrou čárkovanou čarou je Hanningovo okno a červenou čarou je signál vstupující do FFT. Horní část obrázku je měření bez překrytí, spodní část je měření s překrytím 50%:[1]

Doba sběru dat s překrytím:[17]

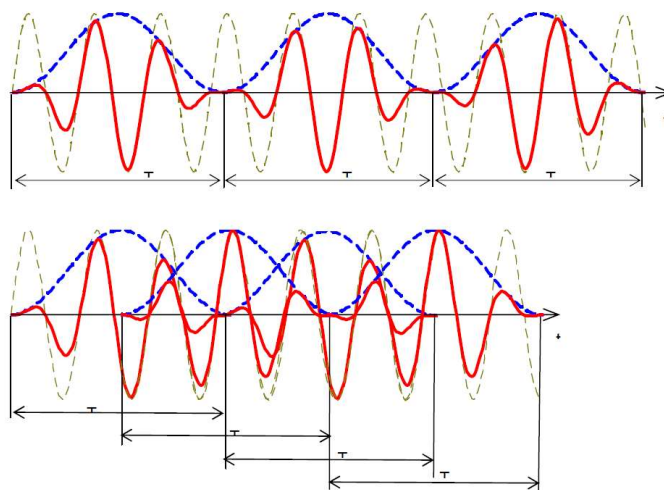
$$T_{avg} = T_s + (N_{avg} - 1) \cdot (1 - k_0) \cdot T_s \quad (2-21)$$

Kde: T_{avg} = celková doba sběru dat časových vzorků [s]

T = doba sběru dat jednoho časového vzorku [s]

N_{avg} = počet průměrů

k_0 = velikost překrytí



Obrázek 2-21 Průměrování bez překrytí (horní část) s překrytím 50 % (spodní část) [1]



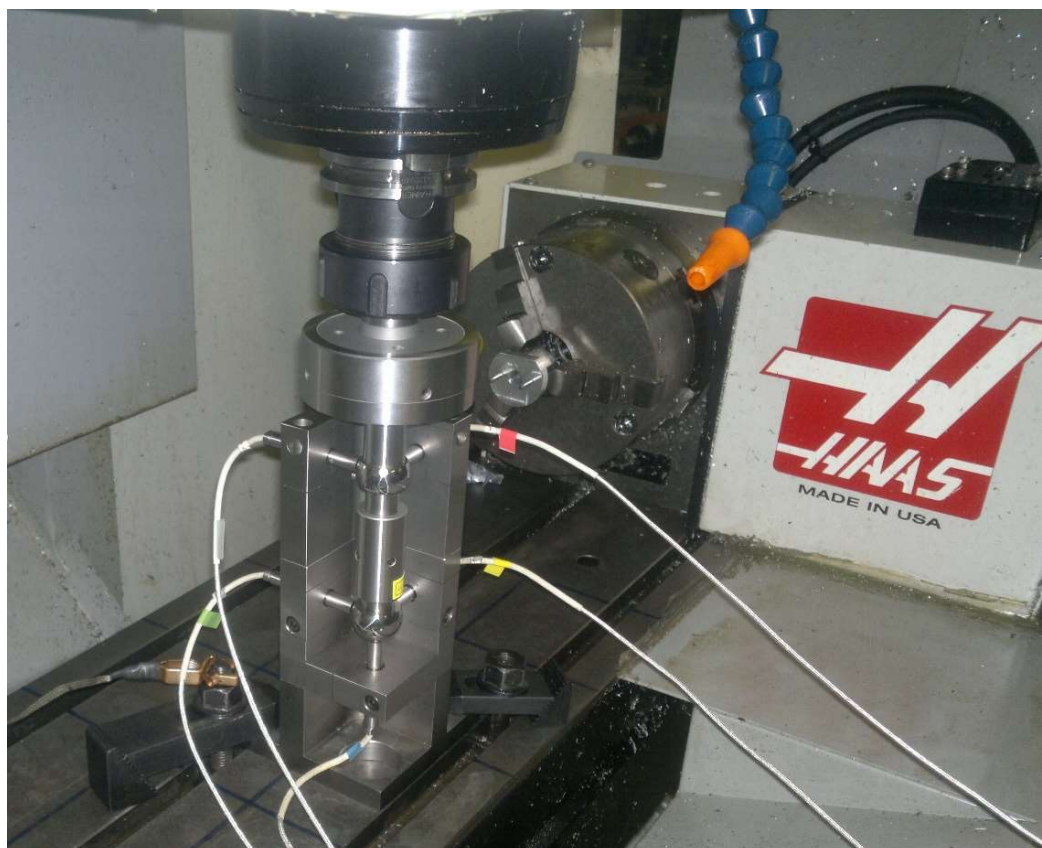
2.6. Použité Měřicí metody a vyhodnocení měření dle norem

V této podkapitole se budu věnovat vyhodnocení měření dle norem pro měření na vřetenech.

2.6.1. Měření přesnosti chodu vřetene za rotace

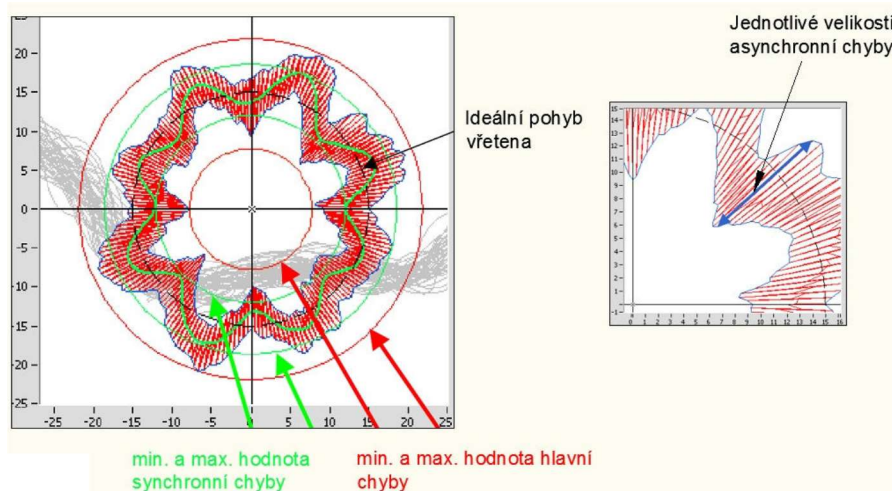
Měřením přesnosti chodu vřetena za rotace se zabývá norma ISO 230-7. Příklad měření je vyznačen na obr. č. 2-22. Na tomto obrázku je příklad laboratorního měření přesnosti chodu vřetena za rotace s aparaturou firmy Lion Precision . Do vřetena obráběcího stroje se upne přesný trn, který má na konci kuličku s přesností do 80 nm. Celkem pět bezkontaktních snímačů výchylky je připevněno v přípravku po dvou, pootočené o 90° ve dvou řadách. Poslední snímač je v axiálním směru. Měření se provádí v celém otáčkovém spektru vřetena. Nejméně však musí být měření provedeno pro tři rychlosti otáčení vřetena ^[18]

- 1) 10% maximální rychlosti vřetena
- 2) 50% maximální rychlosti vřetena
- 3) 100% maximální rychlosti vřetena



Obrázek 2-22 Měření přesnosti chodu za rotace lab. úloha

Při měření dostaneme celkovou chybu házení vřetena. Tato chyba je složená ze dvou částí. Jedná se o chybu synchronní a chybu asynchronní. Tyto chyby se zpravidla zobrazují v polárních souřadnicích (obr. č. 2-23).^[19]



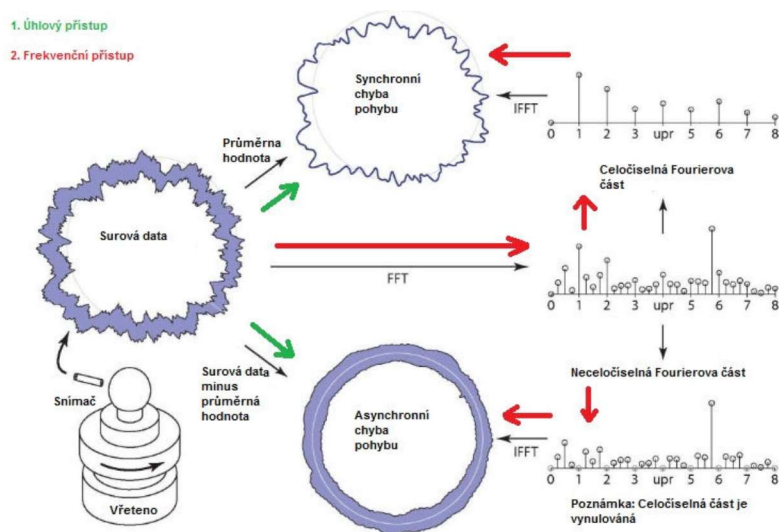
Obrázek 2-23 Synchronní a asynchronní chyba v polárních souřadnicích [19]

Synchronní chyba je definována jako celočíselný násobek základní frekvence vřetena. Bylo zjištěno, že tato chyba má velký vliv na geometrickou odchylku obrobku. Vznik této chyby je zapříčiněn zejména opotřebením ložisek vibracemi vřetena a vibracemi stroje.

Asynchronní chyba není na rozdíl od chyby synchronní přímo závislá na frekvenci otáčení vřetena. Původce této chyby se definuje hůře než u chyby synchronní. Naopak stanovení velikosti této chyby bývá jednodušší. Jedním ze zdrojů této chyby je teplotní deformace, nebo nesouosost ložisek. Tato chyba ovlivňuje jakost obrobených ploch.

Velký důraz se klade na rozdělení asynchronní a synchronní chyby od chyby celkové. K tomu lze využít dva základní principy separace. První princip je tzv. úhlový a druhý frekvenční, s využitím Fourierovy transformace.

První princip spočívá v tom, že množinu naměřených dat rozdělíme na rovnoměrně velké úhlové úseky natočení vřetena. Např. jednu otáčku vřetena rozdělíme na 200 dílů. Měření provedeme pro 10 otáček. Synchronní chybu pak zjistíme z průměru hodnot v každém kroku. Výsledný vektor pak bude mít délku $200 \cdot 10 = 2000$. Asynchronní chyba je poté zjištěna odečtením synchronní chyby od původní chyby. Obr. č. 2-24 zobrazuje princip separace obou metod.^[4]



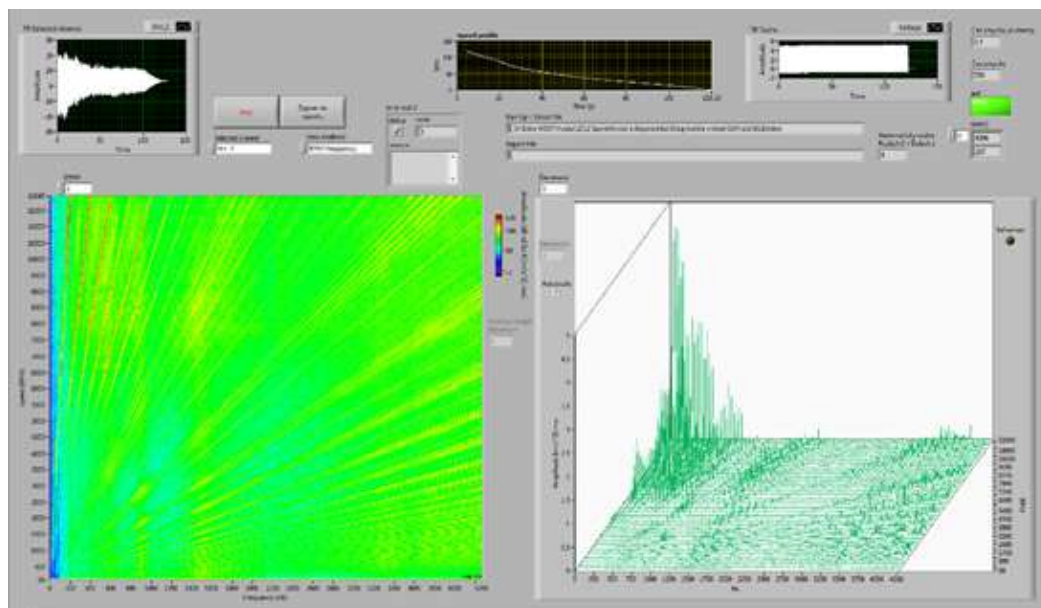
Obrázek 2-24 Metody separace synchronní a asynchronní chyby [4]

Druhý princip využívá princip převedení naměřených dat pomocí FFT (Fast Fourier transform = rychlá Fourierova transformace). Zpětnou Fourierovou transformací (anglická zkratka IFFT) získáme graf synchronní chyby pohybu. Podobný princip se využívá i pro stanovení asynchronní chyby pohybu. Místo s celočíselnými násobky (synchronní chyba) se počítá s násobky neceločíselnými (asynchronní chyba). Hodnotu synchronní chyby položíme rovnu nule, aby nebyla započtena do výsledku. Z těchto dat se pomocí IFFT získá graf asynchronní chyby pohybu (viz obr. č. 2-24).^[19]

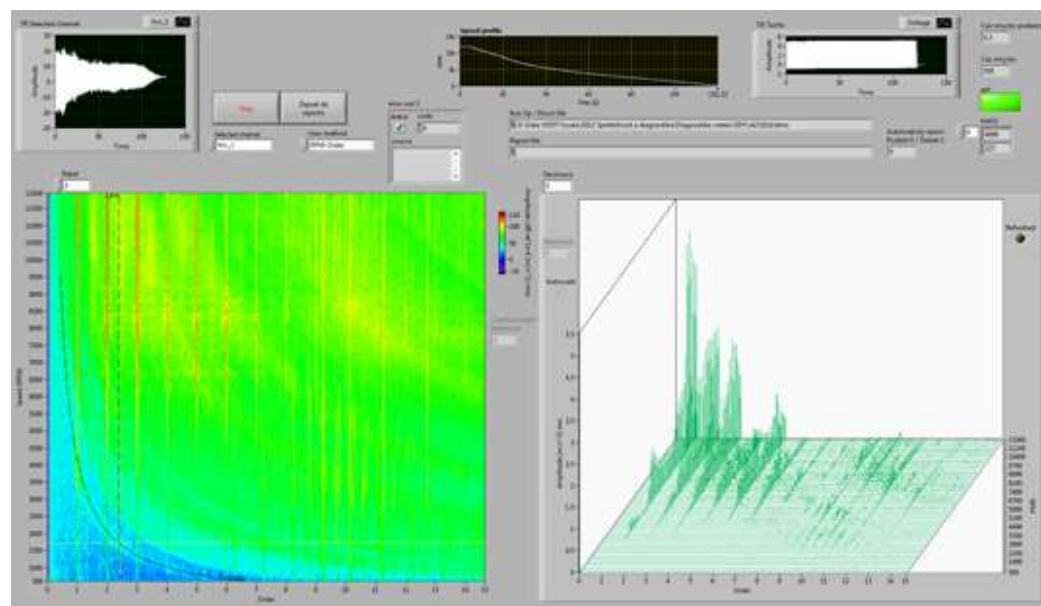
2.6.2. Rozběhové a doběhové testy

Princip metody spočívá v tom, že roztočíme vřeteno na maximální otáčky a poté ho necháme samovolně zastavit (bez brždění). Při změně otáček rotujících částí se mění amplitudy a frekvence dynamických sil. Pokud se rotující část aktuálně otáčí frekvencí rovnou vlastní frekvenci (či jeho celočíselnému násobku nebo podílu), dojde k lokálnímu zvýšení amplitudy a tím tuto frekvenci identifikujeme. Tato metoda se používá pro případy, kdy je dominantní dynamickou silou odstředivá síla. V tomto případě impulzní síla není dostatečně reprezentativní.

Výstup z měření je na obr. č. 2-25 a 2-26.



Obrázek 2-25 Doběhový test ve frekvenčním spektru



Obrázek 2-26 Doběhový test v řádovém spektru

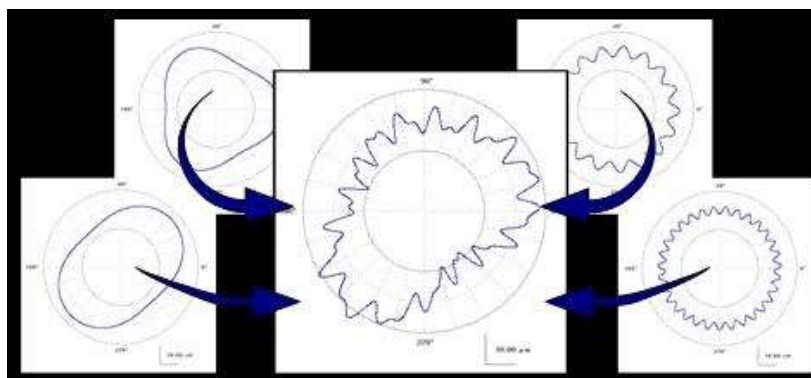
Na obr. č. 2-25 je doběhový test vřetena. Výsledkem toho testu je 3D graf (pravá dolní část obr.) znázorňující na ose X frekvenci, na ose Y otáčky vřetena a na ose Z je amplituda zrychlení. V levé části obrázku je stejný 3D graf zobrazený ve dvou osách. Třetí osa je znázorněna barevně.

Obr. 2-26 se od obrázku 2-25 liší v použité ose X. Na obr. č. 2-26 je použita jednotka ord. Jednotka ord, anglicky UPR (undulations per revolution), což lze přeložit

jako „zvlnění na otáčku“, je bezrozměrná jednotka udávající podíl mezi frekvencí a měřenými otáčkami:

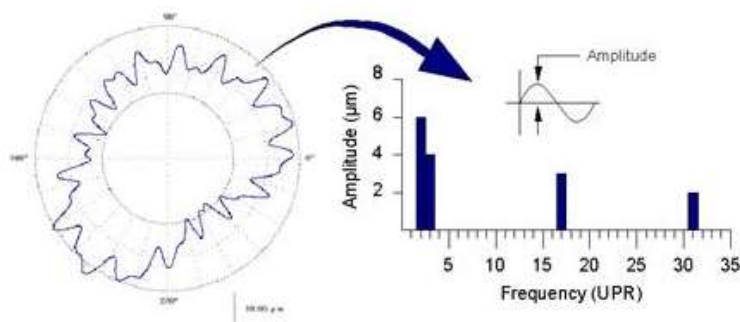
$$[ord] = \frac{[Hz]}{n_{ref}} \quad (2-22)$$

Názorné vysvětlení je na obrázku č. 2-27. Naměřené celková chyba se skládá z jednotlivých chyb. Na obr. č. 2-27 je složena ze čtyř chyb. První je na 2 ord (2 sin za otáčku), druhá chyba je 3 ord, třetí 17 ord a poslední je 31 ord. Součet těchto chyb je naměřená chyba. (na obr. je uprostřed)



Obrázek 2-27 Vysvětlení order jednotky [20]

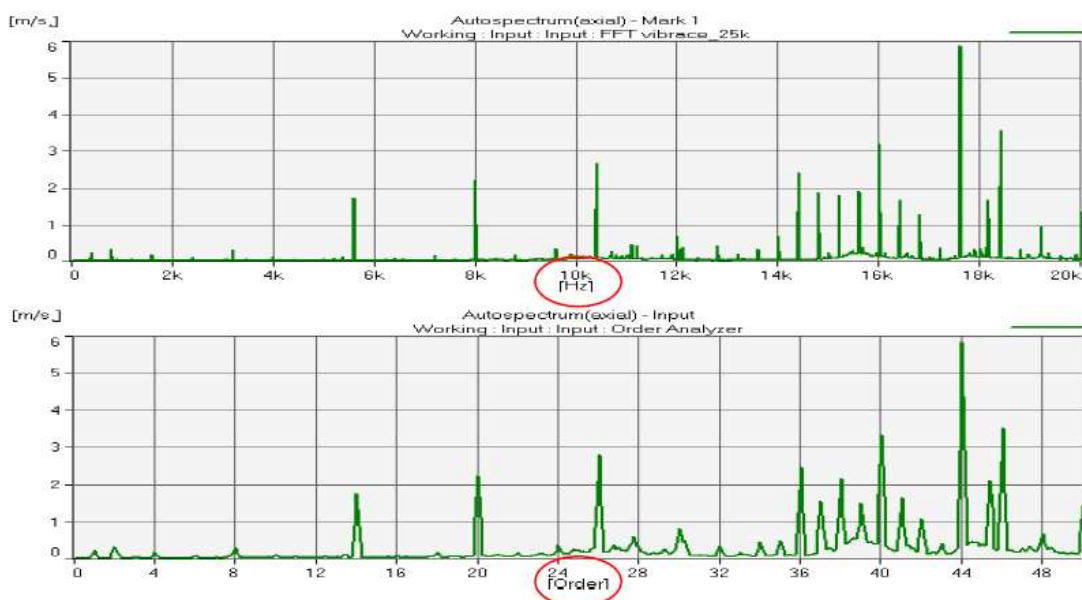
Při analyzování měření je nutné tuto celkovou chybu rozdělit na základní chyby. Tím nám vznikne graf znázorněný na obr. č. 2-28 [20]



Obrázek 2-28 Graf odr spektra [20]

Na obr. č. 2-29 je rozdíl mezi řádovým (order) spektrem a frekvenčním spektrem. Z grafu je vidět, že amplituda rychlosti vibrací je stejná. Rozdíl spočívá v tom, že první graf udává, jak velká rychlost vibrací je na jednotlivých frekvencích. Druhý graf pak znázorňuje, jak velké jsou chyby „zavlnění“ na jednu otáčku. Tím se snadněji identifikují

otáčkově závislé chyby. Aby bylo možné analyzovat měření v řádovém spektru, je nutné znát rychlost otáčení stroje (viz rovnice 2-22).



Obrázek 2-29 Rozdíl mezi odr a FFT spektrem [12]

2.6.3. Norma ČSN 20 0065

Tato norma se nazývá: „Obráběcí stroje na kovy. Metody měření a hodnocení mechanického kmitání. Mezní hodnoty kmitání“.^[21]

Norma stanovuje podmínky a způsoby měření a vyhodnocení průměrné hodnoty rychlosti a výchylky mechanického kmitání na určených místech při běhu naprázdno, které jsou vyvolány zdroji kmitání v samotném stroji a stanoví jejich mezní hodnoty, které nesmí být překročeny.

U obráběcích strojů s rotujícím nástrojem se na stroj upne malý vyvážený nástroj, nebo element nahrazující nástroj, který je vyvážen včetně spojovacích prvků s vřetenem.

Při měření kmitání jsou v činnosti všechny funkce stroje, které jsou nezbytné při obrábění.

Určení otáček vřetena:

$$q = \frac{n_{max} - n_{min}}{4} \quad (2-23)$$

q = rozdíl mezi dvěma sousedními otáčkami



n_{max} = nej větší otáčky vřetena

n_{min} = nejmenší otáčky vřetena

n_i = otáčky použité při měření kmitání

Měření se provede v těchto otáčkách:

$$n_1 = n_{max}, n_2 = n_{max} - q, n_3 = n_{max} - 2 \cdot q, n_4 = n_{max} - 3 \cdot q, n_5 = n_{max} - 4 \cdot q$$

Pro zajištění potřebné přesnosti změřených hodnot kmitání musí být zajištěno, aby vliv nežádoucích signálů nepřesáhl 20% přípustné mezní hodnoty $v_{e\,mez}$.^[17]

Před měřením se musí změřit velikost v_e , která udává velikost vibrací, které jsou na stroj přenášeny z okolí. Místo a směr měření je stejné jako při běhu naprázdno. Změřené hodnoty nesmí přesáhnout 30% mezní hodnoty při daném měření.

Každé měření se třikrát opakuje a za výsledek se vezme střední hodnota.

Pro měření Frézky konzolové, stolové, ložové, rovinné, portálové, kopírovací s vodorovnou nebo svislou osou vřetena, bez, nebo s číslicovým řízením norma udává:^[17]

- 1) místo měření: na vřeteníku v blízkosti předního ložiska ve směru svislém, čelním a bočním
- 2) podmínky měření: ve vřetenu jsou upnuty vyvážené frézovací nástroje, nebo jejich náhrady, posuvy jsou vypnuty, měření se provede pro již zmiňované otáčky
- 3) v předepsaných místech a směrech se měří efektivní hodnota (RMS) rychlosti a výchylky kmitání
- 4) stanovené hodnoty kmitání pro stroje s kuželovou dutinou ve vřetenu

Tabulka 2-1 Stanovení mezních hodnot kmitání pro frézky dle normy ČSN 20 0065 [21]

dutina		do 50 mm	nad 50 mm
mezní hodnoty	$v_{e\,mez} (mm \cdot s^{-1})$	1,12	18
	$s_{e\,mez} (\mu m)$	10	16



2.6.4. Norma ČSN ISO 10816-1, ČSN ISO 10816-3

Tyto normy se zabývají měřením vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.^{[22], [23]}

Norma ČSN ISO 10816-1 předepisuje rozdělení otáčivých strojů podle výkonu. Třída I jsou stroje do 15 kW. Třída II jsou stroje mezi 15-75 kW. Dále norma předepisuje, na jakých místech a jakými přístroji mají být prováděny testy. Norma také stanovuje mezní hodnoty pro vyhodnocení vibrací. Ty jsou v efektivní hodnotě vibrací (RMS) a porovnávají se s RMS 10 Hz – 1 kHz stroje. Tímto porovnáním norma přiřadí stroji určité pásmo.

Pásmo A: vibrace nových přejímaných strojů.

Pásmo B: stroje v tomto pásmu mohou být provozovány po neomezeně dlouhou dobu.

Pásmo C: stroje jsou považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý, trvalý provoz a měla by se provést oprava

Pásmo D: hodnoty v tomto pásmu mohou být považovány za tolik nebezpečné, že mohou vyvolat trvalé poškození stroje.

Tabulka 2-2 Hodnoty normy ČSN ISO 10816-1 pro stanovení stavu stroje [24]

	Třída stroje:	Třída I	Třída II	Třída III	Třída IV	
efektivní hodnota [mm/s]	do 0,28	A	A	A	A	
	do 0,45					
	do 0,71					
	do 1,12	B	B	B	A	
	do 1,8					
	do 2,8	C	C	B	B	
	do 4,5					
	do 7,1	D	D	C	C	
	do 11,2					
	do 18,0			D	D	D
	do 28,0					
	∞					

Upřesňující norma pro stroje nad 15 kW a mezi otáčkami 120 ot/min a 15000 ot/min je norma ČSN ISO 10816-3.^[23] Tato norma navíc zohledňuje možnost pružného uložení stroje. Tabulka č. 2-3 udává limitní parametry pro jednotlivá pásma.



Tabulka 2-3 Mezní hodnoty jednotlivých pásem normy ČSN ISO 10816-3

		od 300 kW do 50 MW		od 15 kW do 300 kW	
efektivní hodnota [mm/s]	Uložení stroje:	pružné	tuhé	pružné	tuhé
	do 1,4	A	A	A	A
	do 2,3		B	B	B
	do 2,8		C	C	C
	do 3,5	B	D	D	D
	do 4,5		D	D	D
	do 7,1	C	D	D	D
	do 11	D	D	D	D
	∞	D	D	D	D

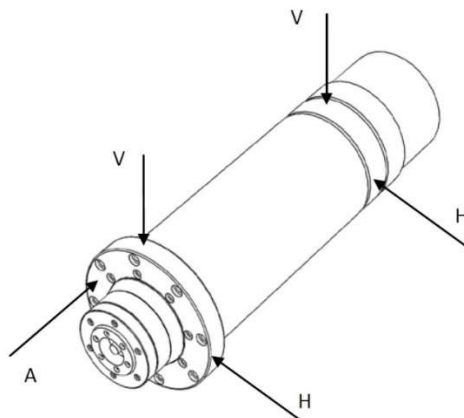
2.6.5. International standard NWIP-10

Je to návrh nové normy ISO, která není zatím schválena. Zabývá se vyhodnocováním kmitání vřeten obráběcích strojů měřených na nerotujících částech. Část 1 je pro rozsahy vřeten mezi 600 – 30 000 ot/min. [25]

Umístění senzorů navrhované touto normou je následovné (obr. č. 2-30):

- 1) na přední části vřetena umístíme jeden snímač v axiálním směru a dva v radiálním směru vzájemně pootočené o 90°, co nejbliže ložiskům
- 2) v zadní části vřetene umístíme dva snímače v radiálním směru, pootočení o 90°, co nejbliže ložiskům.

Měření probíhá při běhu stroje naprázdno.



Obrázek 2-30 Umístění snímačů na vřeteno dle NWIP-10



Postup vyhodnocení měření je stejný jako v normě ČSN ISO 10816-1. Pro vyhodnocení dle této normy je nutné měřit rychlost vibrací pro minimální frekvenci 5 kHz.

Norma také umožňuje pro vřetena s rychlostí otáčení větší než 6000 ot/min zadat dvě pásma otáček, ve kterých se nevyhodnocuje měření. Tato pásma nesmí mít součet otáček větší než 10% otáčkového spektra vřetena.

Tab. č. 2-4 udává mezní hodnoty RMS 5kHz pro vřetena s výkonem menším než 5 kW, podle kterých se následně stroj zařadí do určité třídy.

Tabulka 2-4 Vyhodnocení vibrací dle NWIP-10 pro stoje s menším výkonem než 5 kW [25]

		600 < ot/min ≤ 6000	6000 < ot/min ≤ 12000	12000 < ot/min ≤ 18000	18000 < ot/min ≤ 30000
efektivní hodnota [mm/s]	do 0,71	A	A	A	A
	do 1,1	B	B	B	B
	do 1,8	C	C	C	C
	∞	D	D	D	D

V tabulce č. 2-5 jsou mezní hodnoty pro vřetena s výkonem větším než 5 kW.

Tabulka 2-5 Vyhodnocení vibrací dle NWIP-10 pro stoje s větším výkonem než 5 kW [25]

		600 < ot/min ≤ 6000	6000 < ot/min ≤ 12000	12000 < ot/min ≤ 18000	18000 < ot/min ≤ 30000
efektivní hodnota [mm/s]	do 0,71	A	A	A	A
	do 1,4	B	B	B	B
	do 2,8	C	C	C	C
	∞	D	D	D	D



3. Sběr vstupních dat

Podle zadání práce musí být možno zpracovávat data z analyzátoru PULSE a ADASH. Před tvorbou aplikace bylo potřeba získat testovací data z přístroje ADASH VA4 a najít způsob, jakým je jednoduše importovat do aplikace. Z tohoto důvodu byl společností KOVOSVIT MAS zapůjčen přístroj ADASH VA4 a software DDS 2011. Během zapůjčení přístroje bylo změřeno několik strojů. Tato měření sloužila ke sběru dat a seznámení se s přístrojem. Z měření na těchto strojích nebyl vytvořen žádný protokol. Jedná se pouze o testovací data do aplikace na zpracování měření. Naměřená data naleznete v příloze na CD. Testovací data z analyzátoru PULSE jsem dostal z měření provedená pracovníky RCMT.



Obrázek 3-1 Přístroj ADASH VA4



3.1. Měření stolní bruska

Prvním měřeným přístrojem byla dvoukotoučová stolní bruska (obr. č. 3-2). Úkolem měření tohoto stroje bylo seznámení se s přístrojem a získání prvotních naměřených dat.

Dalším úkolem bylo zajistit jednoduchý import dat z analyzátoru ADASH VA4. Import dat z měření rozběhových testů přes software DDS 2011 formy ADASH nebyl možný. Jediný způsob importu dat byl možný až po aktualizaci firmwaru přístroje VA4 na verzi 0236. To bylo provedeno po domluvě s Ing. Karlem Šnajdrem z K-MAS a konzultaci s firmou ADASH. Přesný postup importu dat naleznete v kapitole 4.1.2.

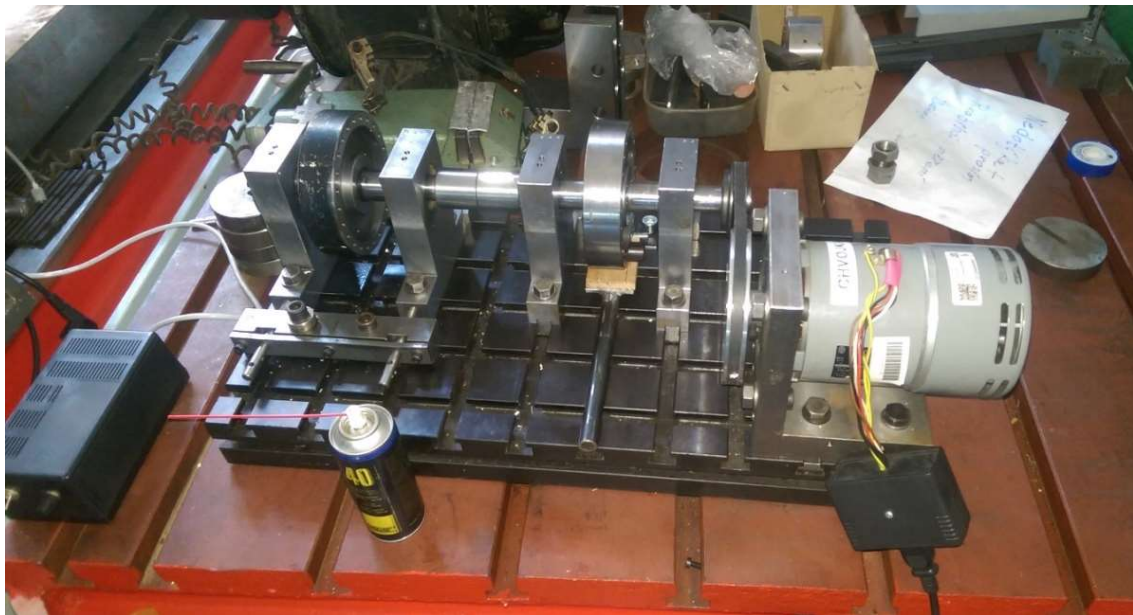


Obrázek 3-2 Měřená dvoukotoučová bruska



3.2. Měření školní stand „Myšiplaš“

Jedná se o laboratorní stand (viz obr. č. 3-3), na kterém je velká nevývaha. Nevývaha se při měření projevuje chybou na první otáčkové frekvenci. Naměřená data z tohoto stendu byla vhodná pro testování a vyladování části aplikace - nalezení otáčkových frekvencí (kapitola 4.2.3).



Obrázek 3-3 Měření na laboratorním stendu



3.3. Měření MCVL 1000

Jedná se o stroj společnosti KOVOSVIT MAS MCVL 1000 s vřetenem Kessler 42 000 ot/min. Měření bylo provedeno v rámci testování aplikace na reálném vřetenu frézovacího stroje.



Obrázek 3-4 Měření MCVL 1000 v laboratořích RCMT



4. Program na zpracování měření

Po zkušenosti se sběrem dat a na základě rozboru požadavků jsem pro automatizované vyhodnocení naměřených dat zvolil programovací jazyk VBA, který je součástí produktů MS Office (dostupný po zmáčknutí kláves ALT + F11). Tento programovací jazyk je vhodný z několika důvodů:

- a) dostupnost na PC s MS Office
- b) KOVOSVIT MAS nevlastní licence jazyku MATLAB
- c) jednoduchá tvorba grafického prostředí
- d) jednoduchá tvorba grafů
- e) možnost použití bez HW klíče.

Aplikace vyhodnocuje měření vibrační rozběhových / doběhových testů. Jako vstup slouží data z analyzátoru, která analyzátor zpracoval pomocí FFT. Program je navržen pro zpracování rychlosti vibrací, které vyhodnocuje pomocí norem:

- a) ČSN ISO 10816-1
- b) ČSN ISO 10816-3
- c) NWIP 10
- d) ČSN 20 0065
- e) vyhodnocení dle Berryho ^[28]

Měření je také možné uložit do databáze. Ta je vytvořena v programu MS Access.

Jako výstup z aplikace slouží protokol o měření a příloha ve formě grafů (obr. č. 4-1 a obr. č. 4-2). Grafy je možno zobrazit v základní verzi (3D graf, řez otáčkovou frekvencí, RMS) nebo jako rozšířené grafy (základní verze + řez frekvencí, řez otáčkami). Protokol i příloha jsou v tisknutelné oblasti a lze je snadno vytisknout nebo exportovat.



Měřil:	Samuel Petr
Datum měření:	27.5.2015
Protokol zpracoval:	Samuel Petr
Datum vypracování protokolu:	14.10.2015
Název protokolu:	Step-Tec
Číslo protokolu:	1
Typ stroje:	Frézka
Model stroje:	MCV 1000
Výrobní č. stroje:	14.0975
Typ vřeteníku:	elektrovřetenno
Výrobní č. vřeteníku:	6045,0018
Měření v ose:	X
Maximální otáčky stroje:	14999
Maximální měřená frekvence:	25600
Počet čar při měření:	6400

Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1:

Určení třídy stroje:	2
Hodnocení stroje:	A
Hodnota RMS:	0,11 [mm/s]

Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3:

Hodnota RMS:	0,11 [mm/s]
Hodnocení stroje:	A

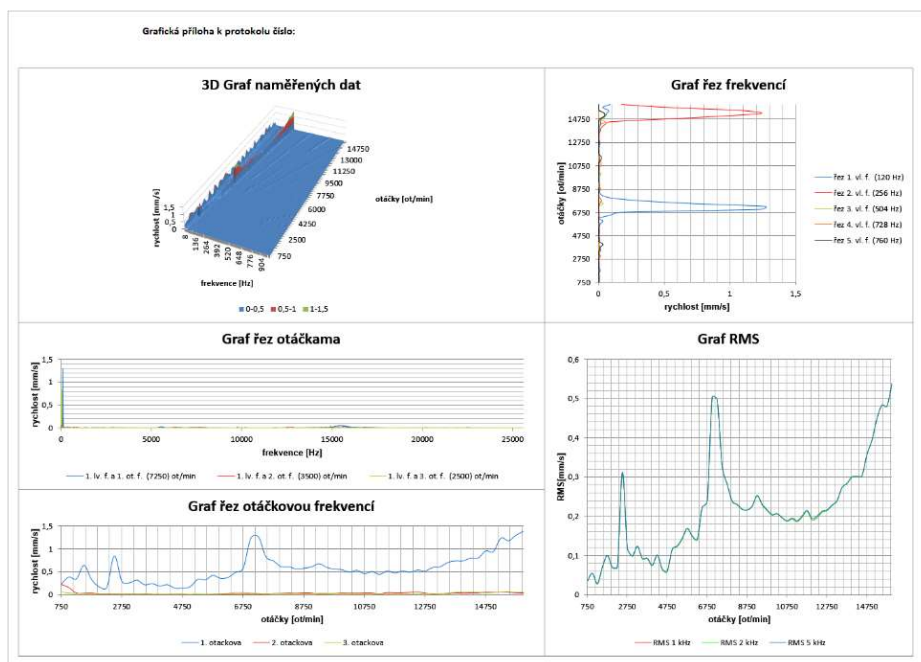
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10:

Hodnota RMS:	0,37 [mm/s]
Hodnocení stroje:	A

Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065:

Hodnocení stroje:	VYHOVUJE
Hodnota RMS:	0,05 [mm/s]

Obrázek 4-1 Protokol o měření

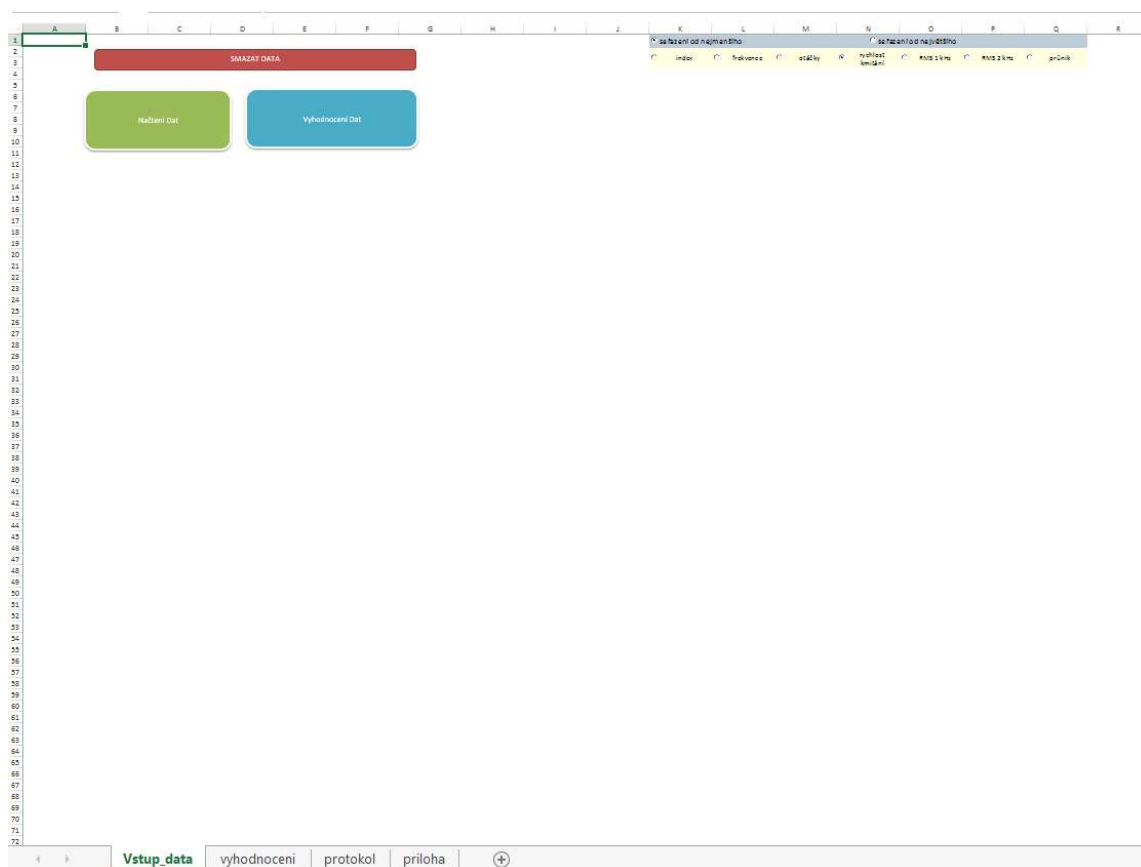


Obrázek 4-2 Příloha k měření - grafy



Jako grafické prostředí slouží program MS Excel, ve kterém uživatel nalezne ovládací prvky programu. Grafické prostředí programu Excel je využito k výstupu z programu a to ve formě textu (protokol, vyhodnocení dle norem) a grafů. Aplikace je pro přehlednost rozložena na více listech. Spouštění jednotlivých částí programu je realizováno pomocí tlačítek umístěných vždy v levém horním rohu. Po stisknutí tlačítka může uživatel měnit nastavení pomocí formulářů. Při návrzích formulářů byl kladen důraz na přehlednost a jednoduché a intuitivní ovládání. Pokud uživatel zadává do formuláře nějaké hodnoty, program kontroluje správnost vstupů tak, aby nenastala chyba.

Ve své práci jsem vyhodnocoval data z rychlosti vibrací, Navržený SW umožňuje zpracovat i data ze zrychlení, ale je třeba následně upravit jednotky v příslušných grafech a není relevantní vyhodnocení vibrací dle příslušných norem.



Obrázek 4-3 Ukázka prázdného programu (po spuštění) na zpracování měření



4.1. Instalace

Program je implementovaný ve skriptovacím jazyku VBA, který je součástí MS Office. Z tohoto balíčku je nezbytné mít nainstalovaný modul MS Excel a pro plnou funkčnost aplikace i MS Access. Aplikace funguje jako makro pro MS Excel, proto je nutné mít povolená makra. Makra je možné povolit dvěma způsoby:

- a) po spuštění aplikace vás Excel vyzve k povolení maker
- b) v nastavení programu Excel lze povolit makra trvale

Spuštění samotné aplikace provedete spuštěním sešitu Excel: "vyhodnoceni.xmls" (naleznete v příloze na CD).

4.1.1. *Memory Leak*

Jedná se o chybu v produktu MS Office, která způsobuje špatné promazávání paměti. Tato chyba se týká verzí MS Office 2010 a nižších. V aplikaci se chyba projevuje při práci s grafy. Pokud uživatel překresluje grafy, programovací jazyk VBA nemaže stará data, což má za následek vysoké nároky na operační paměť. Pokud uživatel používá MS Office 2010 a nižší, je nutné před vyčerpáním paměti program uložit, zavřít program Excel a znovu ho otevřít. Tím se uvolní operační paměť. Při nedodržení tohoto postupu hrozí pád aplikace.



4.2. Načtení vstupních dat

Pro zpracování naměřených dat je nutné tato data nejprve načíst do programu. Načtení dat je připraveno pro přístroje PULSE a ADASH. Vyhodnocují se spektrogramy rychlosti vibrací. Pro načtení dat je nutné v programu kliknout na tlačítko „Načtení Dat“ (viz obr. č. 4-3 zelené tlačítko) na listu Vstup_data. Poté uživatel dostane na výběr, jakým způsobem se data mají načíst (viz obr. č. 4-4).

Obrázek 4-4 Formulář pro výběr načtení dat do programu

4.2.1. Příprava dat z analyzátoru PULSE

Pro načtení dat z programu PULSE do programu na vyhodnocení dat je potřebná jejich příprava. Postup je následující:

- 1) otevřít program PULSE s měřením určeným ke zpracování
- 2) do aktivního 3D grafu (spektrogramu rychlosti vibrací) načíst měření určené ke zpracování
- 3) označit měření a zkopírovat data do schránky (pravým tlačítkem na myši kliknout na 3D graf a kliknout na položku „copy active curve“)
- 4) otevřít program Excel a do buňky A1 vložit data a uložit vytvořený Excel.

Vytvořený Excel s naměřenými daty (z PULSE) může obsahovat více listů. Program na vyhodnocení měření zpracovává vždy list, který je na prvním místě (příklad na obr. č. 4-5).

36	Function:	Autospect								
37										
38	InputRang	6,62E+03								
39										

Excel interface showing a sheet named 'y rychlost'. The status bar indicates 'PŘIPRAVEN'.

Obrázek 4-5 Excel s připravenými daty pro vyhodnocení měření (vyhodnocovat se budou data na listu „y rychlost“)



Pokud u formuláře výběru vstupu byla vybrána možnost vložení dat z PULSE, tak program zobrazí dialogové okno. Zde je potřeba zadat cílovou adresu souboru s připravenými daty z PULSE. Po označení souboru s daty začne samotné načítání dat (tento proces může trvat i minuty, v závislosti na velikosti dat a rychlosti PC).

Data z programu PULSE jsou v jednotkách m/s. Vzhledem k přehlednosti grafů a zvyklostem pracovat v jednotkách mm/s, je každá naměřená hodnota rychlosti kmitání vynásobena 1000.

Po překopírování naměřených hodnot se dále vytvoří tabulka s údaji o měření obsažených v programu PULSE (viz tab. č. 4-1.)

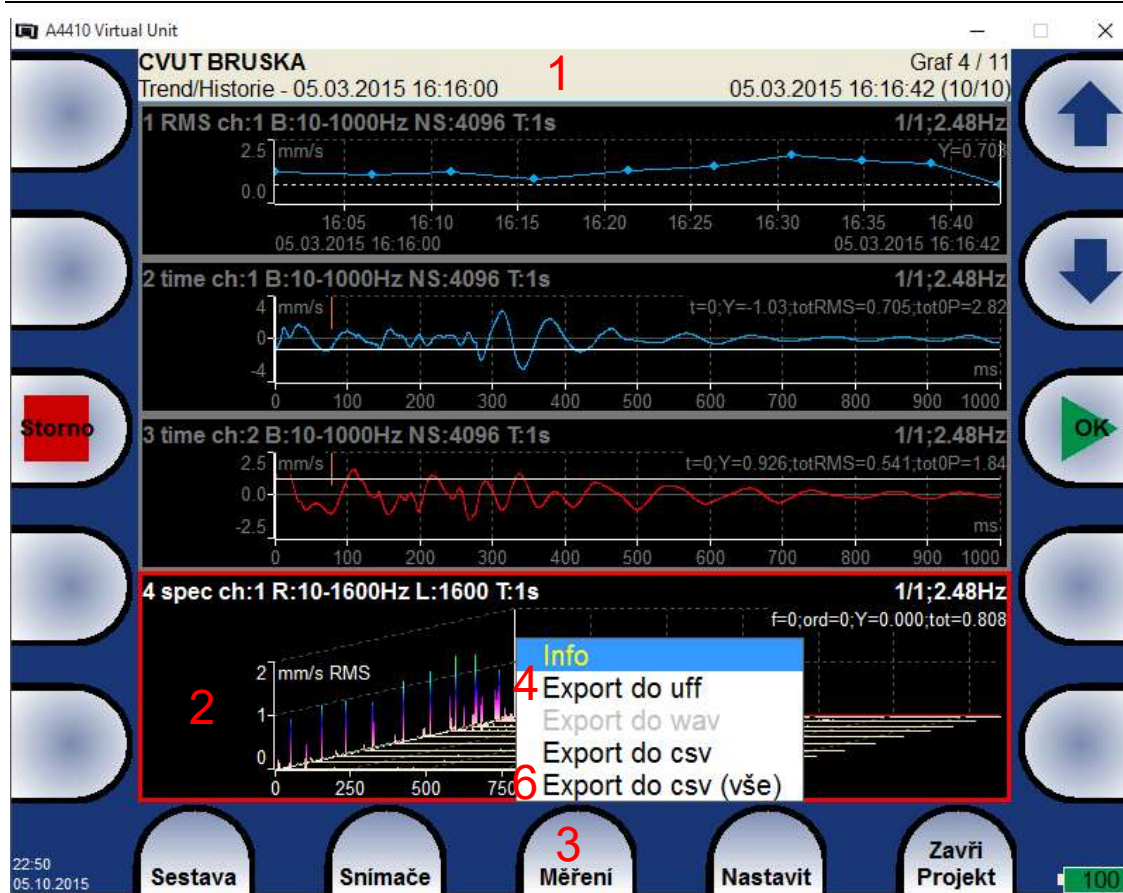
Tabulka 4-1 Hlavička o měření z přístroje PULSE

Signal:	<i>osa x</i>
SignalUnit:	<i>m/s²</i>
SpectralUnit:	<i>RMS</i>
jwWeighting:	<i>1/jw</i>
Date:	<i>42151</i>
Time:	<i>14:32:38:906</i>

4.2.2. Příprava dat z analyzátoru ADASH

Jediná možnost, jak exportovat data z přístroje VA4 firmy ADASH, je export přímo z přístroje přes formát .uff (potvrzeno firmou ADASH). Postup je následující (viz. obr. č. 4-6):

- 1) v přístroji ADASH VA4 otevřete měření, které chcete exportovat
- 2) kurzorem označte graf, z kterého chcete exportovat data
- 3) vyberte tlačítko „Měření“ (spodní panel uprostřed)
- 4) vyberte možnost exportovat do .uff.
- 5) potvrďte zvolením tlačítka „vše“ a zadejte název
- 6) opakujte bod 3 a vyberte export do .csv (vše)
- 7) zadejte název a potvrďte



Obrázek 4-6 Postup exportu dat z přístroje ADASH VA4

Data vytvořená výše zmíněným postupem naleznete v paměti přístroje ve složce na adrese:

- a) A4410_VirtualUnit_ver0236\VA4_DISC\uff\pojmenovany_soubor
- b) A4410_VirtualUnit_ver0236\VA4_DISC\csv\pojmenovany_soubor

Při vytváření exportu dat je možné využít „A4410 Virtual Unit“ ADASH volně dostupný na stránkách http://adash.cz/index_cz.php.

Pokud pro načítání dat do programu byla zvolena možnost AHASH (obr. č. 4-4), je třeba zadat pomocí dialogového okna:

- a) složku, kde jsou umístěny příslušné uff soubory,
- b) soubor s otáčkami ve složce csv.

Po vytvoření matice s naměřenými daty se vytvoří hlavička o měření pro přístroj VA4.



Tabulka 4-2 Hlavička o měření z přístroje ADASH

<i>měřeno přístrojem:</i>	<i>AHASH VA4</i>
<i>DEN:</i>	<i>15.5.27</i>
<i>ČAS:</i>	<i>14:29:20</i>
<i>MĚŘENÝ KANÁL:</i>	<i>ch:2</i>
<i>Jednotka signálu:</i>	<i>mm/s</i>
<i>Jednotka spektra:</i>	<i>RMS</i>

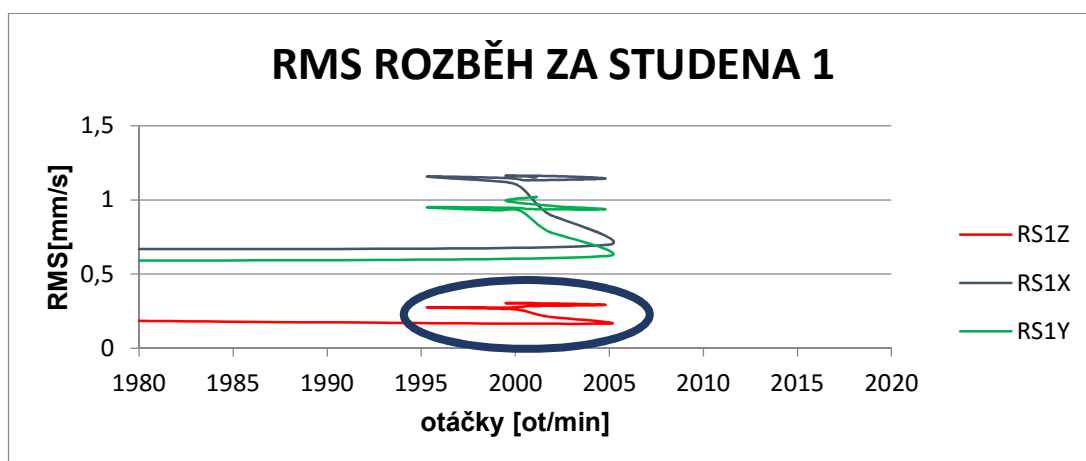
4.2.3. Společné dokončení načítání dat

Další postup při načítání a zpracování dat je již společný pro oba způsoby načítání vstupních dat. Program kontroluje, zda v načítajících se datech není chyba. To je důležité zejména pro vstup z přístroje PULSE. Ten totiž při určitých nastaveních přístroje vyplňuje některé hodnoty jako „Undefined“ (viz obr. č. 4-7)

61	62	63	64	65	66	67
42011	42011	42011	42011	42011	Undefined	Undefined
13:29:36:	13:29:36:	13:29:37:	13:29:37:	13:29:38:	Undefined	Undefined
30	30,501	31,002	31,502	32,001	Undefined	Undefined
248,659	217,534	200,321	160,263	135,731	Undefined	Undefined
Undefined	Undefined	Undefined	Undefined	Undefined	Undefined	Undefined
0,00088	0,00065	0,00119	0,00115	0,00083	Undefined	Undefined
0,00029	0,00024	0,00031	0,00029	0,00022	Undefined	Undefined
7,6E-05	6,5E-05	5,5E-05	4,7E-05	6E-05	Undefined	Undefined
2,5E-05	2,3E-05	1,6E-05	1,9E-05	2,3E-05	Undefined	Undefined
2,4E-05	1,9E-05	2,1E-05	1,6E-05	1,2E-05	Undefined	Undefined
2,1E-05	1,7E-05	1,4E-05	1,9E-05	1,4E-05	Undefined	Undefined

Obrázek 4-7 Příklad špatného vstupu dat z přístroje PULSE

Je třeba také zmínit, že při měření (zejména při rozběhu) může dojít k tomu, že konečná hodnota otáček osciluje kolem určité hodnoty. Tato data jsou pak redundantní a zkreslují výsledky měření, což je patrné z příloh ve formě grafů (viz příklad na grafu č. 4-1).



Graf 4-1 Příklad oscilujících otáček

Z tohoto důvodu je další funkcí mého programu smazání těchto dat. Tato funkce kontroluje, zda při maximálních dosažených otáčkách (při rozběhu), nebo minimálních otáčkách (při doběhu), je řada vzestupná (popřípadě sestupná). Pokud tomu tak není, jsou smazána všechna data za hodnotou alespoň 98% maximálních (či minimálních) otáček, které mají opačný trend.

Příkladem této funkce by byla úprava dat na grafu č. 4-1. Zde je při měření pravidelný přírůstek otáček do hodnoty 2005 ot/min. Poté byly změřeny nižší otáčky a to s hodnotou 2003 ot/min. Program by vyhodnotil, že se jedná o opačný trend a zkontroloval podmínku, zda již byla dosažena hodnota alespoň 98% maximálních otáček. Tato podmínka by byla také splněna, tudíž by program tato a všechna následující data smazal.

Program dále přepisuje všechny naměřené hodnoty do 10 Hz na hodnotu 0. Vzhledem k tomu, že přístroj ADASH tyto hodnoty nuluje automaticky, tak se tato funkce týká zejména přístroje PULSE.

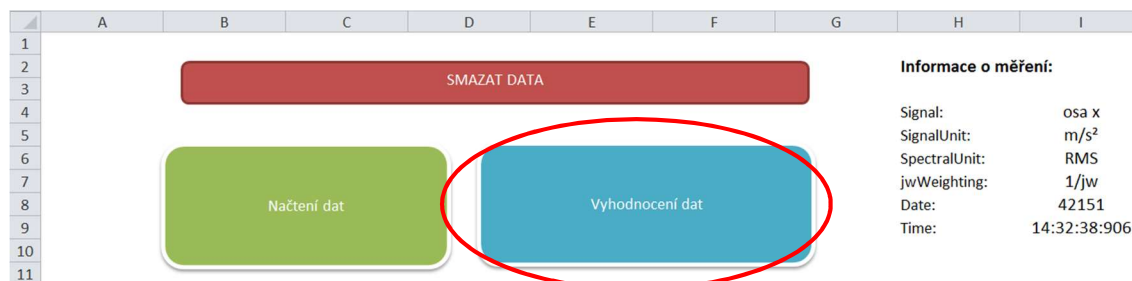
Na konci této fáze zpracování naměřených dat, program vytváří matici naměřených hodnot v logaritmickém přepočtu. Každá naměřená hodnota je přepočítána dle vzorečku $v_{log} = \log_{20} \left(\frac{v_{mer}}{10^{-8}} \right)$ který zajišťuje, že každá hodnota bude větší než 1 [27]. Tato matice dat se vytvoří na skrytém listu jménem „data_graf“.

Po načtení naměřených dat se automaticky volá procedura pro zpracování dat, kterou je ale možno spustit i ručně pomocí tlačítka „Vyhodnocení dat“. Této problematice se věnuje následující kapitola.



4.3. Zpracování dat

Tato část programu se zabývá přípravou dat pro následné vyhodnocení.



Obrázek 4-8 Obrázek tlačítek na listu *Vstup_data* s informacemi o měření

Pro vyhodnocení dat je potřeba kliknout na tlačítko „Vyhodnocení Dat“. Po každém otevření Excelu je nutné provést vyhodnocení dat.

4.3.1. Formuláře

Formulář zadání frekvence / otáček.

Jedná se o formulář (obr. č. 4-9), který uživateli umožňuje zvolit mezi automatickým zadáním frekvence nebo otáček. Změna parametrů u frekvence se projeví v tabulce (viz kapitola 4.3.5) a na grafu „řez frekvencí“ na listu „příloha“. Změna parametrů u otáček má vliv jen na graf „řez otáčkami“.

Pokud uživatel zvolí možnost „automatické zadání“, program sám vybere hodnoty, které bude dále zpracovávat. Automatický výběr hodnot je popsán v následujících kapitolách (4.3.2, 4.3.3).

Pokud je zvolena možnost zadání uživatelem, zviditelní se pole pěti hodnot, které je možné vyplnit. Pokud uživatel zadá hodnotu, která nebyla měřena, program najde nejbližší měřenou hodnotu. Pokud pole není vyplněno správně, u malých chyb (např. vyplněná hodnota není číslo) program sám zadá hodnoty. Při špatném vyplnění pole u frekvence je oprava nastavena na hodnotu 20Hz. Při špatném vyplnění hodnot v poli s otáčkami je oprava nastavena na hodnotu 0. Pokud uživatel vyplní hodnotu mimo rozsah měření, program ho na to upozorní a nechá uživatele hodnotu opravit.

Na konci formuláře se nachází tlačítko pro zobrazení pokročilého nastavení při zpracování dat.



Formulář zadání frekvence / otáček

způsob vyhodnocení frekvencí

Zvolte výběr frekvence auto / ruční

automatické zadání Zadání uživatelem

1. frekvence 2. frekvence 3. frekvence 4. frekvence 5. frekvence

pozn. V této nabídce je možno zvolit frekvence, které se využívají pro řezy frekvencí v grafech. Jedná se o rozšířené grafy v listu "příloha"

způsob vyhodnocení otáček

Zvolte výběr otáček auto / ruční

automatické zadání Zadání uživatelem

1. otáčky 2. otáčky 3. otáčky 4. otáčky 5. otáčky

pozn. V této nabídce je možno zvolit otáčky, které se využívají pro řezy otáček v grafech. Jedná se o rozšířené grafy v listu "příloha"

Volba pokročilého nastavení

Zobrazit pokročilé nastavení ANO

Zrušit Ok

Obrázek 4-9 Formulář pro zadání frekvence a otáček

Formulář rozšířená nastavení.

Pokud u formuláře pro zadání frekvence / otáček byla zvolena možnost zobrazení pokročilých nastavení, tak se po stisknutí tlačítka „Ok“ zobrazí nový formulář s rozšířeným nastavením (obr. č. 4-10).

V tomto formuláři je možné změnit tři parametry nastavení:

1) Výběr okna

Zde je možné nastavit typ okna, které bylo použito při měření. Změna typu okna má vliv na změnu koeficientu při výpočtu hodnoty RMS (Root Mean Square, efektivní hodnota). Seznam přednastavených oken k výběru a jejich koeficienty^[26] jsou:

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| a) Hanning | $koeficient = 1,5$ |
| b) Hamming | $koeficient = 1,3628$ |
| c) Flat Top | $koeficient = 3,8194$ |
| d) Gaussian Top | $koeficient = 2,215$ |



- e) Blackman-Harris $koeficient = 2,0044$
- f) Kaiser-Bessel $koeficient = 2,0013$
- g) Gaussian $koeficient = 2,0212$
- h) Žádné $koeficien \quad 1$

2) Určení tolerance otáčkové frekvence

Změnou této hodnoty se nastavuje tolerance při určení hodnot pro graf „řez otáčkovou frekvencí“.

Hodnota koeficientu musí být zadána jako celočíselná. Pokud zadaná hodnota není číslo, program vyzve uživatele k opravě vstupu. Pokud hodnota je číslo, ale není to celé číslo, potom program zadanou hodnotu zaokrouhlí. Více viz kapitola 4.3.3.

3) Koeficient u automatického hledání vlastních frekvencí (kapitola 4.3.2).

Tento koeficient nastavuje toleranci při hledání vlastních frekvencí. Hodnota musí být číslo, pokud tomu tak není, program uživatele vyzve k opravě.

Formulář rozšířená nastavení

výběr okna
vyberte které bylo použito okno při měření

Hanning Hamming Flat Top Gaussian Top
 Blackman-Harris Kaiser-Bessel Gaussian Žádné

určení tolerance otáčkové frekvence
Zadejte hodnotu tolerance
2

pozn. Tato hodnota nastavuje toleranci při určení hodnoty otáčkové frekvence. př. při hledání hodnoty 1. otáčkové frekvence pro 600 ot/min, se hledá největší hodnota na 10 Hz +- zadaná hodnota * frekvenční krok spektra

koeficient hledání důležitých frekvencí
Zadejte hodnotu koeficientu
1,2

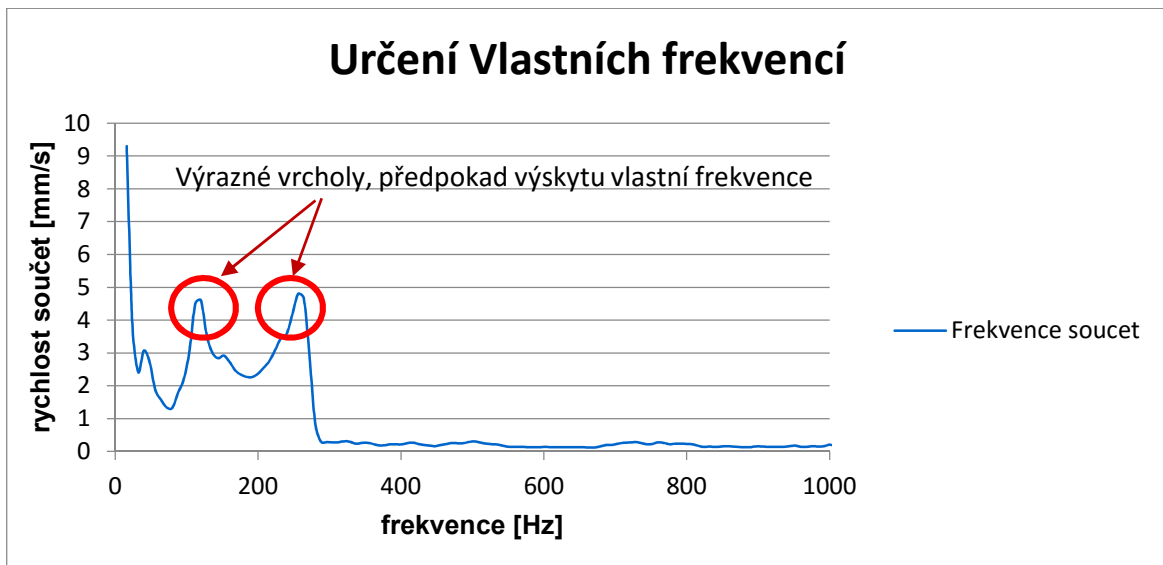
pozn. Tímto koeficientem lze změnit při automatickém určení frekvence výsledné hodnoty (doporučená hodnota je mezi 1.2 - 1.9). Více viz DP Samuel 2016

Ok

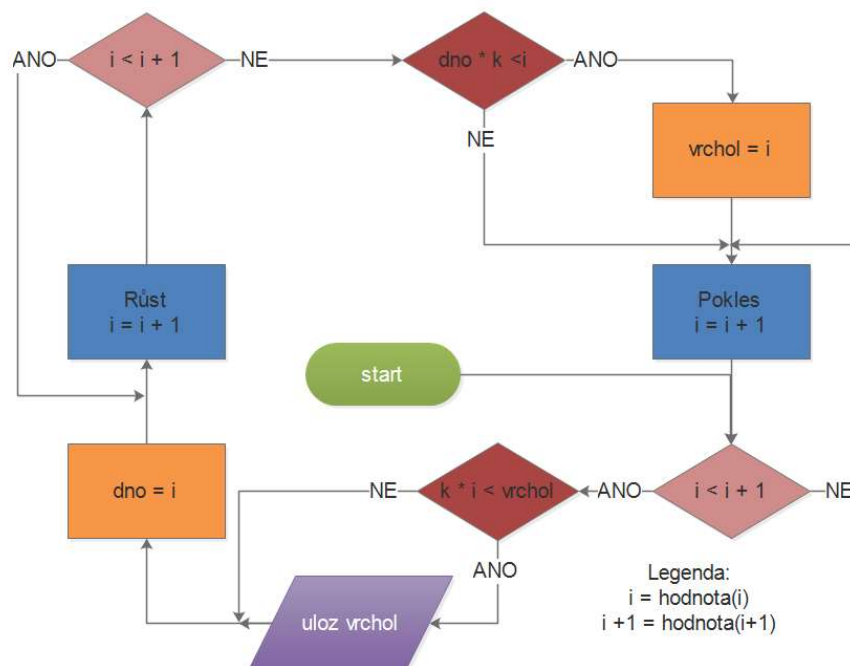
Obrázek 4-10 Formulář pro rozšířená nastavení

4.3.2. Algoritmus identifikace vlastních frekvencí

Pro určení vlastních frekvencí byl vytvořen algoritmus, který navrhuje uživateli prvních 5 výrazných hodnot. První částí tohoto algoritmu je součet hodnot na dané frekvenci. To znamená, že na každé měřené frekvenci je spočítána suma hodnot podle otáček, a tím je vytvořen nový sloupec hodnot pro dané frekvence. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu (viz kap. 4.3.6, graf č. 4-2). Předpoklad u těchto hodnot je, že pokud je zde výrazný vrchol, jedná se o vlastní frekvenci stroje.



Graf 4-2 Zobrazení součtu hodnot podle naměřených frekvencí



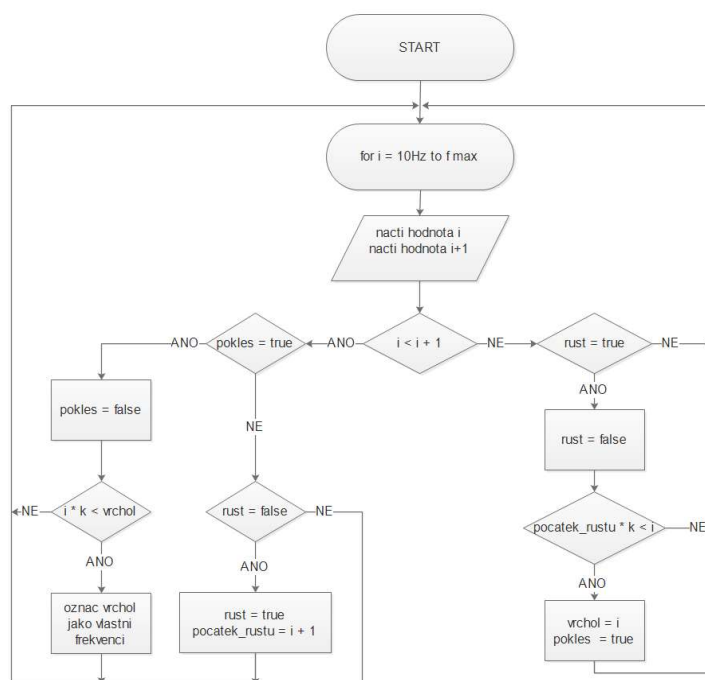
Obrázek 4-11 Zjednodušené schéma algoritmu hledání vlastních frekvencí

Druhá část tohoto algoritmu se zabývá analýzou vytvořených dat a určením vrcholů.

V cyklu procházíme postupně hodnoty i od 10 Hz (pokud hodnota není měřena, je začátek posunut na první hodnotu větší než 10 Hz) a konec je na maximální naměřené frekvenci. V každém kroku tohoto cyklu se můžeme nacházet v jednom ze dvou stavů:

- 1) růst (funkce mezi hodnotami i a $i+1$ rostoucí),
- 2) pokles (funkce mezi hodnotami i a $i+1$ klesající).

Pokud se mění průběh funkce z klesající na rostoucí v daném i , uložíme tento bod jako počátek růstu. Pokud se změní průběh funkce z rostoucí na klesající a zároveň přírůstek hodnoty mezi i a počátku růstu je dostatečně velký, uložíme tento vrchol jako potenciální vlastní frekvenci. Tuto frekvenci označíme jako dopočítanou vlastní frekvenci, pokud pokles mezi touto hodnotou a následujícím počátkem růstu je dostatečně velký. V algoritmu je nastaveno prvních pět vlastních frekvencí. Popis funkce programu je na obr. č. 4-11. Míra dostatečnosti růstu nebo poklesu je nastavitelná pomocí koeficientu k , který je v základu nastaven na hodnotu 1,2. Tento koeficient je multiplikativní, což v základním nastavení znamená, že vrchol musí být alespoň o 20% větší než sousední počátky růstu. Tento koeficient je možno dodatečně přenastavit v rozšířených možnostech při vyhodnocování dat. Vývojový diagram naimplementovaného kódu je na obr. č. 4-12.



Obrázek 4-12 Vývojový diagram naimplementovaného kódu pro hledání vlastních frekvencí



4.3.3. Výběr hodnot pro zobrazení otáčkové frekvence

Program hledá první, druhou a třetí otáčkovou frekvenci. Otáčková frekvence je použita v tabulce a v grafu. Hledání hodnot otáčkové frekvence a jejich násobků v naměřených datech je provedeno pomocí dvou metod:

- a) přiřazením každé naměřené frekvenci odpovídající hodnotu otáček.

Pro naměřené frekvence program spočítá odpovídající otáčky (podle násobku otáčkové frekvence) a k nim přiřadí nejbližší naměřené otáčky. Po nalezení sloupce s otáčkami (řádek je dán frekvencí) program vyhledá odpovídající hodnotu rychlosti vibrací. Tato metoda je použita při tvorbě tabulky hodnot (kapitola 4.3.5).

- b) přiřazením odpovídající hodnoty frekvence každé naměřené otáčky.

Ke každým naměřeným otáčkám program dopočítá hodnotu frekvence odpovídající násobku otáčkové frekvence. K této hodnotě přiřadí nejbližší naměřenou hodnotu frekvence. Poté vyhledá odpovídající hodnotu rychlosti vibrací. Tato metoda je použita při tvorbě grafu „řez otáčkovou frekvencí“ na listu „Priloha“.

4.3.4. Výpočet RMS

RMS (Root Mean Square) je efektivní hodnota vibrací. Ta se později používá pro vyhodnocení dle norem na listu „vyhodnocení“ a pro graf „RMS“ na listu „příloha“. Tato celková hodnota vibrací je počítána z jednotlivých spekter rychlosti vibrací dle níže uvedeného vztahu. Počítá se RMS ve frekvenčním rozsahu

- a) 10 Hz – 1 kHz
b) 10 Hz – 2 kHz
c) 10 Hz – 5 kHz

Pokud měřené frekvence byly menší než 2 kHz nebo 5 kHz, program spočítá RMS do maximální měřené frekvence.

$$\text{Výpočet RMS je dán vzorečkem: } RMS = \sqrt{\frac{\sum v^2}{ENBW}}$$

Kde v^2 je hodnota druhé mocniny rychlosti vibrací jednotlivých čar spektra, a $ENBW$ (effective noise bandwidth) je hodnota koeficientu nastaveného okna při měření (změna nastavení této hodnoty popsána v kapitole 4.3.1).



4.3.5. Tvorba tabulky pro rychlý přehled naměřených hodnot

Tabulka vybraných hodnot slouží jako přehled pro uživatele na vybraných frekvencích zadaných z formuláře pro zadání frekvencí / otáček. Tvorba tabulky je následující:

Ke každé zadané frekvenci se spočítá, při jaké hodnotě otáček dojde k průniku na první, druhé a třetí otáčkové frekvenci (např. pro hodnotu 256 Hz je hodnota otáček na druhé otáčkové frekvenci $n = 256 \cdot \frac{60}{2} = 7\,680 \text{ ot/min}$). K tomuto průniku je dále přiřazena hodnota kmitání. Na daných otáčkách pak hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz a 10 Hz – 2 kHz. V poslední řádce je popis, o jakou hodnotu frekvence a jakou otáčkovou frekvenci se jedná. Maximální počet řádků je 15 (5 x zadaná frekvence a ke každé 1, 2, 3 otáčková frekvence). Řádků může být méně, pokud měření na stroji nedosahovalo dostatečných otáček (např. pokud má stroj $n_{max} = 5000 \text{ ot/min}$ a vlastní frekvence je zadaná na 500 Hz). Tak průnik na první otáčkové frekvenci by byl $n = 60 \cdot 500 = 30\,000 \text{ ot/min}$. Tato hodnota nebyla měřena, proto řádek nebyl vytvořen. Každý řádek má v prvním sloupci index. Ten je dán pořadím, jakým měl být řádek vytvořen.

Tabulku je možné seřadit podle:

- a) indexu
- b) frekvence
- c) otáček
- d) rychlost kmitání
- e) RMS 1 kHz
- f) RMS 2 kHz
- g) průniku.

A to buď od nejmenší, nebo největší hodnoty.

Seřazení má vliv na graf „řez otáčkami“, pokud byla ve formuláři pro zadání frekvencí / otáček zvolena hodnota „automaticky“. V takovém případě se vyberou otáčky z prvních tří řádků. Kompletní tabulka je na obr. č. 4-13.



K		L		M		N		O		P		Q	
<input checked="" type="radio"/> seřazení od nejmenšího						<input type="radio"/> seřazení od největšího							
<input type="radio"/> index	<input type="radio"/> frekvence	<input type="radio"/> otáčky	<input checked="" type="radio"/> rychlost kmitání	<input type="radio"/> RMS 1 kHz	<input type="radio"/> RMS 2 kHz	<input type="radio"/> průnik							
index	frekvence	otáčky	rychlost kmitání	RMS 1 kHz	RMS 2 kHz	průnik							
1	120	7250	1,27	1,41	1,42	1. lv. f. a 1. ot. f.							
2	120	3500	0,02	0,26	0,28	1. lv. f. a 2. ot. f.							
3	120	2500	0	0,88	0,88	1. lv. f. a 3. ot. f.							
4	256	15250	1,24	1,27	1,28	2. lv. f. a 1. ot. f.							
5	256	7750	0,02	0,81	0,82	2. lv. f. a 2. ot. f.							
6	256	5000	0	0,33	0,35	2. lv. f. a 3. ot. f.							
8	504	15000	0,05	1,12	1,12	3. lv. f. a 2. ot. f.							
9	504	10000	0,02	0,58	1,11	3. lv. f. a 3. ot. f.							
12	728	14500	0,05	0,86	0,87	4. lv. f. a 3. ot. f.							
15	760	15250	0,04	1,27	1,28	5. lv. f. a 3. ot. f.							

Obrázek 4-13 Příklad vytvořené tabulky

4.3.6. Grafy pro určení frekvencí

V závěrečné části přípravy dat se vytvoří dva grafy (obr. č. 4-14). Tyto grafy jsou určeny uživateli, aby si v případě potřeby mohl ve formuláři pro zadání frekvencí / otáček vybrat frekvence, které požaduje dále zpracovávat.

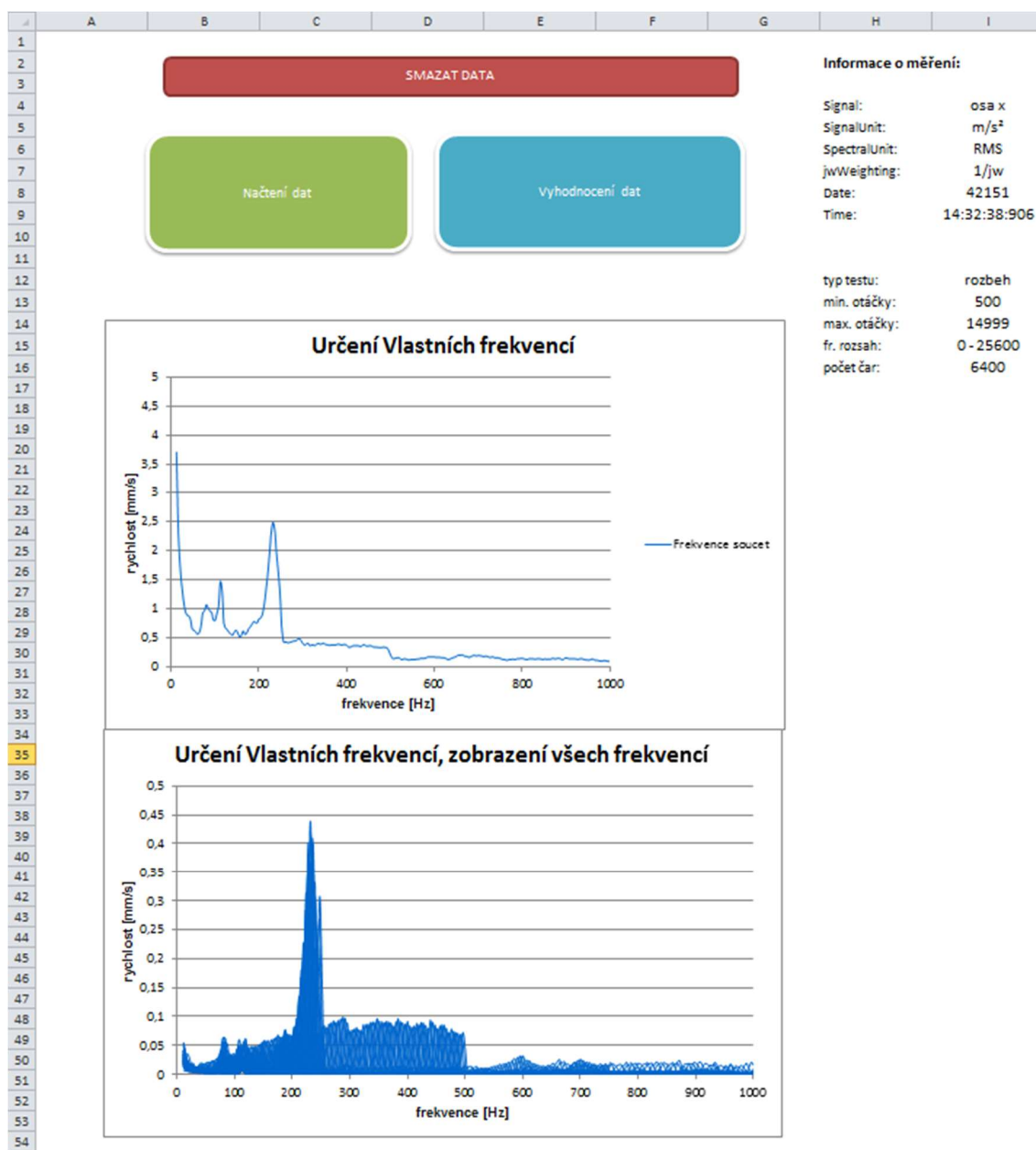
První graf (také graf na obr. č. 4-14) znázorňuje již popsany součet hodnot rychlosti vibrací pro jednotlivé frekvence. Osa Y tohoto grafu, „rychlost [mm/s]“, je v jednotkách mm/s, ovšem nemá žádný význam (je závislá na počtu měřených otáček). Osa X frekvence Hz je znázorněna jen do 1 kHz, ovšem může být ručně změněna až od maximální měřené frekvence.

Na druhém grafu „Určení Vlastních frekvencí, zobrazení všech frekvencí“ jsou zobrazeny frekvence podle naměřených otáček přes sebe. Pokud se na nějaké frekvenci zobrazené hodnoty hustě překrývají, jedná se o vlastní frekvenci. Na ose Y jsou naměřené hodnoty rychlosti kmitání v mm/s. Osa X je stejná jako v prvním grafu.

Na závěr se vytvoří druhá část tabulky s údaji o měření.

Tabulka 4-3 Druhá část tabulky s údaji o měření

typ testu:	rozběh
min. otáčky:	500
max. otáčky:	15000
r. rozsah:	0 - 25600
počet čar:	6400

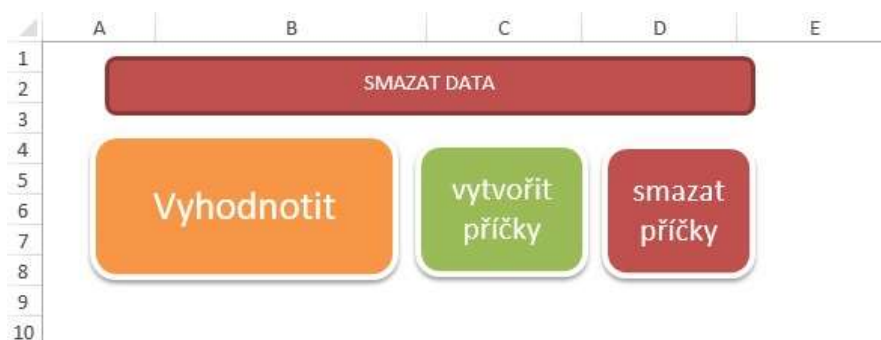


Obrázek 4-14 Zobrazení grafu a kompletní tabulky s informacemi o měření na listu vstup_data



4.4. Vyhodnocení měření

Vyhodnocení dat je na listu č. 2 jménem „vyhodnocení“. Vyhodnocení měření se provádí kliknutím na oranžové tlačítko „vyhodnotit“ (viz obr. č. 4-15). Zelené tlačítko „vytvořit příčky“ umožňuje vytvořit příčku sloupce „A“. Vytvoření příček je vhodné pro procházení vyhodnocení tabulky podle Berryho [25]. Tuto příčku je možné smazat červeným tlačítkem „smazat příčky“. Pro vyhodnocení měření je nutné mít nejdříve vyhodnocena data. Pokud tomu tak není, program nejdříve začne vyhodnocovat data. Program se přepne do listu „Vstup_data“ a zobrazí se formulář „zadání frekvence / otáček“. Po stisknutí tlačítka „Ok“ se vyhodnotí data (viz kapitola 4.3). Po úspěšném vyhodnocení dat se program přepne zpět do listu „vyhodnoceni“ a pokračuje dále formulářem pro vyhodnocení měření (obr. č. 4-16). Výsledkem listu „vyhodnoceni“ jsou vyhodnocená data dle norem **ČSN ISO 10816-1, ČSN ISO 10816-3, NWIP-10, ČSN 20 0065**. Poslední vyhodnocení je tabulka dle Jamese E. Berryho. Podrobnější popis je v následujících kapitolách.



Obrázek 4-15 ovládání vyhodnocení

4.4.1. Formulář

Po kliknutí na tlačítko „vyhodnotit“ se zobrazí formulář vyhodnocení měření. Tento formulář obsahuje parametry stroje, které je nutné určit pro správné vyhodnocení. Po nastavení parametrů stroje a potvrzení tlačítkem „Ok“ program pokračuje ve vyhodnocení měření dle výše uvedených norem. Pokud uživatel stiskne tlačítko „zrušit“, vyhodnocení se přeruší. Za předpokladu že uživatel bude chtít vyhodnocení opakovat například s jinými nastavenými parametry, musí znovu kliknout na tlačítko „vyhodnotit“. Ve formuláři budou nastaveny hodnoty z předchozího vyhodnocení.



Formulář vyhodnocení měření

Výkon vřetene
Určete výkon stroje

Do 5 kW Od 5 kW Do 15 kW Od 15 kW Do 75 kW Nad 75 kW

Uložení stroje
Vyberte typ uložení stroje

Dle doporučení výrobce Volné uložení Pružné uložení

Dutina vřetene
Vyberte průměr dutiny vřetene

Průměr dutiny do 50 mm Průměr dutiny nad 50 mm

Pásmo otáček pro NWIP-10
Vypříte pokud výrobce doporučuje neobrábět při určitých otáčkách

Pásmo 1 Pásmo 2

Od 0 ot/min Do 0 ot/min Od 0 ot/min Do 0 ot/min

pozn. Výrobce může doporučit dvě pásma otáček vřetena, v kterých by stroj neměl obrábět. Celkový součet těchto pásem nesmí přesáhnout 10% rozsahu otáček stroje. Pokud výrobce pásma nedoporučil, ponechte 0.

Vřetenová ložiska
Vybere typ ložisek použitá ve vřetenu

Ložisko s kosoúhlým stykem Kuželkové ložisko

Berry
Vyberte kritérium pro vyhodnocení podle Berryho

Motor Převodovka vstup Převodovka výstup

Dokončování Finišování Hrubování

Obrázek 4-16 Formulář vyhodnocení měření

Vzhledem k velikosti formuláře (na výšku) si program zjistí velikost otevřeného okna a přizpůsobí formulář. V případě nutnosti nastaví výšku okna pro srolování formuláře.

Popis formuláře bude z důvodu přehlednosti rozdělen do bloků, které jsou ohraničeny rámečkem ve formuláři.

Výkon vřetena: Zde se vybírá výkon měřeného vřetena a nastavuje se třída stroje pro jednotlivé normy. Tato volba ovlivňuje vyhodnocení dle norem: ČSN ISO 10816-1, ČSN ISO 10816-3 a NWIP-10.

Do 5kW	třída =0
Od 5kW do 15 kW	třída = 1
Od 15kW do 75 kW	třída = 2
Nad 75kW	třída = 3



Uložení stroje: Je důležité pro normy ČSN ISO 10816-3 a ČSN 20 0065. Podle uložení stroje se nastavují mezní hodnoty. U normy ČSN 20 0065 se výběrem nastavuje koeficient mezní hodnoty:

Dle doporučení výrobce	k= 1
Volné uložení	k=1,5
Pružné uložení	k=2

Dutina vřetena: Je důležitý parametr jen pro normu ČSN 20 0065. Tímto parametrem je určena mezní hodnota.

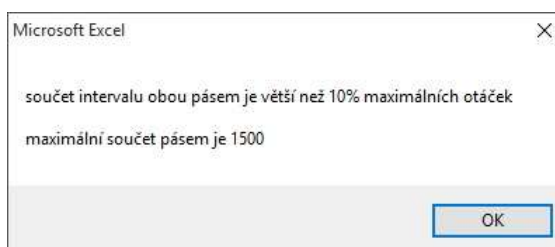
Průměr dutiny do 50 mm	mezní hodnota = 1,12
Průměr dutiny nad 50 mm	mezní hodnota = 1,8

Pásmo otáček pro NWIP-10: Norma NWIP-10 dovoluje uživateli nastavit pásmo otáček, ve kterých stroj nemá pracovat a z toho důvodu se nemá ani měřit. Vzhledem k tomu, že při rozběhových / doběhových testech stroje se otáčky měří v celém spektru, je možnost tuto volbu zadat ve formuláři. Možnost zadání otáček, které se nebudou vyhodnocovat, má několik omezení:

- maximální otáčky stroje musí být větší než 6 000 ot/min
- je možné zadat jen dvě pásma otáček
- součet hodnot obou pásem nesmí přesáhnout 10% z maximálních otáček.

Dodržení omezení a), b) je v programu nastaveno ve formuláři. Pokud maximální měřené otáčky jsou menší než 6 000 ot/min, pásma ve formuláři nejdou zadat. Pod polem se zadáním pásem je poznámka "*pozn. Zadání pásem, je možné jen pro stroje s maximálními otáčkami většími než 6000 ot/min*". Omezení b) je dáno možností zadat jen dvě pásma.

Omezení c) je kontrolováno při kontrole vstupu. Pokud uživatel zadá pásma s větší hodnotou součtu otáček než 10% maximálních otáček, je uživatel programem upozorněn (viz obr. č. 4-17) na chybné zadání a na nutnost opravy.



Obrázek 4-17 Varování uživatele na chybné zadání pásem otáček



Další kontroly vstupu jsou:

Kontrola na číslo: Program kontroluje, zda uživatel zadal do každého pole číslo. Pokud tato podmínka není splněna, program upraví hodnotu zadání na hodnotu 0.

Kontrola na minimální otáčky: Program kontroluje, zda nebyly zadány menší otáčky, než jsou minimální měřené otáčky. Pokud podmínka není splněna, uživatel je upozorněn na chybu (podobně jako na obr. č. 4-17) a vyzván k opravě.

Kontrola na maximální otáčky: Je stejná jako v případě s kontrolou na minimální otáčky.

Kontrola otočeného pole: Zde je kontrolováno, zda uživatel neotočil pořadí zadaných otáček. Pokud u pásma 1 je v poli *od* větší hodnota než v poli *Do*, program bez upozornění uživatele hodnoty pole otočí. Stejně je to i v pásmu 2. Následně je kontrolováno, zda hodnoty v pásmu 1 jsou menší než hodnoty v pásmu 2. Pokud ne, program hodnoty pásem otočí.

Kontrola na překrývání pásem: Program kontroluje, zda se zadané otáčky pásma 1 nepřekrývají s otáčkami v pásmu 2. Pokud se pásma překrývají, je uživatel (podobně jako na obr. č. 4-17) upozorněn a vyzván k opravě.

Vřetenová ložiska: Tato volba nastavuje koeficient mezní hodnoty 5. a 6. pásma u vyhodnocení dle Berryho.

Ložisko s kosoúhlým stykem $k_5 = 0,2$ $k_6 = 0,1$

Kuželíkové ložisko $k_5 = 0,3$ $k_6 = 0,15$

Berry: Volba tohoto kritéria je důležitá pro nastavení celkové hodnoty alarmu. Zvolená hodnota je kritériální hodnota pro určení stavu stroje podle jednotlivých pásem. Volba by měla být učiněna dle měřeného místa na stroji.

Motor: Hodnota dobrý = 2,54

Hodnota vyhovující = 4,445

Hodnota alarm = 6,35

Převodovka vstup: Hodnota dobrý = 3,81

Hodnota vyhovující = 5,715

Hodnota alarm = 8,89

Převodovka výstup: Hodnota dobrý = 2,286



	Hodnota vyhovující = 3,81
	Hodnota alarm =5,715
Hrubování:	Hodnota dobrý = 1,651
	Hodnota vyhovující = 2,54
	Hodnota alarm =3,81
Dokončování:	Hodnota dobrý = 1,016
	Hodnota vyhovující = 1,524
	Hodnota alarm =2,286
Finišování:	Hodnota dobrý = 0,635
	Hodnota vyhovující = 1,016
	Hodnota alarm =1,524

4.4.2. Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1

Vyhodnocení této normy probíhá podle největší hodnoty RMS 10 Hz – 1kHz.

Tato hodnota se porovnává s mezní hodnotou, která je určena normou a následným zařazením stroje do pásma stavu stroje, ve kterém se dle normy stroj nachází. Výběr mezní hodnoty je dán třídou stroje. Třída stroje se určuje dle výkonu stroje, tato hodnota je zadána ve formuláři pro vyhodnocení měření. Pokud při nastavení hodnot stroje byla dle programu zvolena třída 0 nebo třída 1, jedná se dle této normy o stroje spadající do třídy 1. Třída 2 a třída 3 jsou již ekvivalentní dle programu i dle normy. Tabulku mezních hodnot naleznete v rešerši.

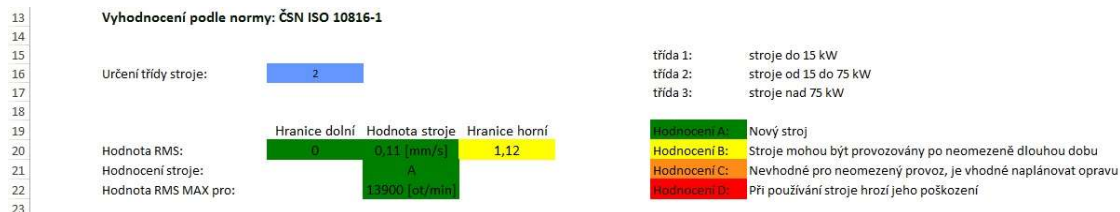
Určenou třídu stroje dle normy program vypíše do modrého okénka pod nadpisem normy. Na dalších řádcích je vyhodnocení dle normy.

Zařazení stroje do příslušného pásma program zobrazí ve sloupci *D*, na řádku 21.

Na řádku 20, ve sloupci *D*, je vypsána nejvyšší hodnota RMS 10Hz – 1kHz. Ve sloupci *C*, na řádku 20, je spodní hranice příslušného pásma. Ve sloupci *E*, na řádku 20, je horní hranice příslušného pásma. Tím dostane uživatel přehled, ve které části příslušného pásma se stroj nachází. Ve sloupci *C*, na řádku 22, jsou vypsány otáčky, při kterých se naměřila maximální hodnota RMS. Pro lepší čitelnost vyhodnocení jsou k jednotlivým pásmům přiřazeny barvy.



Pokud stroj spadá do pásma 1 – nový stroj, je přiřazená barva **zelená**. Pro pásmo 2 – stroj může být provozován po neomezeně dlouhou dobu, je přiřazená barva **žlutá**. Pásmu 3 – nevhodné pro neomezeně dlouhý provoz, je přidělena barva **oranžová**. Poslední pásmo 4 – při používání stroje hrozí jeho poškození, má barvu **červenou**. Vyhodnocení dle normy ČSN ISO 10816-1 je zobrazeno na obr. č. 4-18.



Obrázek 4-18 vyhodnocení normy ČSN ISO 10816-1

4.4.3. Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3

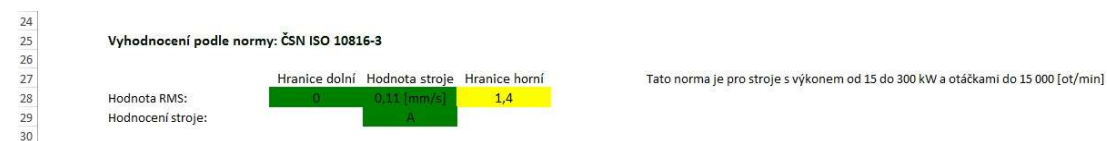
Hodnocení stroje dle této normy probíhá podle stejného principu jako u normy ČSN ISO 10816- 1. Pomocí této normy můžeme hodnotit stroje, které mají maximální otáčky menší než 15 000 ot/min. Dále stroj musí mít výkon větší než 15 kW (maximálně 300kW). Pokud některá z těchto podmínek není splněna, program dle této normy stroj nevyhodnotí (viz obr. č. 4-19)



Obrázek 4-19 Nesplněné podmínky pro normu ČSN ISO 10816-3

Norma bere v úvahu uložení stroje a rozlišuje mezi uložení předepsaným výrobcem a pružným uložení. Dle uložení se volí mezní hodnoty (viz rešerše), se kterými se porovnává maximální hodnota RMS 10Hz – 1 kHz.

Forma zpracování vyhodnocení v programu je stejná jako u normy ČSN ISO 10860- 1 (obr. č. 4-20)



Obrázek 4-20 Vyhodnocení dle normy ČSN ISO 10816-3



4.4.4. Vyhodnocení podle normy: NWIP – 10

Norma NWIP – 10 se vyhodnocuje podobným způsobem jako normy ČSN ISO 10816. Hodnota RMS 10Hz – 5kHz se porovná s mezními hodnotami, které určí stav měřeného stroje. Vyhodnocení pro tuto normu je možné jen u strojů s maximálními otáčkami do 30 000 ot/min (viz obr. č. 4-21).

32	Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10	
33		
34	Vřeten nesplňuje kritérium max. otáček	Tato norma je pro vřeten s otáčkami do 30 000 [ot/min]
35		
36		
37		

Obrázek 4-21 Nesplněná podmínka maximálních otáček pro NWIP – 10

Norma NWIP – 10 se od norem ČSN ISO 10816 liší v tabulce s mezními hodnotami a hodnotě RMS. Vzhledem k možnosti zadat otáčky, při kterých stroj nesmí pracovat (viz kap. 4.4.1), se hodnota RMS v těchto pásmech nevyhodnocuje.

Při výpočtu hodnoty RMS se nejprve spočte hodnota RMS 10Hz – 5 kHz. Pokud jsou zadána pásma otáček, spočítá se jejich hodnota RMS, která se od celkové hodnoty odečte.

Příklad: vyhodnocení otáček stroje pro rychlost 500 ot/min. Bylo zadáno 1 pásmo otáček, ve kterých stroj nesmí pracovat s hodnotami od 3 000 ot/min do 4 000 ot/min. Program nejprve spočte hodnotu RMS 10 Hz- 5kHz. Od této hodnoty odečte hodnotu RMS 50Hz – 67Hz pásma 1 ($3\,000 / 60 = 50$ Hz, $4\,000 / 60 = 67$ Hz).

Pokud byla při měření nastavena maximální frekvence menší než 5kHz, program vyhodnotí RMS pro maximální hodnotu měřené frekvence. Na řádku 41 se vypíše upozornění: "Vyhodnocení není validní. Není splněná hodnota RMS 5000 Hz - maximální hodnota RMS je: RMS 10 Hz – „maximální frekvence“ " (viz. obr. č. 4-22)

31					
32	Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10				
33					
34		Hranice dolní	Hodnota stroje	Hranice horní	Tato norma je pro vřeten s otáčkami do 30 000 [ot/min]
35	Hodnota RMS:	1,1	1,27 [mm/s]	1,8	
36	Hodnocení stroje:		C		
37	Hodnota RMS MAX pro:		15250 [ot/min]		
38	Pásmo 1	6500 [ot/min]		7250 [ot/min]	
39	Pásmo 2	15500 [ot/min]		16000 [ot/min]	
40					
41					Vyhodnocení není validní. Není splněná hodnota RMS 5000 Hz - maximální hodnota RMS je: RMS 10 Hz - 3200Hz

Obrázek 4-22 Upozornění na maximální hodnotu frekvence menší než 5kHz



Výběr mezních hodnot je závislý na třídě stroje. Pokud je třída stroje 0 (stroj do 5 kW), jsou voleny přísnější mezní hodnoty než u strojů nad 5 kW (tabulka mezních hodnot viz rešerše).

Program zobrazuje výsledky vyhodnocení dle NWIP – 10 stejným způsobem, jako v případě normy ČSN INSO 10816-1. Je dodrženo stejné grafické schéma. V případě, že uživatel zadal pásma otáček, tak se zadané hodnoty zobrazí pod řádkou vypisující otáčky největšího RMS (viz obr. č. 4-23).

Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10				Tato norma je pro vřetena s otáčkami do 30 000 [ot/min]	
	Hranice dolní	Hodnota stroje	Hranice horní		
Hodnota RMS:	0	0,57 [mm/s]	0,71		
Hodnocení stroje:		A			
Hodnota RMS MAX pro:		7250 [ot/min]			
Pásma 1	750 [ot/min]		1350 [ot/min]		
Pásma 2	15500 [ot/min]		16000 [ot/min]		

Obrázek 4-23 Kompletní vyhodnocení dle NWIP – 10

4.4.5. Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065

Tato norma posuzuje stroj pouze možnostmi „VYHOVĚL“ a „NEVYHOVĚL“ podle hodnoty RMS stroje a mezní hodnoty.

Mezní hodnota je stanovena pro frézovací vřetena podle průmětu dutiny vřetena (koeficienty viz 4.4.1) a dále podle uložení stroje. Mezní hodnota určená podle průměru dutiny vřetena je násobena koeficientem uložení stroje. Takto vypočtená mezní hodnota se zobrazí na řádku 47.

Hodnota RMS, která se porovnává s mezní hodnotou, je průměrná hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz na vybraných otáčkách. Nejde tedy o prosté srovnání vibrací pro jednu (např. aktuální) otáčky. Způsob výběru otáček je popsán v rešerši (č. kap. 2.6.3). Vybrané hodnoty RMS a jejich příslušné otáčky jsou uvedeny na listu „vyhodnocení“ řádek 45 a níže, v pravé části (viz obr. č. 4-24).

Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
		Otáčky	Hodnota RMS 1kHz
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE		
Hodnota RMS:	0,79 [mm/s]	16000	1,52
Mezní hodnota:	1,12 [mm/s]	13000	0,64
		10000	1,1
		6750	0,63
		3750	0,08
		Průměrné RMS:	0,79

Obrázek 4-24 Vyhodnocení dle normy ČSN 20 0065



4.4.6. Vyhodnocení podle Berryho

Vyhodnocení měření podle Berryho je převzato z literatury.^[28] Jedná se o vyhodnocení měření podle naměřených otáček. Data pro každé otáčky jsou rozdělena do 6 pásem podle frekvence. Každé pásmo vyhodnocuje specifické vlastnosti stroje.

- a) pásmo 1 – chyby na Sub-synchronních frekvencích
- b) pásmo 2 – chyby na 1. otáčkové frekvenci
- c) pásmo 3 – chyby na 1,5x – 2x otáčkové frekvenci
- d) pásmo 4 – chyby na 3. otáčkové frekvenci a chyby BSF (závada kuliček ložiska)
- e) pásmo 5 – chyby na BSF, BPFO, BPFI
- f) pásmo 6 – chyby na ložiskovém domku

Pásmo mají přesně definované hranice frekvence, které se pro každé otáčky mění. Hranice jednotlivých pásem na sebe navazují.

- | | |
|------------|---|
| a) pásmo 1 | spodní hranice = 0,3 násobek 1. otáčkové frekvence
horní hranice = 0,8 násobek 1. otáčkové frekvence |
| b) pásmo 2 | spodní hranice = 0,8 násobek 1. otáčkové frekvence
horní hranice = 1,2 násobek 1. otáčkové frekvence |
| c) pásmo 3 | spodní hranice = 1,2 násobek 1. otáčkové frekvence
horní hranice = 2,2 násobek 1. otáčkové frekvence |
| d) pásmo 4 | spodní hranice = 2,2 násobek 1. otáčkové frekvence
horní hranice = 3,8 násobek 1. otáčkové frekvence |
| e) pásmo 5 | spodní hranice = 3,8 násobek 1. otáčkové frekvence
horní hranice = 50 % maximální frekvence normy |
| f) pásmo 6 | spodní hranice = 50 % maximální frekvence normy
horní hranice = 100 % maximální frekvence normy |

Maximální frekvence je závislá na měřených otáčkách. Výpočet maximální frekvence:

- a) $n_s > 1700 \text{ ot/min} \gg F_{max} = 50 \cdot 1. \text{otáčková frekvence}$
- b) $n_s < 1700 \text{ ot/min} \gg F_{max} = 60 \cdot 1. \text{otáčková frekvence}$
- c) $n_s < 1400 \text{ ot/min} \gg F_{max} = 70 \cdot 1. \text{otáčková frekvence}$
- d) $n_s < 1100 \text{ ot/min} \gg F_{max} = 90 \cdot 1. \text{otáčková frekvence}$
- e) $n_s < 800 \text{ ot/min} \gg F_{max} = 100 \cdot 1. \text{otáčková frekvence}$

Pro každé pásmo se spočítá hodnota alarmu podle vzorečku (podobně jako výpočet RMS)



$$OA = \sqrt{\frac{\sum v^2}{ENBW}}$$

Hodnota OA (overall level of Spektrum or Band) se porovná s mezní hodnotou alarmu.

Mezní hodnota alarmu se vypočítá jednotlivě pro každé pásmo. Základem pro výpočet slouží hodnoty alarmu zvolené ve formuláři (viz kapitola 4.4.1) např. pokud byla vybrána hodnota „motor“, hodnoty jsou:

Motor:	Hodnota dobrý = 2,54
	Hodnota vyhovující = 4,445
	Hodnota alarm = 6,35

Toto jsou obecné hodnoty, které jsou následně přepočítány pro jednotlivá pásma. Každé pásmo má danou procentuální hodnotu pro přepočet. Pásma 5, 6 jsou dále závislá na volbě ložiska. Hodnoty pro přepočet:

- | | |
|------------|--|
| a) pásmo 1 | $OA \cdot 30 \%$ |
| b) pásmo 2 | $OA \cdot 60 \%$ |
| c) pásmo 3 | $OA \cdot 40 \%$ |
| d) pásmo 4 | $OA \cdot 40 \%$ |
| e) pásmo 5 | ložisko s kosoúhlým stykem $OA \cdot 20 \%$
kuželíkové ložisko $OA \cdot 30 \%$ |
| f) pásmo 6 | ložisko s kosoúhlým stykem $OA \cdot 10 \%$
kuželíkové ložisko $OA \cdot 15 \%$ |

Po přepočítání hodnot *dobry*, *vyhovující* a *alarm* pro jednotlivá pásma se tato hodnota porovná s vypočtenou hodnotou OA pro dané pásmo. Pokud hodnota OA je menší než hodnota *dobry* x procentuální hodnota pásma, stroj má v daném pásmu hodnocení **A** (hodnocení souhlasí s normami ČSN ISO 10816, NWIP-10, zobrazené zelenou barvou). Pokud je hodnota OA větší než hodnota *dobry* x procentuální hodnota pásma, a zároveň menší než hodnota *vyhovující* x procentuální hodnota pásma, je pásmo ohodnoceno jako **B** (žlutá barva). Pokud je hodnota OA mezi hodnotou *vyhovující* x procentuální hodnota pásma a hodnotou *alarm* x procentuální hodnota pásma, je pásmo ohodnoceno **C** (oranžová barva). Pokud hodnota OA přesahuje hodnotu *alarm* x procentuální hodnota pásma, stroj se nachází v pásmu **D** (červená barva).

Vyhodnocení podle Berryho začíná na řádce 60. Na tomto řádku jsou otáčky ot/min, které se vyhodnocují. Na řádce 61 je spočítaná první harmonická frekvence Hz



k příslušným otáčkám. Ve sloupci **A** a **B** jsou popisky jednotlivých řádků. Samotné vyhodnocení začíná sloupcem **C**. Ve sloupci **A** (u kterého je možné vytvořit příčku viz kap. 4.4) je označení příslušného pásma. Sloupec B popisuje hranice jednotlivých pásem Hz (bílá barva) a hodnotu AO (tyrkysová barva). Od sloupce **C** jsou již jednotlivá vyhodnocení. Výsledek je pro přehlednost zobrazen pouze barvou příslušné buňky, která znamená stav stroje (viz obr. č. 4-25).

60	otáčky		9250	9500	9750
61	1. otáčková frekvence		154,2	158,3	162,5
62					
63					
64		začátek pásma 1	46	48	49
65	pásma 1	CELKOVÝ ALARM	0,041	0,04	0,039
66		hranice pásma: 1 - 2	123	127	130
67	pásma 2	CELKOVÝ ALARM	0,027	0,02	0,014
68		hranice pásma: 2 - 3	185	190	195
69	pásma 3	CELKOVÝ ALARM	0,057	0,075	0,06
70		hranice pásma: 3 - 4	339	348	358
71	pásma 4	CELKOVÝ ALARM	0,021	0,021	0,023
72		hranice pásma: 4 - 5	586	602	618
73	pásma 5	CELKOVÝ ALARM	0,143	0,253	0,644
74		hranice pásma: 5 - 6	1600	1600	1600
75	pásma 6	CELKOVÝ ALARM	0,097	0,083	0,093
76		konec hranice pásma 6	3200	3200	3200

Obrázek 4-25 Vyhodnocení podle Berryho

Pod tabulkou s vyhodnoceným měřením začíná na řádku 81 tabulka s informacemi o dopočtených mezních hodnotách (obr. č. 4-26). Ve sloupci **C** jsou uvedené základní vybrané hodnoty alarmu. Na řádku 83 (šedý) je uveden koeficient pro jednotlivá pásma. Tímto koeficientem je násobena základní hodnota alarmu.

81	pásma:	pásma 1	pásma 2	pásma 3	pásma 4	pásma 5	pásma 6	
82	popis pásma:	subsynchroní	1. harmonická	2. harmonická	3. harm. a BSF	BSF, BPFO, BPF	ložiskové	
83	konstanta pro jednotlivé pásma:	0,3	0,6	0,4	0,4	0,2	0,1	
84								
85	hodnota dobrý	0,635	0,1905	0,381	0,254	0,254	0,127	0,0635
86	hodnota vyhovující	1,016	0,3048	0,6096	0,4064	0,4064	0,2032	0,1016
87	hodnota alarm 1	1,524	0,4572	0,9144	0,6096	0,6096	0,3048	0,1524

Obrázek 4-26 Tabulka mezních hodnot pro vyhodnocení podle Berryho



4.5. Tvorba protokolu

Na listu „protokol“ jsou dvě tlačítka. První tlačítko „smazat data“ smaže celý list. Druhé tlačítko „vytvořit protokol“ spouští tvorbu protokolu. Po stisknutí tohoto tlačítka se zobrazí formulář protokolu. Po vyplnění formuláře program vytvoří protokol o měření. Vytvořený protokol se nachází v tisknutelné oblasti (po stisknutí klávesy CTRL + P, je možno tisknout oblast protokolu).

4.5.1. Formulář protokolu

V tomto formuláři (obr. č. 4-27) se vyplňují údaje o měření, které se uvádějí v protokolu. Jedná se následující údaje:

- a) Měřil:
- b) Datum měření:
- c) Protokol Zpracoval:
- d) Datum vypracování protokolu:
- e) Název protokolu:
- f) Číslo protokolu:
- g) Typ stroje:
- h) Model stroje:
- i) Výrobní č. stroje:
- j) Typ vřeteníku:
- k) Výrobní č. vřeteníku:
- l) Měření v ose:

Pole s údaji o datu mají předvyplněný aktuální den (datum lze přepsat). Na konci formuláře je na žádost Ing. Petra Chvojky, Ph.D., pole „RMS poměrová hodnota“. Pro vyplnění tohoto pole je nutné nejprve přepnout tlačítko „NE“ na „ANO“. Poté se zobrazí pole pro vyplnění RMS poměrové hodnoty. U formuláře protokolu nejsou prováděny žádné kontroly, cokoliv uživatel zadá, vyplní se do protokolu.



Formulář protokol

Měřil:

Dne:

Protokol zpracoval:

Dne:

Název měření:

Číslo protokolu:

Typ stroje:

Model stroje:

Výrobní číslo stroje:

Typ vřetena:

Výrobní číslo vřetena:

Měřená osa:

RMS poměrová hodnota

Chcete zadat poměrovou hodnotu RMS ?

ANO NE

Zrušit Ok

Obrázek 4-27 Formulář protokolu

4.5.2. Protokol

Po stisknutí tlačítka „Ok“ ve formuláři se vytvoří protokol o měření. Protokol obsahuje údaje z formuláře doplněné o položky:

- Maximální otáčky stroje:
- Maximální měřená frekvence:
- Počet čar při měření:

Protokol dále obsahuje vyhodnocení dle norem:

U normy ČSN ISO 10816-1 je uvedeno:

- Třída stroje
- Hodnocení stroje
- Hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz

U normy ČSN ISO 10816-3 je uvedeno:

- Hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz
- Hodnocení stroje dle normy



U normy NWIP – 10 je uvedeno

- a) Hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz
- b) Hodnocení stroje dle normy

U normy ČSN 20 0065 je uvedeno

- a) Hodnocení stroje – vyhovuje / nevyhovuje
- b) Průměrná hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz počítaná dle normy

Vytvořený protokol je na obr. č. 4-28.

Měřil:	Samuel
Datum měření:	27.5.215
Protokol zpracoval:	Samuel
Datum vypracování protokolu:	15.12.2015
Název protokolu:	Step-Tec
Číslo protokolu:	1
Typ stroje:	frézka
Model stroje:	MCV 1000
Výrobní č. stroje:	16A10526
Typ vřetena:	vertikální
Výrobní č. vřetena:	6045,0018
Měření v ose:	X
Maximální otáčky stroje:	14999
Maximální měřená frekvence:	25600
Počet čar při měření:	6400

Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1:

Určení třídy stroje:	2
Hodnocení stroje:	A
Hodnota RMS:	0,45 [mm/s]

Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3:

Hodnota RMS:	0,45 [mm/s]
Hodnocení stroje:	A

Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10:

Hodnota RMS:	0,45 [mm/s]
Hodnocení stroje:	A

Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065:

Hodnocení stroje:	VYHOVUJE
Hodnota RMS:	0,14 [mm/s]

Obrázek 4-28 Vytvořený protokol



4.6. Příloha (Grafy)

Na listu „příloha“ se nachází příloha k protokolu ve formě grafů. Tato příloha je také v tisknutelné oblasti na formátu A4, nebo A3 (pro rozšířené grafy). Na listu jsou dvě tlačítka. První slouží k vymazání celého listu, druhé tlačítko je pro vytvoření grafů.

4.6.1. Formulář

Po stisknutí tlačítka „Vytvořit grafy“ se zobrazí formulář s výběrem grafů a jejich nastavením, obr. č. 4-29.

V prvním okně formuláře uživatel vybírá typ prvního grafu. Jedná se o 3D grafy naměřených dat v lineárních hodnotách (naměřená data), nebo v logaritmických hodnotách (přepočítaná data viz kap. 4.2.3). Je možné zvolit 2D graf, který znázorňuje otáčkovou a vlastní frekvenci. Jednotlivé grafy budou popsány v další kapitole.

Ve druhém okně „možnost rozšíření“ je uživateli poskytnuta volba vytvoření rozšířených grafů. V základním nastavení se vytvoří 3 grafy (obr. č. 4-29):

- a) 3D graf
- b) graf řez otáčkovou frekvencí
- c) graf RMS

Tyto grafy jsou v tisknutelné oblasti formátu A4.

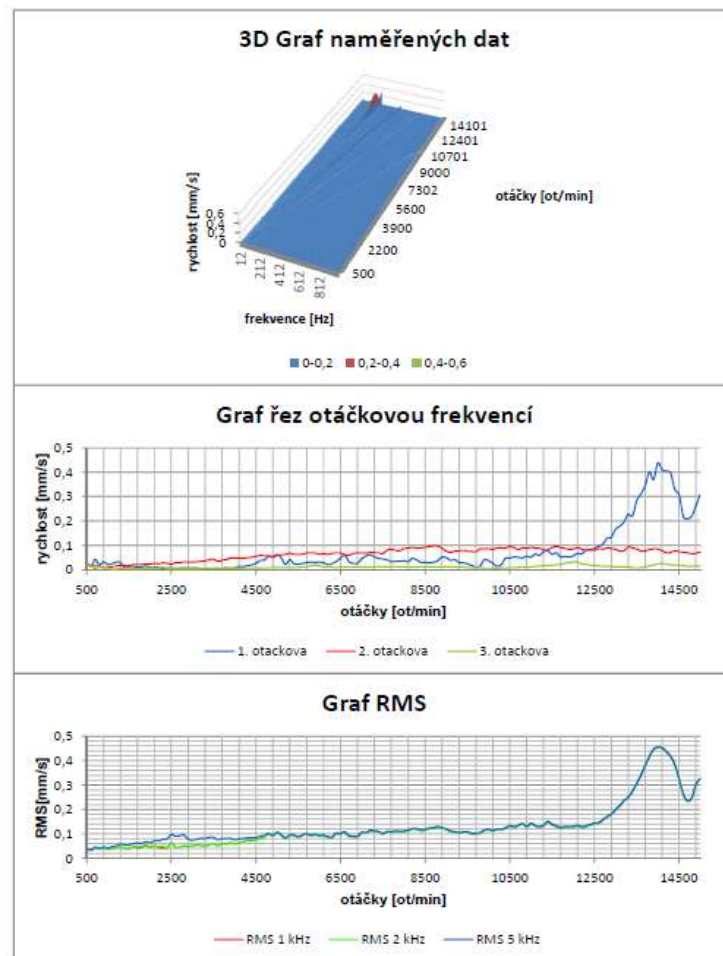
Pokud je zaškrtnuto políčko „ANO“ vytvoří se grafů pět (obr. č. 4-30)

- a) 3D graf
- b) graf řez frekvencí
- c) graf řez otáčkama
- d) graf řez otáčkovou frekvencí
- e) graf RMS

Tyto grafy jsou také v tisknutelné oblasti, ale na formátu A3 (na šířku).

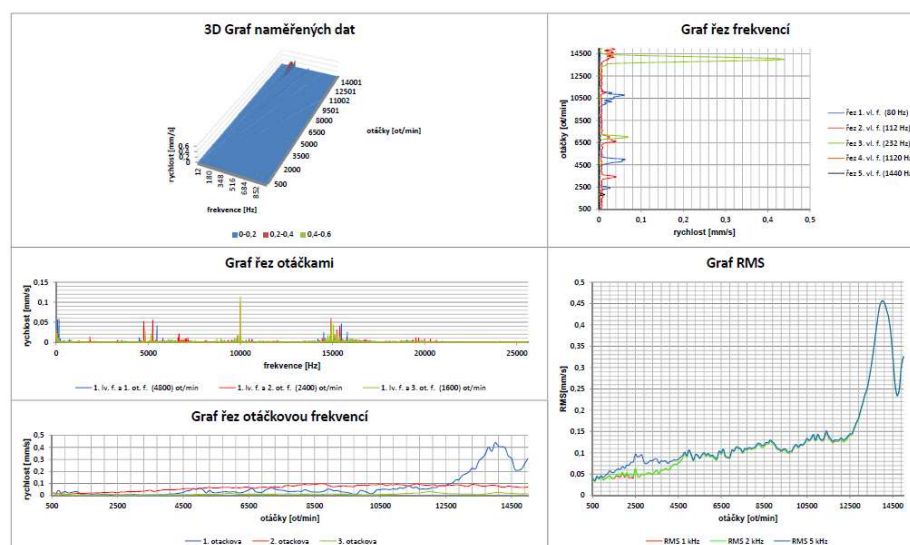


Grafická příloha k protokolu číslo: 1



Obrázek 4-29 Základní grafy

Grafická příloha k protokolu číslo: 1



Obrázek 4-30 Rozšířené grafy



V posledním okně formuláře je možnost zvolit vytvoření „kurzoru“ (graf č. 4-3). Ten byl vytvořen z důvodu, že ve 3D grafu není možno odečítat hodnoty. Tento „kurzor“ vytvoří v 3D grafu řez, podle kterého uživatel pozná přibližnou hodnotu na ose Z (rychlost mm/s) a násobek otáčkové frekvence.

Pro vytvoření „kurzoru“ je nutné vytvořit nová data, ve kterých se přepisuje hodnota naměřené rychlostí kmitání. Tato data se vytváří na skrytém listu „data_graf“ (zde jsou i přepočítané logaritmické hodnoty naměřených dat). Pro rychlé vytvoření grafů se přepočítávají jen data, která jsou v grafu zobrazena.

Pro zadání „kurzoru“ slouží pole „Zadej otáčky“ a „Zadej frekvenci“. Začátek „kurzoru“ je vždy v souřadnicích [0, 0]. Vyplněním polí otáček a frekvence je zadán druhý bod, kterým „kurzor“ prochází. Konec řezu „kurzoru“ je na konci zobrazené oblasti grafu.

U „kurzoru“ je možné změněním hodnoty v poli „nastavte šířku čáry“ nastavit jeho šířku. Program nejprve vypočítá souřadnice hodnot, která mají být změněny. Tyto hodnoty jsou rozšířené o vedlejší hodnoty (obr. č. 4-31). Rozšíření hodnot je závislé na nastavení v poli „nastavte šířku čáry“. Program nastaví, zda hodnoty rozšíří podle řádků (frekvence) nebo podle sloupce (frekvence) tak, aby výsledná čára byla co nejhladší. Šířka čáry 1 znamená přepsání hodnot o jednu doprava a o jednu doleva (popřípadě o jednu dolů, o jednu nahoru)

		750	1000	1250	1500
82					
83					
84	0				
85	8	0,229445	0,383615	0,343546	0,642134
86	16	0,066519	0,158591	0,062568	0,221468
87	24	0,4	0,073753	0,035497	0,079683
88	32	0,4	0,4	0,031454	0,029068
89	40	0,4	0,4	0,4	0,022935
90	48	0,009456	0,4	0,4	0,016906
91	56	0,01222	0,023586	0,4	0,4
92	64	0,009835	0,018439	0,4	0,4
93	72	0,003934	0,012285	0,012838	0,4
94	80	0,01042	0,018234	0,014206	0,010639
95	88	0,029082	0,011573	0,011818	0,009132
96	96	0,033022	0,007202	0,010517	0,004242

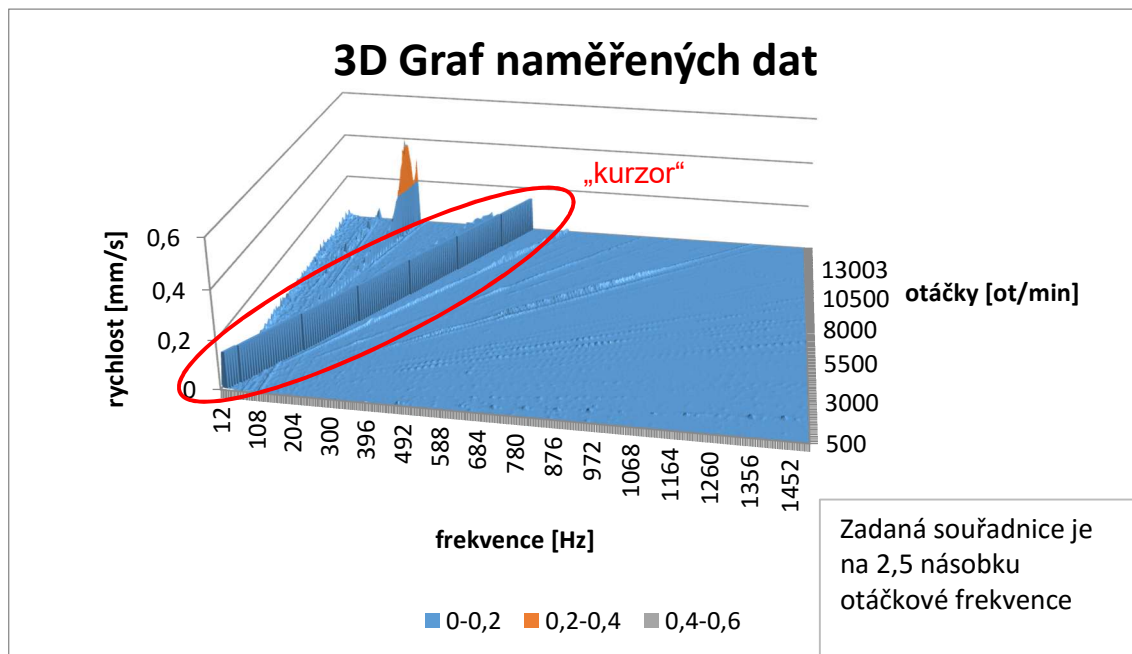
Obrázek 4-31 Příklad přepsaných dat pro 3D graf s kurzorem. Přepsání dat je po sloupcích (otáčky). Šířka čáry = 1

Pro nastavení výšky „kurzoru“ jsou dvě možnosti:

- hodnota RMS – program přepisuje naměřená data na hodnoty spočítané pro RMS 10 Hz – 1 kHz, pro dané otáčky.
- nastavenou hodnotou v poli „vložit hodnotu osy Z 3D grafu“.



Ve vytvořeném grafu se vpravo dole zobrazí legenda, kde je uvedeno o jaký násobek 1. otáčkové frekvence se jedná



Graf 4-3 Ukázka „kurzoru“ v 3D grafu

Pokud je zvolena možnost vytvoření „kurzoru“, musí být tyto hodnoty vyplněny. Program kontroluje, zda u pole „zadej otáčky řezu“ a „zadej frekvenci řezu“ jsou vyplněné hodnoty. Následně se zkontroluje, jestli jsou vyplněné hodnoty číslo. Pokud kontrola neproběhla úspěšně, program vyzve uživatele k opravě.

U pole „nastavte šířku čáry“ se kontroluje pouze, zda vyplněná hodnota je číslo. Pokud není, uživatel je vyzván k opravě.

U pole „vlozte hodnotu osy Z 3D grafu“ je kontrolováno, zda se jedná o číslo. Toto číslo nesmí být záporné. Pokud podmínky nejsou splněny, uživatel je vyzván k opravě.



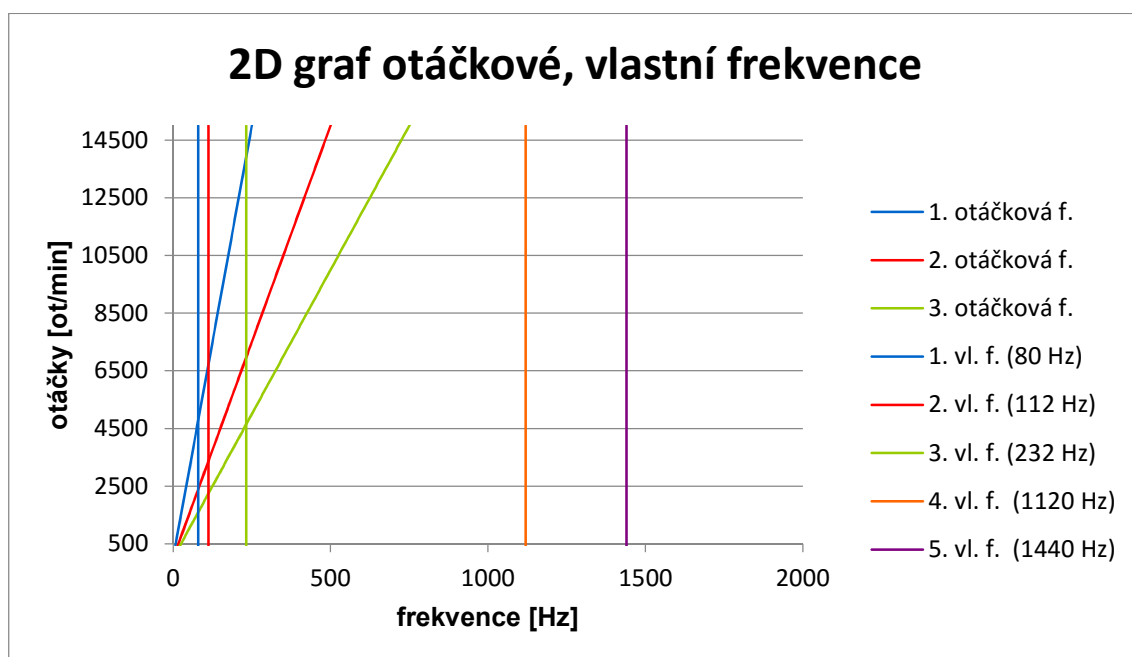
Obrázek 4-32 Formulář grafy

4.6.2. Popis jednotlivých grafů a jejich nastavení

V této kapitole budou popsány jednotlivé grafy. Grafy se generují automaticky, s legendou, nadpisem i popisem os. Každý graf má nastavení vlevo od tisknutelné oblasti, kterým je možné nastavit parametry grafu.

2D graf otáčkové, vlastní frekvence (graf č. 4-4) patří do skupiny pěti grafů, ze kterých si uživatel vybere, který bude na prvním místě.

Tento graf ukazuje „mapu“, kde se protne 1. 2. a 3. otáčková frekvence se zvolenou frekvencí zvolenou na listu „Vstup_data“ a formuláři Formulář zadání frekvence / otáček. Pokud existuje v naměřených datech průsečík otáčkové a vlastní frekvence, je vypsán v tabulce hodnot na listu „Vstup_data“ (kap. 4.3.5). Maximální počet průsečíků je 15.



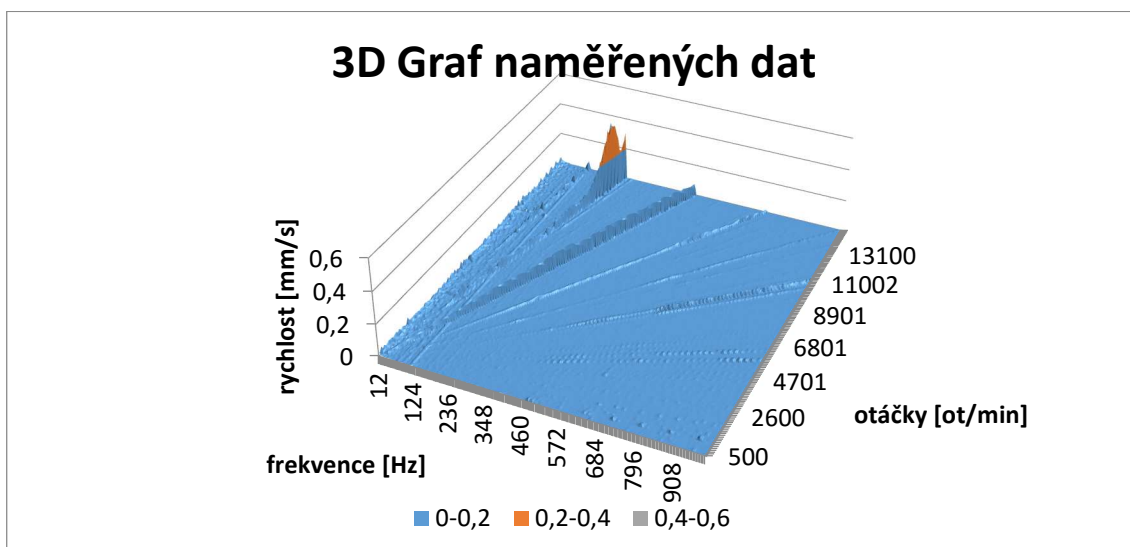
Graf 4-4 2D Graf zobrazující otáčkovou a zvolenou frekvenci

Pokud uživatel zvolí vytvoření tohoto grafu, na řádce 15, sloupci **B**, se vytvoří tabulka s nastavením grafu. Tabulka obsahuje nastavení rozsahu osy X (řádek 17) a osy Y (řádek 18). Osa X má po prvním spuštění nastavenou hodnotu auto. Tato hodnota znamená, že si program určí rozsah grafu. Tuto hodnotu je možno přepsat. Pokud zadaná hodnota není číslo, program tuto hodnotu přepíše na hodnotu „auto“. Osa Y je v základním nastavení v rozsahu od minimálních otáček, až po otáčky maximální. Kontrola vstupu je stejná jako u osy X. Pro vytvoření grafu s novým nastavením je nutné kliknout na tlačítko „vytvořit grafy“ a potvrdit „Formulář grafy“. Nastavení grafu je na obr. č. 4-33.

15	nastavení měřítka grafu: otáčková vlastní, frekvence	
16	min.	max.
17	osa X	auto auto
18	osa Y	750 16000
19		

Obrázek 4-33 Obrázek s nastavením pro graf č. 4-4

3D graf naměřených dat (graf č. 4-5) je druhý ze skupiny prvních pěti grafů. Graf vybírá data z listu „Vstup_data“ z naměřených hodnot. Tento graf slouží pro celkový přehled naměřených hodnot.



Graf 4-5 3D graf naměřených dat v lineárních hodnotách (naměřených)

Nastavení tohoto grafu začíná na řádce 15. Na řádce 17 je možné nastavit rozsah osy Z. Pokud je nastavená hodnota „auto“, program si sám určí minimální a maximální rozsah. Na řádce 19 se určuje rozsah zobrazené frekvence. Program kvůli časové náročnosti na vykreslení načítá jen hodnoty zadané frekvence, z tohoto důvodu není možné změnit rozsah ručně. Zadané hodnoty se kontrolují, jestli jsou v rozsahu minimální nebo maximální frekvence. Pokud podmínka není splněna, u minimální hodnoty se zadaná hodnota přepíše na 10 Hz a u maximální hodnoty na 1000 Hz. Dále je nutné dodržet podmínku, že počet vykreslených hodnot na ose X (otáčky), musí být větší než na ose Y (frekvence). Pokud tato podmínka není splněná, program upraví hodnotu maximální frekvence tak, aby podmínka splněna byla.

Na řádce 20 je možné nastavit Hloubku. Hloubka je poměrová hodnota, která nastavuje šířku grafu (roztahuje, nebo zužuje osu X). Hloubka může nabývat hodnot od 1 do 2000. Základní hodnota je nastavena na 500.

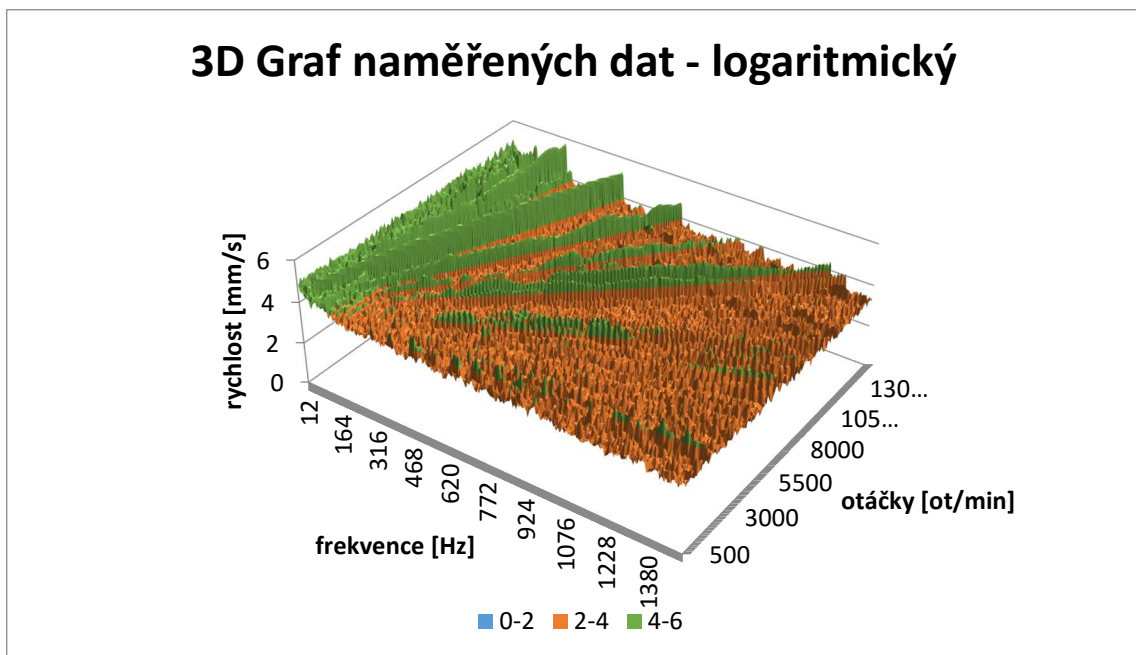
Na dalších dvou řádcích je možné nastavit úhel zobrazení grafu. Toho je možné dosáhnout rotací grafu, podle osy X, nebo Y. Hodnoty mohou být zadané v rozsahu 0 – 90. viz obr. č. 4-34.

15	nastavení 3D grafu:		
16		min.	max.
17	osa Z	auto	auto
18			
19	frekvence	10	1000
20	hloubka	500	
21	Rotace osy X		25
22	Rotace osy Y		35

Obrázek 4-34 Nastavení ke grafu č.4-5, 4-6

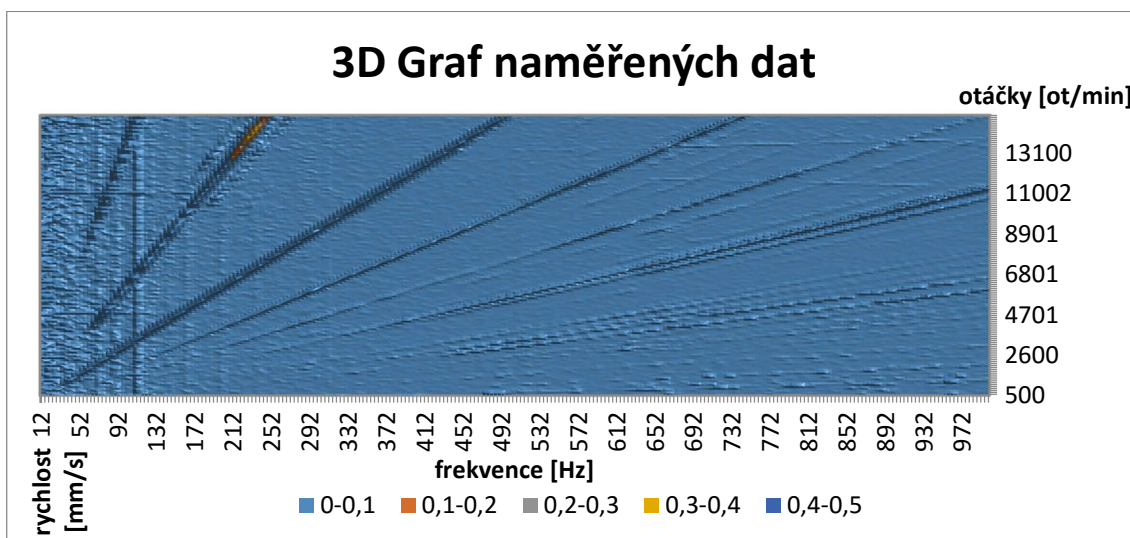


3D graf naměřených dat - logaritmický (graf č. 4-6) je třetí graf z pěti grafů, ze kterých si uživatel jeden zvolí. Tento graf se od grafu „**3D graf naměřených dat**“ liší pouze v zobrazených hodnotách, které jsou přepočítány do logaritmických hodnot. Nastavení grafu (obr. č. 4-34) je také stejné jako pro graf „**3D graf naměřených dat** (graf č. 4-6)“.



Graf 4-6 3D Graf naměřených dat v logaritmických hodnotách

3D graf naměřených dat pohled z vrchu (graf č. 4-7) je čtvrtý z pěti grafů. Jedná se o podobný graf jako je graf č. 4-5. Rozdíl je jen v pohledu na naměřená data, kde u pohledu z vrchu je hodnota rotace osy Y nastavena fixně na 90. Tento graf není možno žádným způsobem natáčet. Nastavení grafu je stejné jako u grafu č. 4-5 a č. 4-6, jen zde není možné nastavit rotaci grafu (obr. č. 4-35).

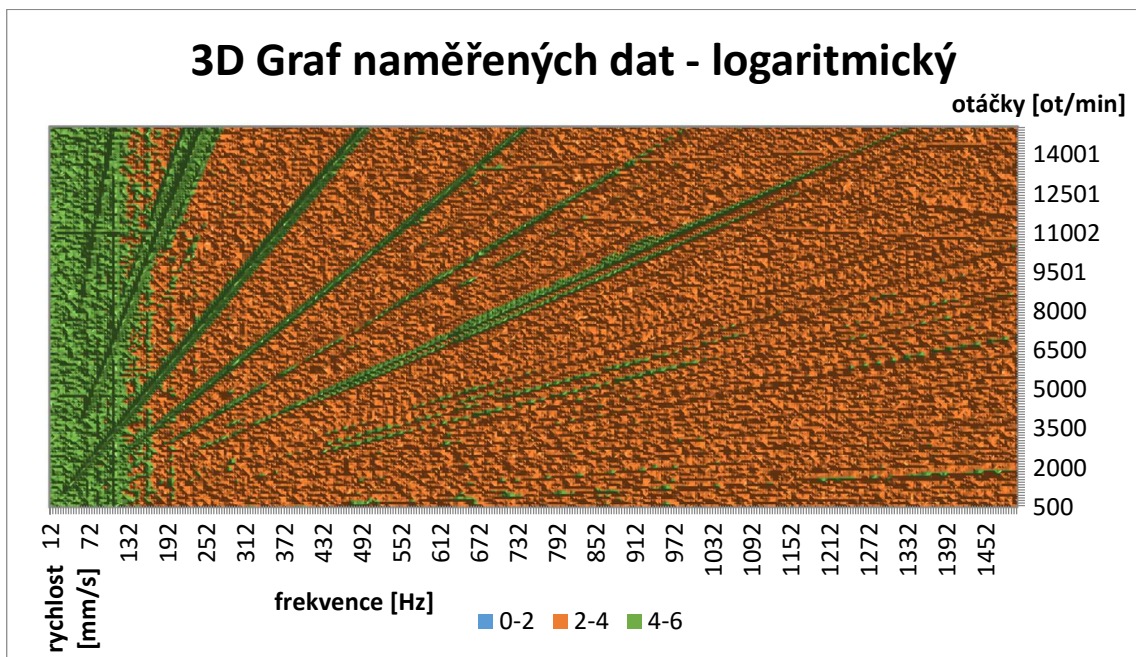


Graf 4-7 3D graf naměřených dat, lineární – pohled z vrchu

15	nastavení 3D grafu:		
16		min.	max.
17	osa Z	auto	auto
18			
19	frekvence	10	1000
20	hloubka	500	

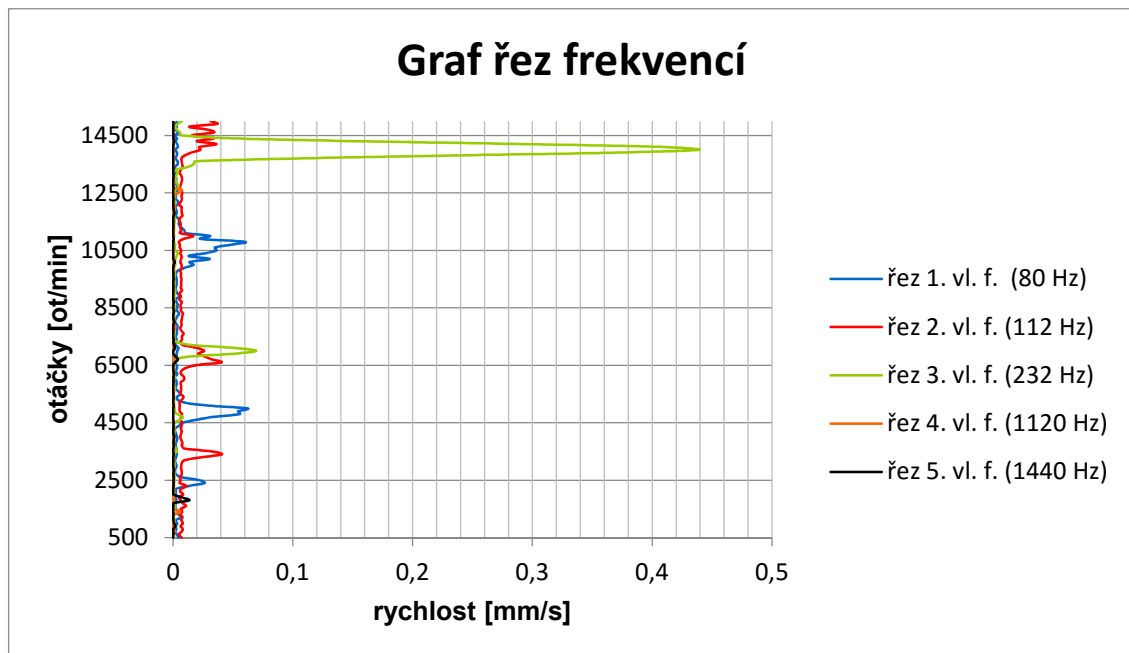
Obrázek 4-35 nastavení grafu č. 4-7, 4-8

3D graf naměřených dat pohled z vrchu – logaritmický (graf č. 4-8) je poslední z pěti grafů. Jedná se stejný graf jako graf č. 4-7, s tím rozdílem, že zobrazené hodnoty na ose Z jsou přepočítané do logaritmických hodnot. Nastavení je také společné s grafem č. 4-7. (obr. č. 4-35)



Graf 4-8 3D Graf naměřených dat, logaritmický – pohled z vrchu

Graf řez frekvencí je 2D graf, který je součástí rozšířených grafů (graf č. 4-9). Tento graf vykresluje hodnoty rychlosti vibrací na zvolených frekvencích. Volba frekvencí, které jsou v grafu vykresleny, se nastavuje ve formuláři „zadání frekvence / otáček“ na listu „vstup_data“. V legendě grafu je uvedena frekvence, která je vykreslena.



Graf 4-9 Graf řezem zvolených frekvencí

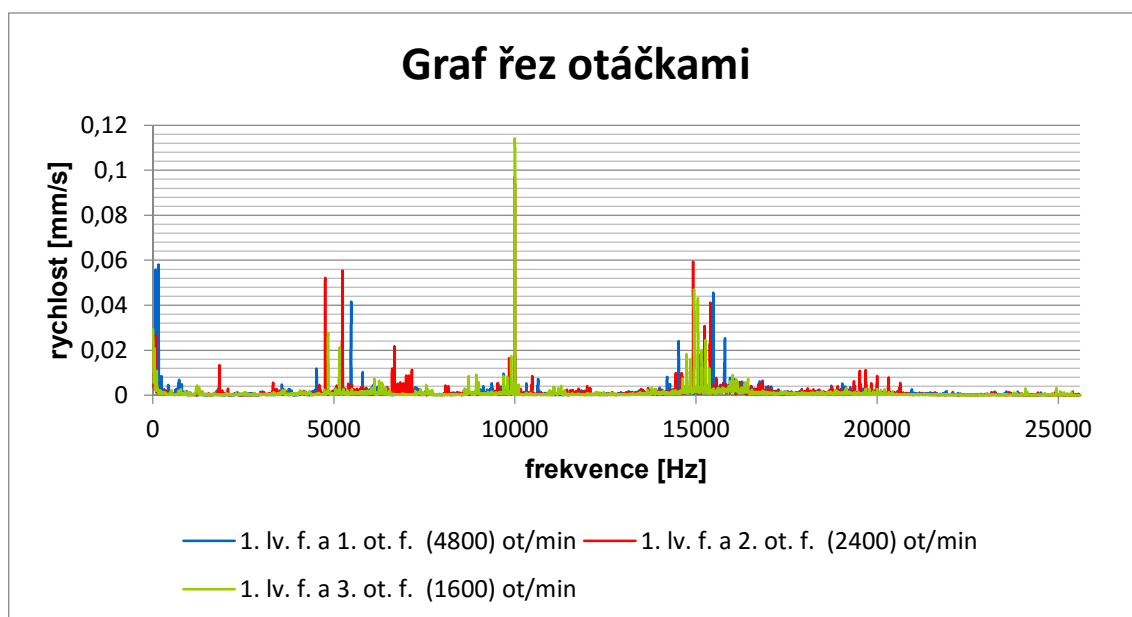


Nastavení k tomuto grafu (obr. č. 4-36) začíná na řádce 26. Nastavení osy X a osy Y je stejné jako u grafu **2D graf otáčkové, vlastní frekvence** (graf č. 4-4).

26	nastavení měřítka grafu: řez frekvencí		
27		min.	max.
28	osa X	0 auto	
29	osa Y	750	16000

Obrázek 4-36 Nastavení grafu č. 4-9

Graf řez otáčkami (graf č. 4-10) je také graf, který je součástí volby rozšířených grafů. Graf vykresluje hodnoty rychlosti kmitání ve zvolených otáčkách. Jde v podstatě o vykreslení FFT spektra pro zvolené otáčky. Volba otáček, které jsou v grafu vykresleny, se nastavuje ve formuláři „zadání frekvence / otáček“ na listu „vstup_data“. Pokud byla ve formuláři „zadání frekvence / otáček“ pro výběr otáček zvolena možnost automaticky, v legendě grafu se vypíše, o jaký průnik otáčkové frekvence a zvolené frekvence se jedná + otáčky, které jsou vykresleny. Pokud uživatel zadal otáčky, kterými je proveden řez ručně, v legendě grafu jsou vypsány jen otáčky.



Graf 4-10 Graf řezem zvolených otáček

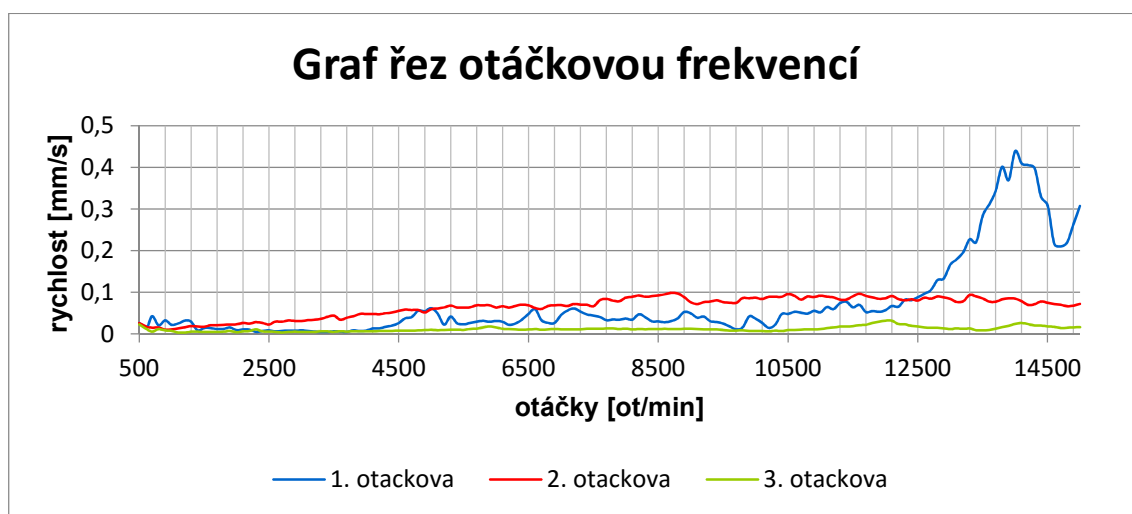
Nastavení k tomuto grafu (obr. č. 4-37) začíná na řádce 38. Nastavení osy X a osy Y je stejné jako u grafu **2D graf otáčkové, vlastní frekvence** (graf č. 4-4).



38	nastavení měřítka grafu: řez otáčkama		
39		min.	max.
40	osa X	0	25600
41	osa Y	0 auto	

Obrázek 4-37 Nastavení grafu č. 4-10

Graf řez otáčkovou frekvencí (graf č. 4-11) je součástí základních grafů. Jedná se o graf, který vykresluje průběh 1. 2. a 3. otáčkové frekvence.



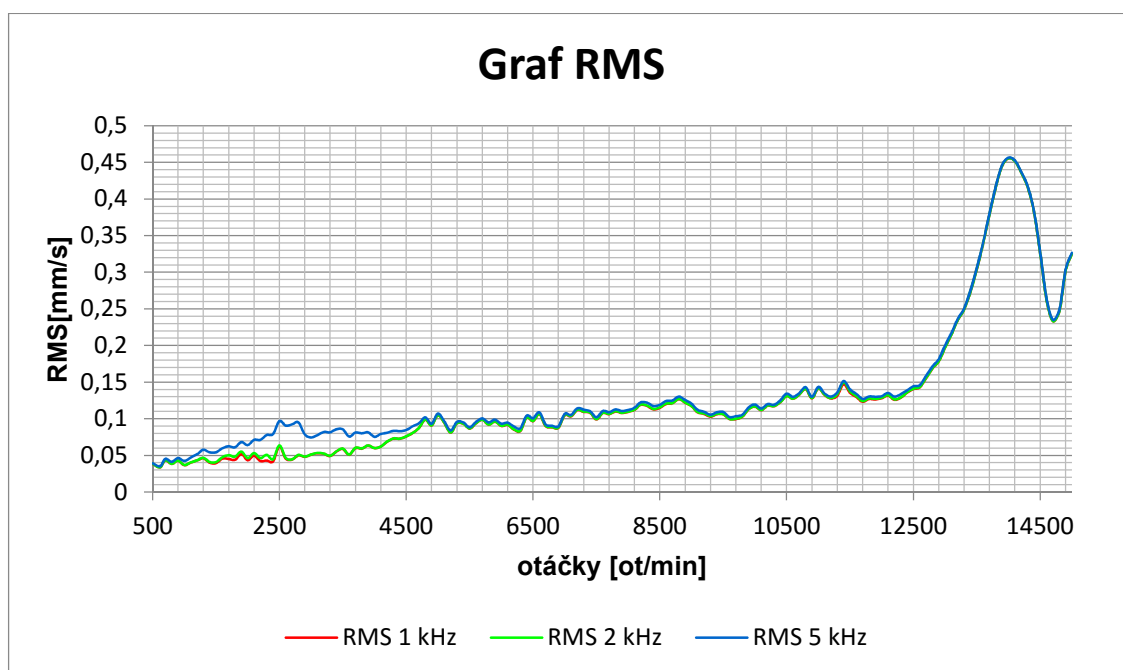
Graf 4-11 Graf řezem otáčkovou frekvencí

Nastavení k tomuto grafu (obr. č. 4-38) začíná na řádku 32. Nastavení osy X a osy Y je stejné jako u grafu **2D graf otáčkové, vlastní frekvence** (graf č. 4-4).

32	nastavení měřítka grafu: řez otáčkovou frekvencí		
33		min.	max.
34	osa X	750	16000
35	osa Y	0 auto	

Obrázek 4-38 Nastavení grafu č. 4-11

Graf RMS (graf č. 4-12) je součástí základních grafů. Tento graf vykresluje vypočítané hodnoty RMS 10 Hz – 1 kHz, RMS 10 Hz – 2 kHz a RMS 10 Hz – 5 kHz. Pokud maximální hodnota měřené frekvence je menší než 2 kHz nebo 5kHz, program vypočte RMS do maximální měřené frekvence a napíše to do legendy.



Graf 4-12 Graf RMS hodnot 10 Hz – 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz

Nastavení k tomuto grafu (obr. č. 4-39) začíná na řádku 44. Nastavení osy X a osy Y je stejné jako u grafu **2D graf otáčkový, vlastní frekvence** (graf č. 4-4).

44	nastavení měřítka grafu: RMS		
45		min.	max.
46	osa X	750	16000
47	osa Y	auto	auto

Obrázek 4-39 nastavení grafu č. 4-12



4.7. Uložení dat do databáze

Aplikace umožňuje uložit data do databáze. Jako databázový systém byl zvolen program MS Access. Jedná se o systém na zprávu relačních databází s vlastním grafickým rozhraním. Data se do databáze ukládají přes aplikaci na listu „DB“, kde se nachází tlačítko „Uložit data do databáze“.

Vzhledem k charakteru uložených dat není využito relačních vazeb, ale vše je uloženo v jedné tabulce jménem „hlavni“. Ukládaná data a jejich datový typ je na obr. č. 4-40.

Název pole	Datový typ
ID	Automatické číslo
fabrika	Krátký text
rok	Číslo
mesic	Číslo
den	Číslo
typ_testu	Krátký text
typ_stroje	Krátký text
vyrobni_cislo_stroje	Krátký text
typ_vretena	Krátký text
vreteno_vyrobce	Krátký text
vyrobni_cislo_vretena	Krátký text
prikon_vretene	Číslo
max_otacky	Číslo
otacky_rada	Dlouhý text
misto_mereni	Krátký text
osa_mereni	Krátký text
podminky_mereni	Dlouhý text
snimac	Krátký text
rms_max	Číslo
rms_rada	Dlouhý text
analyzator	Krátký text
max_frekvence	Číslo
pocet_car	Číslo
pocet_radu	Číslo
poznamka	Dlouhý text
cesta_pls	Dlouhý text
cesta_aplikace	Dlouhý text

Obrázek 4-40 Ukládaná data a jejich datový typ

Po stisknutí tlačítka „Uložit data do databáze“ bude uživatel vyzván k zadání cesty se souborem s databází. Uživatel může vybrat pouze databázový soubor s koncovkou .accdb.



4.7.1. Formulář pro ukládání do databáze

Po spojení s databází se zobrazí formulář pro uložení dat do databáze (obr. č. 4-41).

Formulář pro uložení dat do databáze

Hodnoty DB

Vyplněte hodnoty, které se uloží do databáze

název firmy

rok měření měsíc měření den měření

typ testu

typ stroje výr. č. stroje

typ vřetena výrobce vřetena výr. č. vřetena

příkon vřetena [kW] max. otáčky vřetena

místo měření osa měření

snímač podmínky měření

max. hodnota RMS 1kHz

typ analyzátoru max. frekvence počet řádů

počet čar

poznámka

vložit jméno souboru .pls vyber cestu .pls souboru

vložit jméno této aplikace vyber cestu souboru Excel

přidat řadu otáček

přidat řadu RMS 1kHz

Spojení s DB Zrušit spojení s DB

zrušit Ok

Obrázek 4-41 Formulář pro uložení dat do databáze

Pokud uživatel před uložením dat do databáze vyhodnotil měření a vyplnil protokol, program mu předvyplní některé hodnoty. Do databáze se vyplňují údaje vyplněné v tab. 4-4. Tabulka dále obsahuje, zda je hodnota předvyplněna, a zda se kontroluje správné zadání vstupu.



Tabulka 4-4 Zadávané parametry do formuláře pro uložení dat do databáze

NÁZEV POLE	PŘED VYPLNĚNÍ	KONTROLA
NÁZEV FIRMY	ne	ne
ROK MĚŘENÍ	z formuláře / aktuální datum	na číslo
MĚSÍC MĚŘENÍ	z formuláře / aktuální datum	na číslo
DEN MĚŘENÍ	z formuláře / aktuální datum	na číslo
TYP TESTU	z formuláře	ne
TYP STROJE	z formuláře	ne
VÝROBNÍ Č. STROJE	z formuláře	ne
TYP VŘETENE	z formuláře	ne
VÝROBCE VŘETENE	ne	ne
VÝROBNÍ Č. VŘETENE	z formuláře	ne
PŘÍKON VŘETENE	ne	na číslo
MAX. OTÁČKY VŘETENE	z vyhodnocení měření	na číslo
MÍSTO MĚŘENÍ	ne	ne
OSA MĚŘENÍ	z formuláře	ne
SNÍMAČ	ne	ne
PODMÍNKY MĚŘENÍ	ne	ne
MAX. HODNOTA RMS 1KHZ	z vyhodnocení měření	na číslo
TYP ANALYZÁTORU	ne	ne
MAX. FREKVENCE	z vyhodnocení měření	na číslo
POČET ČAR	z vyhodnocení měření	na číslo
POČET ŘÁDŮ	ne	na číslo
POZNÁMKA	ne	ne

Vložit jméno souboru .pls: otevře dialogové okno, ve kterém uživatel zadá cestu k .pls souboru. Tato cesta je pak uložena do databáze.

Vložit jméno této aplikace: otevře dialogové okno, ve kterém uživatel zadá cestu k .xism souboru. Tato cesta je pak uložena do databáze. Pole je automaticky předvyplněno.



Přidat řadu otáček: vloží do databáze hodnoty všech otáček, které byly měřeny. Tuto volbu lze potvrdit, jen pokud bylo vyhodnoceno měření.

Přidat řadu RMS 1kHz: přidá do databáze všechny hodnoty RMS 1 kHz. Vložit hodnoty lze, jen pokud bylo vyhodnoceno měření.

Tlačítko spojení s DB: pokud je přerušené spojení s databází, umožní nové spojení.

Tlačítko zrušit spojení s DB: přeruší spojení s databází.

Tlačítko zrušit: přeruší vkládání dat do databáze.

Tlačítko ok: uloží data do databáze.

Pokud některé z údajů jsou nevyplněny, uloží se do databáze hodnota „0“. Pro čtení dat z databáze slouží program Access. Soubor s databází naleznete na příloženém CD. Ukázka databáze je na obr. č. 4-42.

ID	fabrika	rok	mesic	den	typ_testu	typ_stroje	vyrobní_cisl	typ_vretena	vreteno_vyi	vyrobní_cisl	prikon_vret
1	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	16A10526	vertikální	Step-Tec	6045.0018	30
2	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	16A10526	vertikální	Step-Tec	6045.0018	30
3	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	16A10526	vertikální	Step-Tec	6045.0018	30
4	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	16A10526	vertikální	Step-Tec	6045.0018	30
5	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	16A10526	vertikální	Step-Tec	6045.0018	30
6	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	116S0079	vertikální	Kessler	181915	26
7	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	116S0079	vertikální	Kessler	181915	26
8	K-MAS	215	5	27	rozbeh	frézka	116S0079	vertikální	Kessler	181915	26
11	K-MAS	2015	12	14	rozbeh	frézka	168P0532	vertikální	Kovosvit	125I/532	43
12	K-MAS	2015	12	14	rozbeh	frézka	168P0532	vertikální	Kovosvit	125I/532	43
13	K-MAS	2015	12	14	rozbeh	frézka	168P0532	vertikální	Kovosvit	125I/532	43
14	K-MAS	2015	12	14	rozbeh	frézka	168P0532	vertikální	Kovosvit	125I/532	43
15	K-MAS	2015	12	14	rozbeh	frézka	168P0532	vertikální	Kovosvit	125I/532	43
16	RCMT	2015	12	15	rozbeh	frézka	-	vertikální	Kessler	-	20
17	RCMT	2015	12	15	rozbeh	frézka	-	vertikální	Kessler	-	20
18	RCMT	2015	12	15	rozbeh	frézka	-	vertikální	Kessler	-	20
19	RCMT	2015	12	16	rozbeh	frézka	-	elektrovřetení	Kessler	-	18
20	RCMT	2015	12	16	rozbeh	frézka	-	elektrovřetení	Kessler	-	18
21	RCMT	2015	12	23	rozbeh	frézka	-	elektrovřetení	Kessler	-	18
22	RCMT	2015	12	11	rozbeh	frézka	Haas	řemenový pře-	-	-	18
23	RCMT	2015	12	11	rozbeh	frézka	-	řemenový pře-	Haas	-	18
24	RCMT	2015	12	11	rozbeh	frézka	-	řemenový pře-	Haas	-	18
25	RCMT	2015	12	11	rozbeh	soustruh	-	řemenový pře-	Emco	-	10
26	RCMT	2015	12	11	rozbeh	soustruh	-	řemenový pře-	Emco	-	10
27	RCMT	2015	12	11	rozbeh	soustruh	-	řemenový pře-	Emco	-	10
(Nové)		0	0	0							0

Obrázek 4-42 Ukázka dat v DB část 1

prikon_vret	max_otacky	otacky_rada	misto_mere	osa_mereni	podminky_r	snimac	rms_max	rms_rada	analyzator	max_frekv	pocet_car	pocet_radu	poznamka	cesta_pls	cesta_aplik
30	14999	500,0278; 618;	přední ložiska	X	za tepla	ACC	0	3,83541598908	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
30	14999	500,0278; 618;	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	3,86925381416	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
30	14999	500,0278; 618;	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	0	1,82808692164	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
30	14999	100,066; 300,2;	přední ložiska	X	za tepla	ACC	0	5,22426494644	FFT	3200	3200	0	ADASH		C:\Users\petrs
30	14999	100,066; 300,2;	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	1,26063336340	FFT	6400	6400	0	ADASH		C:\Users\petrs
26	10001	500,03807; 599	přední ložiska	X	za tepla	ACC	1	0,06696807117	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
26	10001	500,03807; 599	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	2	5,84990396486	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
26	10001	500,03807; 599	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	0	2,73419492738	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
43	7998	499,97782; 699	přední ložiska	X	za tepla	ACC	1	4,85606070576	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
43	7998	499,97782; 699	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	4,42726681354	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
43	7998	499,97782; 699	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	0	0,08299150843	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
43	8008	100,033; 300,1;	přední ložiska	X	za tepla	ACC	1	2,20103149957	FFT	6400	6400	0	ADASH		C:\Users\petrs
43	8008	100,033; 300,1;	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	1,98939846570	FFT	6400	6400	0	ADASH		C:\Users\petrs
20	40000	599,92378; 800	přední ložiska	X	za tepla	ACC	1	0,02433155834	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
20	40000	599,92378; 800	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	1	3,69314149310	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
20	40000	599,92378; 800	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	1	0,04733461147	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	15005	531,17698; 600	přední ložiska	X	za tepla	ACC	1	0,14482540226	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	15005	531,17698; 600	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	1	0,42490581132	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	15005	531,17698; 600	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	0	0,21609760203	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	3704	512,74134; 498	přední ložiska	X	za tepla	ACC	0	0,19111513829	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	3704	512,74134; 498	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	0,26220802389	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
18	3704	512,74134; 498	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	1	0,15342287263	FFT	25600	6400	0	PULSE		C:\Users\petrs
10	3002	497,0914; 596,5	přední ložiska	X	za tepla	ACC	0	0,13794708182	FFT	6400	3200	0	PULSE		C:\Users\petrs
10	3002	497,0914; 596,5	přední ložiska	Y	za tepla	ACC	0	0,10359191520	FFT	6400	3200	0	PULSE		C:\Users\petrs
10	3002	497,0914; 596,5	přední ložiska	Z	za tepla	ACC	0	0,29316707480	FFT	6400	3200	0	PULSE		C:\Users\petrs

Obrázek 4-43 Ukázka dat v DB část 2



5. Aplikace softwaru na reálná měření

Součástí této DP je ověření naprogramované aplikace na reálném měření. Měření na strojích probíhalo v Kovosvitu MAS a RCMT. Měřené stroje a jejich parametry jsou v tabulce č. 5-1.

Tabulka 5-1 Přehled měřených strojů a jejich parametrů

MĚŘEN O	STROJ	TYP STROJE	VÝROBCE STROJE	VÝROBC E VŘETEN A	TYP VŘETENA	MAX. OTÁČKY VŘETENA	VÝKON VŘETENA
K-MAS	MCV 1000	frézka	K-MAS	Step-Tec	elektrovřeteno	15 000 ot/min	30 kW
K-MAS	MCU 700	frézka	K-MAS	Kessler	elektrovřeteno	10 000 ot/min	20/26 kW
K-MAS	MCV 1270	frézka	K-MAS	Kovosvit	Řemenový převod	8 000 ot/min	28/43 kW
RCMT	TM-1	frézka	Hass	Hass	Řemenový převod	4 000 ot/min	4 kW
RCMT	MCVL 1000	frézka	K-MAS	Kessler	elektrovřeteno	42 000 ot/min	20 kW
RCMT	ML1	frézka	RCMT/Taj mac ZPS	Kessler	elektrovřeteno	15 000 ot/min	18 kW
RCMT	Turn 342	soustruh	Emco	Emco	Řemenový převod	4 000 ot/min	10 kW



5.1. Použité přístroje

Při měření na strojích byly pro měření vibrací použity analyzátory PULSE a ADASH. Pro měření přesnosti chodu vřetena za rotace byla použita aparatura LION PRESICION. V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé přístroje a jejich nastavení. U měření, pokud nebude uvedeno jinak, se používalo nastavení definované v následujících kapitolách.

5.1.1. Měřicí přístroje s analyzátorem PULSE

Jedná se o přístroje pro měření vibrací. Do analyzátoru PULSE od firmy *Brüel&Kjaer*, jsou zapojeny tři akcelerometry pro měření vibrací (osy: X, Y, Z) a otáčková sonda. Analyzátor je ovládán přes NB. Schéma zapojení je na obr. č. 5-1.

Tabulka 5-2 Nastavení analyzátoru PULSE

maximální frekvence:	25600
max. počet spektrálních čar:	6400
typ průměrování:	exponenciální
počet průměrů:	5
Překrytí:	75%
Váhové okno:	Hanning

Pokud není uvedeno jinak, tak rozběhové testy začínají od 500 ot/min s krokem po 100 ot/min, až do maximálních otáček vřetena.

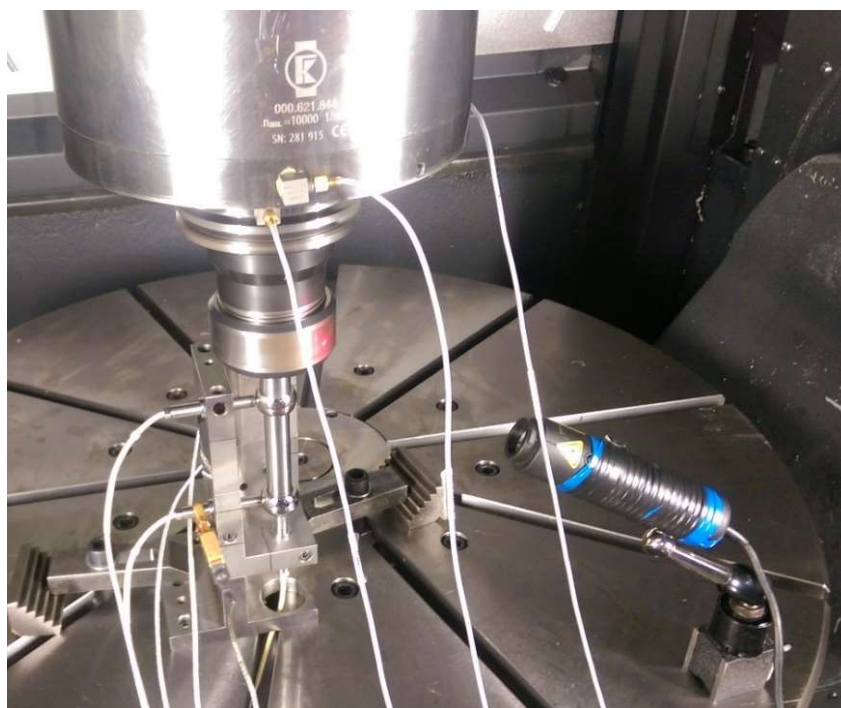
Tabulka 5-3 Přístrojové vybavení k analyzátoru PULSE

<i>Název</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Typ</i>	<i>Výrobní číslo</i>	<i>Výsledek kalibrace</i>
Multianalyzátor PULSE	Brüel&Kjaer	3560 C	2325692	-
Notebook	IBM	T43 p	L3-WCRYT 05/12	-
2 x akcelerometr	Brüel&Kjaer	4507 B1	2308537 2308539	Citlivost 100 mV/g
1 x akcelerometr	Brüel&Kjaer	4507 B4	2314321	Citlivost 10 mV/g
Snímač otáček	Compact Instruments	CLOS		



Obrázek 5-1 Přístroje pro měření vibrací s analyzátozem PULSE

Akcelerometry jsou ke stroji připevněny pomocí vosku. Otáčková sonda je připevněna k magnetickému stojánku, který je upnut ke stroji.



Obrázek 5-2 Uchycení akcelerometrů pomocí vosku



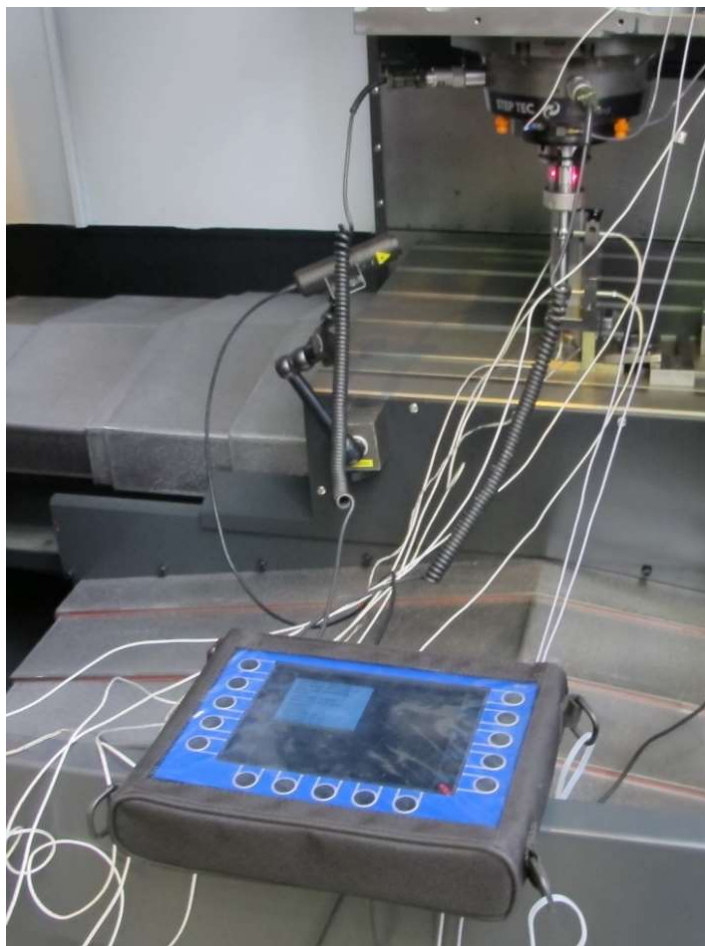
5.1.2. Měřicí přístroje s analyzátozem VA4

Přístroj VA4 PRO od firmy ADASH je analyzátor pro měření vibrací. Při měření se používaly dva akcelerometry (osy: X, Y) a otáčková sonda (obr. č. 5-3)

Tabulka 5-4 Nastavení analyzátoru ADASH VA4

maximální frekvence:	6400
počet spektrálních čar:	6400
typ průměrování:	lineární
počet průměrů:	4
Překrytí:	75%
Okno:	Hanning

Pokud není uvedeno jinak, tak rozběhové testy začínají od 300 ot/min s krokem po 100 ot/min, až do maximálních otáček vřetena.



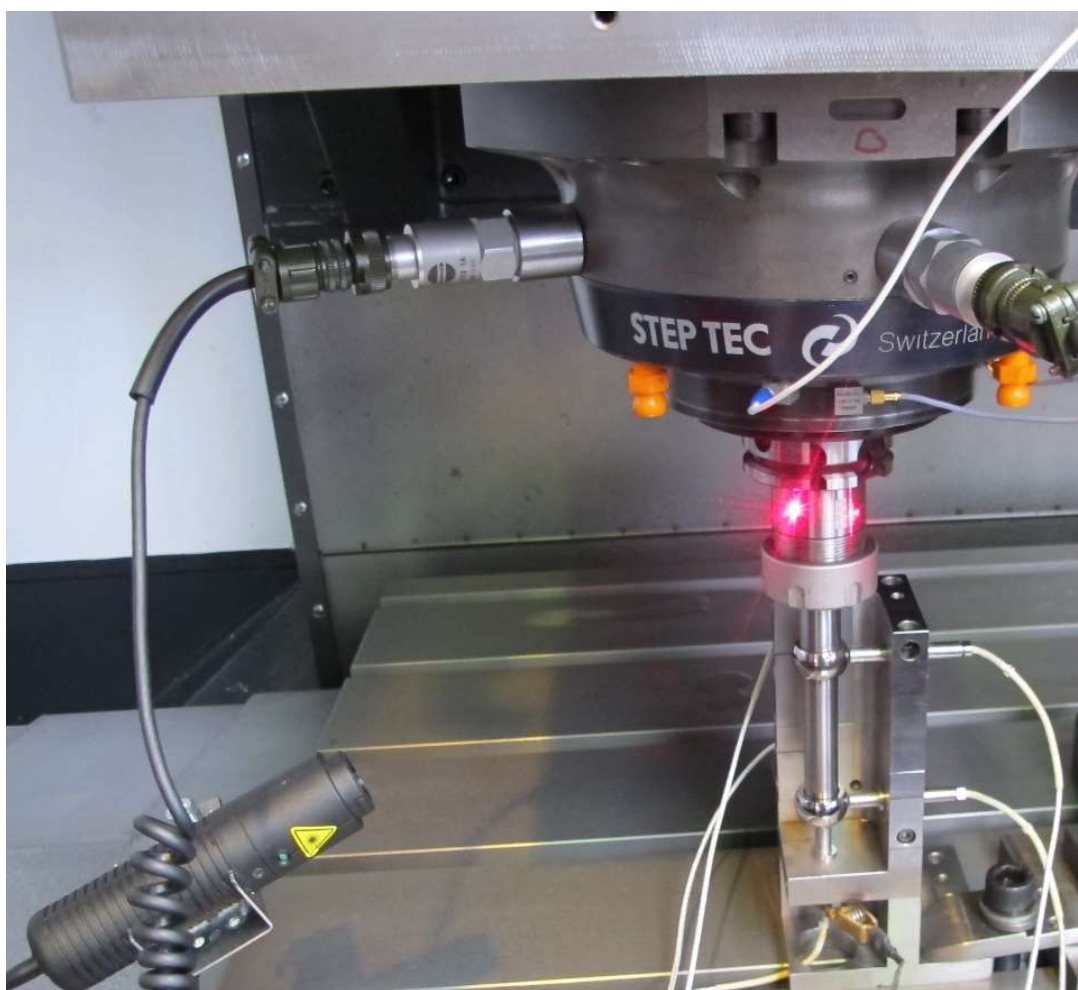
Obrázek 5-3 Přístroj ADASH VA4



Tabulka 5-5 Přístrojové vybavení k analyzátoru ADASH VA4

Název	Výrobce	Typ	Výsledek kalibrace
analyzátor ADASH VA4	ADASH	A4400 - VA4 Pro	-
2 x akcelerometr	ADASH	CTC/100mV/g	Citlivost 100 mV/g
Snímač otáček	Compact Instruments	CLOS	

Akcelerometry byly k vřetenu stroje uchyceny dle zvyklostí formy Kovosvit Mas. Způsob uchycení je vidět na obr. č. 5-4. Jedná se o uchycení pomocí silného magnetu k vřetenu stroje. Nevýhoda takového upevnění akcelerometru je snížená frekvenční odezva (kruhová plocha přichycená ke kuželové ploše). Z tohoto důvodu je maximální frekvenční rozsah měřený na analyzátoru pulse jen 6400 Hz. Otáčková sonda je uchycena přes stojánek ke stroji (obr. č. 5-3).



Obrázek 5-4 Uchycení akcelerometrů - ADASH

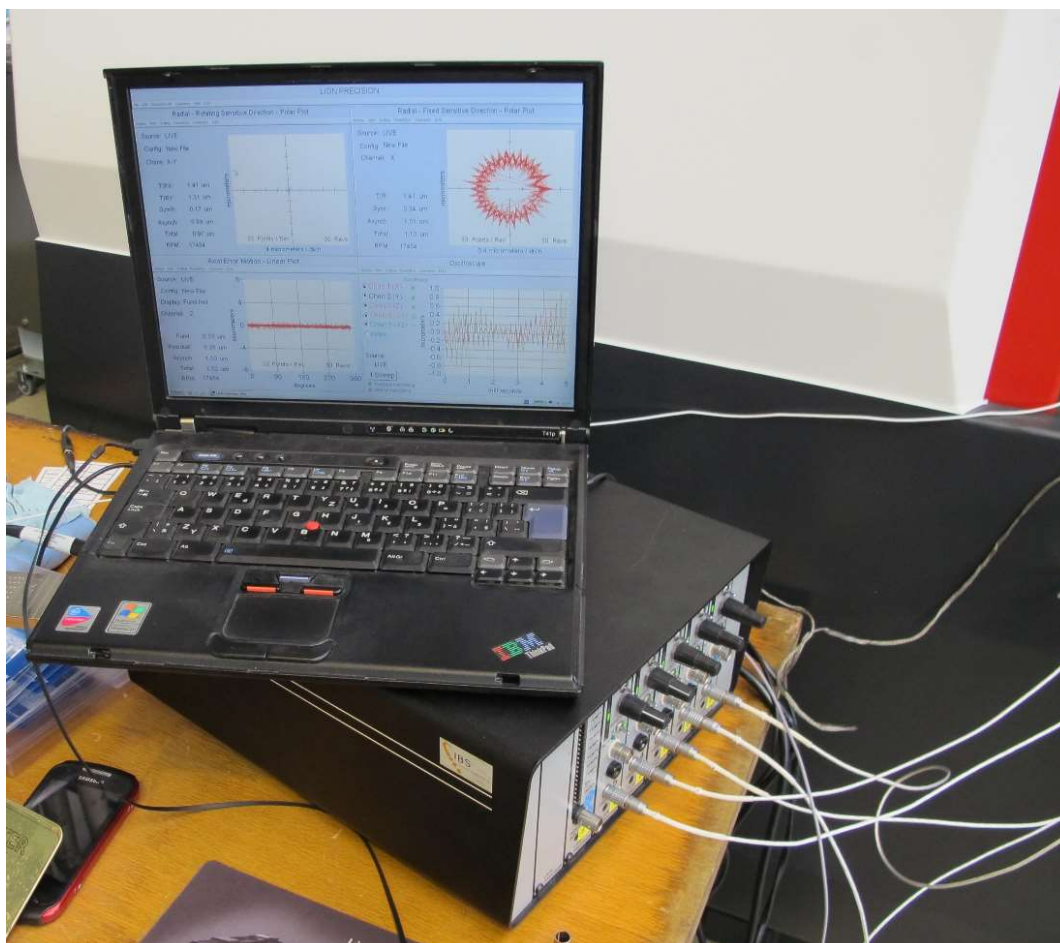


5.1.3. Měřicí přístroj Lion Precision

Jedná se o přístroje pro měření přesnosti chodu vřetene za rotace. Do analyzátoru Lion Precision, který je ovládán přes NB, je zapojeno pět snímačů výchylky. Snímače výchylky měří aktuální výchylku při rotaci přesného měřicího trnu, který je upevněn do vřetena stroje (obr. č. 5-4).

Tabulka 5-6 Nastavení analyzátoru Lion

Měřicí rozsah	500 μm
Vzorkovací frekvence	10 000 Hz
Citlivost	Low
Počet průměrů	30 až 150
Kruhovitost koule	80 nm



Obrázek 5-5 Analyzátor Lion Precision s NB



Tabulka 5-7 Přístrojové vybavení Lion Precision

<i>Název</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Typ</i>	<i>Výrobní číslo</i>
5x Měřicí sonda	Lion Precision	C7-V	020808/01-05
Měřicí ústředna	Lion Precision	E série	0203337-9
Notebook	IBM	T40	-
Měřicí karta	NI	6230	-
Set Lion Precision	Lion Precision		

Snímače výchylky jsou upevněny do konzole tak, aby měřily výchylku trnu v maximálním rozmezí 500 μm . Pro každé měřené otáčky byla provedena dvě měření. A pro vybrané otáčky bylo provedeno měření v opačném směru otáčení vřetena (funkce stroje M4). Měřené otáčky naleznete u popisu měření jednotlivých strojů.



5.2. Měření KOVOSVIT MAS

Tato DP probíhala ve spolupráci se společností Kovošvit MAS. Součástí DP je naměřit vybrané stroje v K-MAS s různými vřeteny a ty následně porovnat. Jedná se o nové stroje, které nebyly v provozu. Měřené zkoušky byly: měření vibrací vřetena a měření přesnosti chodu vřetena za rotace. K těmto měřením byla použita aparatura PULSE, ADASH a LION Precision.

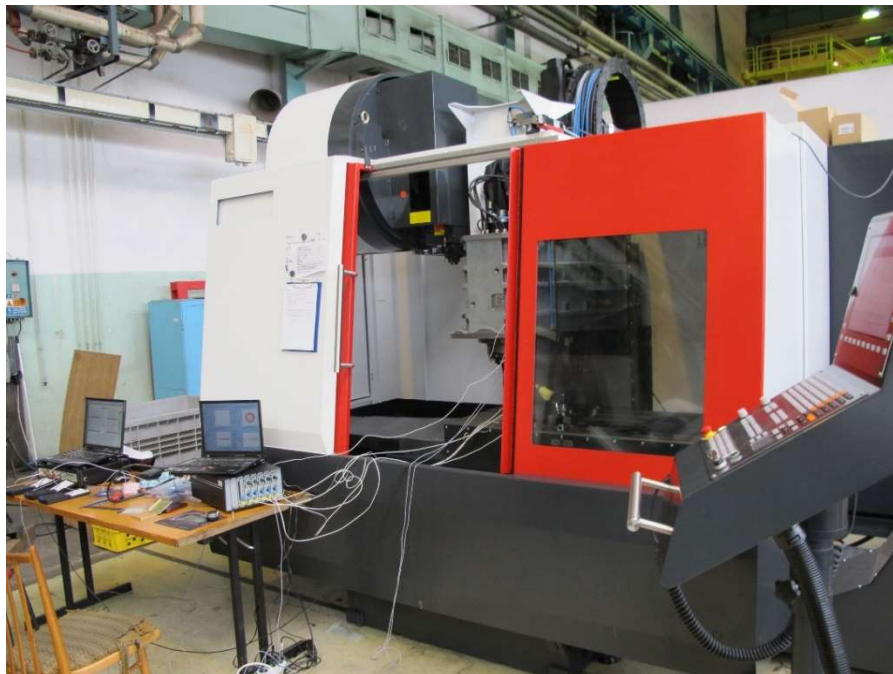
5.2.1. Kovošvit MCV 1000

Stroj MCV 1000 je tříosá horizontální frézka (obr č 5-6) s vřetenem Step-Tec. Toto vřeteno je vhodné pro dokončovací operace (označení SPEED)

Parametry vřetena:

Tabulka 5-8 Parametry vřetena Step-Tec u stroje MCV 1000

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
elektrovřeteno	Step-Tec	6045.0018	15 000 ot/min	30 kW



Obrázek 5-6 Frézka MCV 1000 s vřetenem Step-Tec

Měření bylo provedeno po zahřívacím cyklu stroje.

Použitá aparatura: PULSE, ADASH, LION Precision



Měření s aparaturou Lion proběhlo na otáčkách:

Tabulka 5-9 Výpis měřených otáček (ot/min) pro měření přesnosti chodu vřetena za rotace

M3										
100	1500	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500	15000
M4 - opačný chod vřetena										
4500	10500	15000								

5.2.2. Kovosvit MCU 700V-5X

Jedná se o pětiosé obráběcí centrum s horním gántry a dvourychlostním vřetenem. Stroj je vzhledem k poměru výkonu a otáček vhodný pro hrubování (označení POWER).

Tabulka 5-10 Parametry vřetena Kessler u stroje MCU 700v-5X

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
elektrovřeteno	Kessler	281 915	10 000 ot/min	20/26 kW



Obrázek 5-7 Pětiosé obráběcí centrum MCU 400V-5X

Měření bylo provedeno po zahřívacím cyklu stroje.

Použitá aparatura: PULSE, ADASH, LION Precision

Měření s aparaturou Lion proběhlo na otáčkách:



Tabulka 5-11 Měřené otáčky (ot/min) aparaturou Lion na stroje MCU 700V-5X

M3									
100	1500	3000	4500	6000	7500	8000	9000	10000	
M4 - opačný chod vřetena									
4500	8000	10000							

5.2.3. Kovosvit MCV 1270

Stroj MCV 1000 je tříosá horizontální frézka (obr. č. 5-6) s dvoustupňovým vřetenem Kovosvit s řemenovým převodem. Stroj má označení POWER a je určený pro hrubování.

Tabulka 5-12 parametry vřetena Kovosvit u stroje MCV 1270

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
s řemenovým převodem	Kovosvit	625L/532	8 000 ot/min	28/43 kW



Obrázek 5-8 Frézka MCV 1270 s vřetenem Kovosvit

Měření bylo provedeno po zahřívacím cyklu stroje.



Použitá aparatura: PULSE, ADASH, LION Precision

Měření s aparaturou Lion proběhlo na otáčkách:

Tabulka 5-13 Měřené otáčky (ot/min) aparaturou Lion na stroje MCV 1270

M3						
100	1500	3000	4500	6000	7500	8000
M4 - opačný chod vřetena						
4500	8000					



5.3. Měření RCMT

V rámci DP byly změřeny dostupné stroje ve výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii ČVUT. U strojů byly měřeny rozběhové testy aparaturou PULSE s nastavením dle kapitoly 5.1.1.

5.3.1. TAJMAC- ZPS MCFV 5050 LN (LM1)

Jedná se o tříosý frézovací stroj s vřetenem Kessler.

Tabulka 5-14 Parametry vřetena Kessler pro stroj LM1

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
elektrovřetenem	Kessler	-	15 000 ot/min	18 kW



Obrázek 5-9 Stroj Tajmac LM1

Měření bylo provedeno po dvaceti minutovém zahřívacím cyklu stroje.

Použitá aparatura: PULSE



5.3.2. Haas TM1

Stroj Haas TM1 je tříosá horizontální frézka (obr. č. 5-9) s vřetenem s řemenovým převodem.

Parametry vřetena:

Tabulka 5-15 Parametry vřetena frézky Haas TM1

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
s řemenovým převodem	Haas	-	4 000 ot/min	4 kW



Obrázek 5-10 Frézka Haas TM1

Měření bylo provedeno po dvaceti minutovém zahřívacím cyklu stroje.

Použitá aparatura: PULSE



5.3.3. Kovosvit MCVL 1000

Stroj Kovosvit MCVL je tříosá horizontální frézka (obr. č. 5-10) s elektrovřetenem Kessler.

Parametry vřetena:

Tabulka 5-16 Parametry vřetena Kessler u stroje MCVL 1000

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
elektrovřeteno	Kessler	-	42 000 ot/min	20 kW



Obrázek 5-11 Frézka Kovosvit MCVL 1000

Měření bylo provedeno po dvaceti minutovém zahřívacím cyklu stroje. Krok otáček byl vzhledem k vysokým maximálním otáčkám změněn na 200 ot/min. Maximální otáčky při měření byly nastaveny na 40 000 ot/min.

Použitá aparatura: PULSE



5.3.4. Emco turn 342

Emco turn 342 je malý soustruh s CNC řízením (obr. č. 5-11).

Parametry vřetena:

Tabulka 5-17 Parametry vřetena stroje Emco turn 342

Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
s řemenovým převodem	Emco	-	4 000 ot/min	10 kW



Obrázek 5-12 Soustruh Emco turn 342

Měření bylo provedeno po třiceti minutovém zahřívacím cyklu stroje. Maximální měřené otáčky při měření byly na žádost Ing. Petra Konečného, Ph.D. sníženy na 3000 ot/min

Použitá aparatura: PULSE



6. Vyhodnocení a porovnání

V této kapitole je uvedeno vyhodnocení měřených strojů z kapitoly č. 5. Stroje budou vyhodnoceny pomocí naprogramované aplikace (kap. č. 4). K vyhodnoceným strojům budou uvedeny výsledky vyhodnocení měření z vytvořené aplikace pro všechny osy. Z těchto výsledků budou vybrány grafy pro osy, která má největší hodnotu RMS ve frekvenčním rozsahu 10 -1000 Hz. Zbylé grafy budou uvedeny v příloze. V příloze na CD jsou vytvořené protokoly ke každému stroji. Každé měření je uloženo v DB, která se také nachází v příloze na CD. V poslední části této kapitoly je porovnání strojů měřené v K-MAS (kap. č. 6.3).

6.1. Měřené stroje v KOVOSVITU MAS

Pro měření vibrací strojů měřených v K-MAS bylo použito aparatury PULSE a ADASH. Měření je vyhodnoceno oběma přístroji. Uvedené grafy jsou z měření přístrojem PULSE.

Dále byla u těchto strojů měřena přesnost chodu vřetena za rotace přístrojem LION Precision. K této části měření je uvedena tabulka jednoho měření a graf celkových chyb. Zbylé tabulky a grafy naleznete v příloze DP, anebo v příloze na CD.

K těmto strojům byl vypracován PROTOKOL O ZKOUŠCE v rámci zvyklostí zkušební laboratoře VCSVTT, který je k nahlédnutí v archívu ZL. Ukázka z tohoto protokolu je na obr. č. 6-1.



ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ VCSVTT



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ

Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii | VCSVTT

Horská 3, 128 00 Praha 2 | TEL 221 990 933 | p.chvojka@rcmt.cvut.cz | www.rcmt.cvut.cz/zkuslab

PROTOKOL O ZKOUŠCE

Zkouška: **Měření přesnosti chodu vřetena za rotace, diagnostická měření**
Zákazník: **KOVOSVIT MAS, a.s. Nám. T. Bati 419, 392 01 Sezimovo Ústí**
Místo zkoušky: **KOVOSVIT MAS, a.s. Nám. T. Bati 419, 392 01 Sezimovo Ústí**
Typ stroje: **Vertikální frézka MCV 1000 s vřetenem Step-Tec**
Výrobní číslo: **Stroj: 16A10526, vřeteno: 6045.0018**

Datum zkoušky: 27.05.2015	Datum a místo vystavení protokolu: 08.06.2015, Praha	Číslo protokolu: 17-2015
-------------------------------------	--	------------------------------------

Použité měřicí metody: ISO 230-7, MP-01-01, ČSN 20 0065, MP-05-02

Použitá měřidla: K měření byla použita pouze ověřená nebo kalibrovaná měřidla.

- aparatura LION Precision

- aparatura B&K PULSE

Teplota prostředí: teplota prostředí nebyla měřena

Postup zkoušky: Dle ISO 230-7 a bylo provedeno měření přesnosti chodu vřetena za rotace, při jeho rozběhu s krokem 1500 ot/min, v rozsahu 100 – 15 000 ot/min.

Dle ČSN 20 0065, MP-05-02, byly měřeny vibrace vřetene na statoru.

Flexibilita: neaplikována

Výsledky zkoušky včetně nejistot měření:

1) měření přesnosti chodu vřetena za rotace:

Z měřených hodnot je patrné, že vřeteno má stabilní chod v celém otáčkovém spektru. Na přesnost chodu za rotace nemá vliv volba směru otáčení vřetene.

Největší celková chyba v axiálním směru je 10,9 μm při 12 000 ot/min. Ve směru radiálním 9,2 μm při 13 500 ot/min.

2) měření vibrací na nerotujících částech:

Měření vibrací dle normy ČSN 20 0065 bylo provedeno pro otáčky od 500 [ot/min] do 15 000 ot/min s krokem 100 ot/min. Maximální naměřená hodnota pro RMS 1 kHz je v ose X pro otáčky 14200 ot/min s hodnotou 0,47 mm/s. Vřeteno je ve velmi dobrém stavu, řádně vyváženo.

Na základě dohody se zákazníkem nebyla pro tuto zkoušku stanovena nejistota měření.

Výsledky zkoušky zajišťované subdodavatelsky: žádné

Měřil a protokol vypracoval: Ing. Petr Chvojka, Ph.D. Podpis:

Samuel Petr Podpis:

Technický vedoucí laboratoře: Ing. Petr Chvojka, Ph.D. Podpis:

Vedoucí laboratoře: Ing. Petr Kolář, Ph.D. Podpis:

Adresa pro reklamace: zkuslab@rcmt.cvut.cz

Tento protokol o zkoušce nesmí být bez písemného schválení zkušební laboratoře shora uvedené rozmnožován jinak než celý!



6.1.1. MCV 1000, Step-Tec, 15.000



Vyhodnocení vibrací:

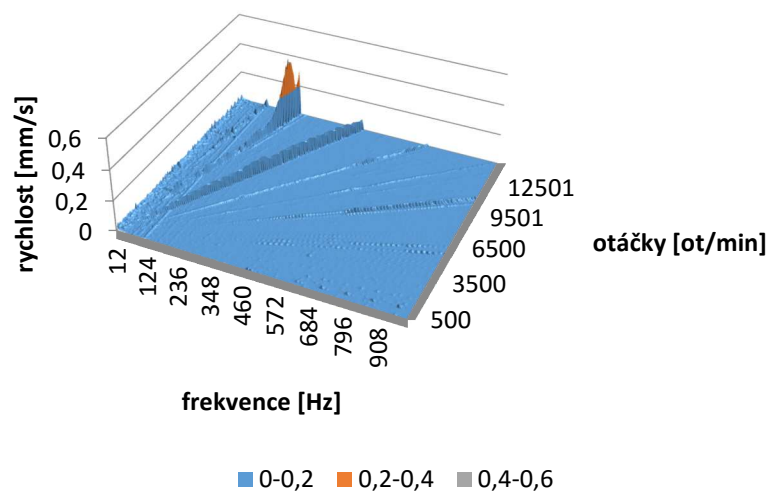
Tabulka 6-1 Vyhodnocení stroje MCV 1000 dle norem

	Určení třídy stroje: 2		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,46	0,13	0,11
Hodnocení stroje:	A	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	14001	14999	13900
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,46	0,13	0,11
Hodnocení stroje:	A	A	A
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,46	0,14	0,12
Hodnocení stroje:	A	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	14001	14999	13900
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,14	0,1	0,05
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

Z vyhodnocení stroje je patrné, že osa s největší hodnotou RMS 10 Hz – 1 kHz je osa X. Pro tuto osu jsou dále uvedené grafy vibrací.

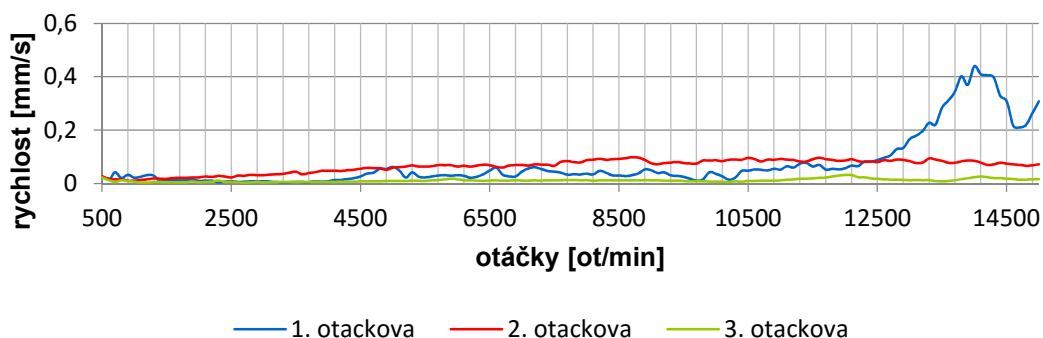


3D Graf naměřených dat - osa: X - PULSE



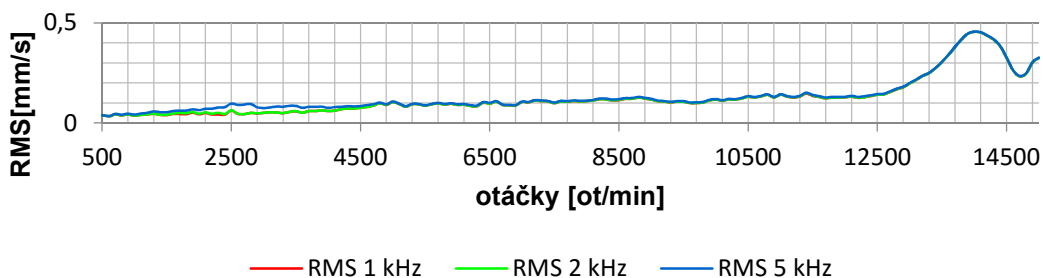
Graf 6-1 3D Graf naměřených hodnot osy X frézky MCV 1000

Graf řez otáčkovou frekvencí - osa: X - PULSE



Graf 6-2 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy X frézky MCV 1000

Graf RMS - osa: X - PULSE



Graf 6-3 Graf hodnot RMS osy X frézky MCV 1000



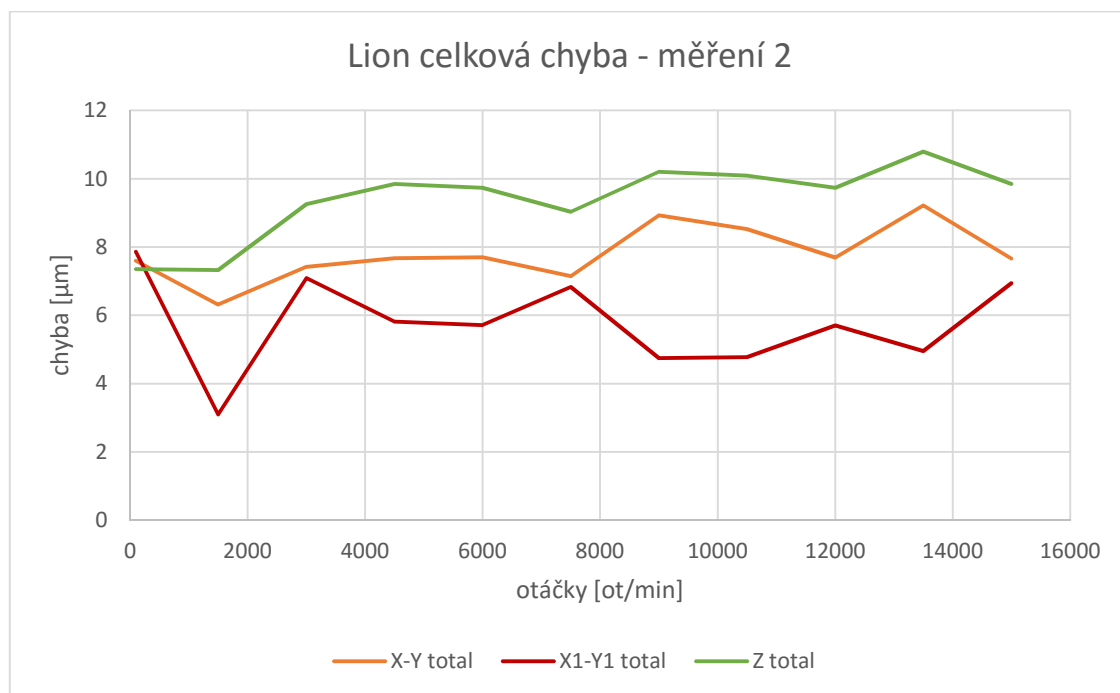
Hodnocení vibrací:

Na ose X je do 12 500 ot/min první otáčková frekvence menší než druhá otáčková frekvence. Vzhledem k velmi nízkým celkovým hodnotám vibrací lze říci, že vřeteno je velmi dobře vyváжено. Od 12 500 ot/min se projevuje nárůst první otáčkové frekvence. Vzhledem k tomu, že tento jev není patrný na ose Y (graf v příloze), je možné tento nárůst vysvětlit konstrukcí stroje a vřeteníku. Při vyhodnocení stroje dle norem dosáhl stroj nejlepších hodnot s velkou rezervou. Rozdíl mezi RMS 1 kHz a RMS 5 kHz je minimální, což znamená, že další násobky otáčkové frekvence jsou zanedbatelné.

Vyhodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Tabulka 6-2 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Step-Tec na stroji MCV 1000 – měření č. 2

Měření 2												
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500	15000
X-Y	Synchronní	6,82	4,95	5,11	5,51	5,69	5,57	6,63	5,87	5,88	5,86	6,3
	Asynchronní	1,33	2,07	3,73	4,73	3,88	3,73	3,85	4,59	2,99	4,88	3,47
	Celková	7,6	6,31	7,42	7,67	7,7	7,15	8,93	8,53	7,69	9,22	7,66
X1-Y1	Synchronní	6,77	2,13	2,6	3,04	3,34	3,9	4,45	1,89	2,82	2,54	3,77
	Asynchronní	1,51	1,78	4,99	4,65	4,41	3,79	3,3	4,6	4,02	3,71	3,76
	Celková	7,86	3,1	7,09	5,82	5,71	6,83	4,75	4,78	5,7	4,95	6,94
Z	Fundamentální	6,09	6,14	6,31	6,39	6,67	6,68	6,49	6,85	7,28	7,09	7,11
	Residuální	0,21	0,18	0,83	1,55	1,77	0,63	1,28	0,54	0,93	0,78	0,77
	Asynchronní	1,19	1,42	3,24	3,49	2,57	2,55	2,75	2,79	2,52	2,75	2,32
	Celková	7,35	7,33	9,26	9,85	9,73	9,03	10,2	10,09	9,73	10,79	9,85



Graf 6-4 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 2, stroj MCV 1000

Hodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Z měřených hodnot je patrné, že vřeteno je stabilní v celém otáčkovém spektru. Volba směru otáčení vřetene nemá na jeho přesnost vliv (příslušné tabulky jsou uvedeny v příloze).

Největší celková chyba v axiálním směru je $10,9 \mu\text{m}$ při $12\,000 \text{ ot/min}$. Ve směru radiálním $9,2 \mu\text{m}$ při $13\,500 \text{ ot/min}$. V axiálním směru převládá chyba synchronní nad chybou asynchronní. V této synchronní složce tvoří podstatnou část fundamentální chyba, spjatá s otáčkovou frekvencí. Ve směru radiálním je v rovině X-Y výraznější chyba synchronní. V rovině X1-Y1 je tomu naopak. Rozdíly však nejsou výrazné.

6.1.2. MCU 700V-5X, Kessler 10.000



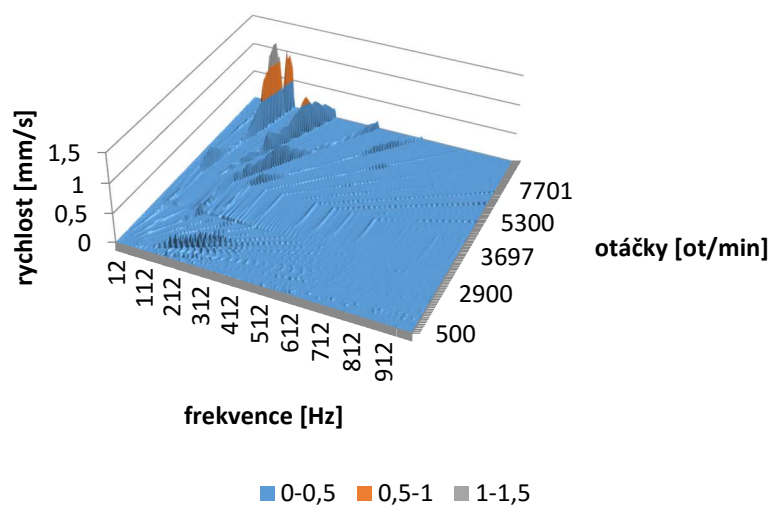


Vyhodnocení vibrací:

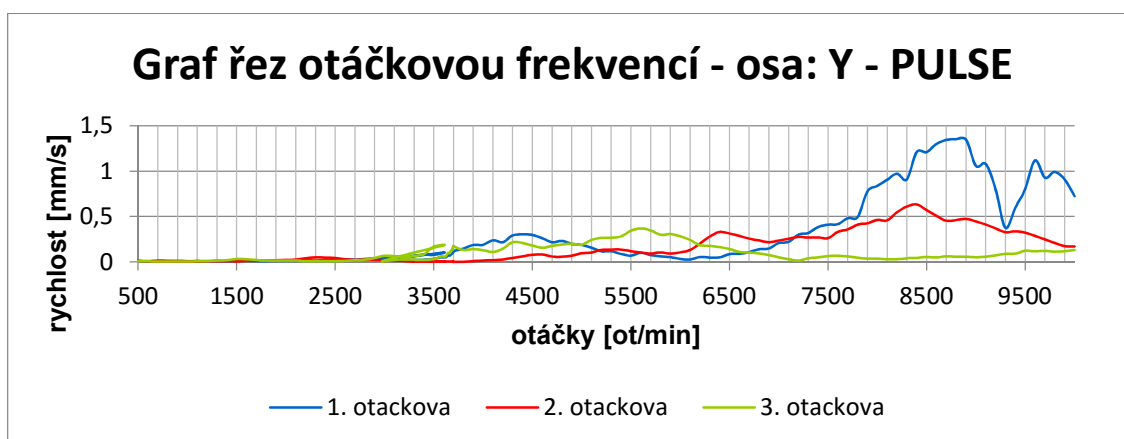
Tabulka 6-3 Vyhodnocení stroje MCU 700 dle norem

	Určení třídy stroje: 2		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,93	1,56	0,47
Hodnocení stroje:	A	B	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	8200	8800	10001
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,93	1,56	0,47
Hodnocení stroje:	A	B	A
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,93	1,56	0,48
Hodnocení stroje:	B	C	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	8200	8800	10001
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,36	0,56	0,26
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

3D Graf naměřených dat - osa: Y - PULSE



Graf 6-5 3D Graf naměřených hodnot osy Y frézky MCU 700V-5X



Graf 6-6 graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky MCU 700V-5X

Graf 6-7 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCU 700V-5X

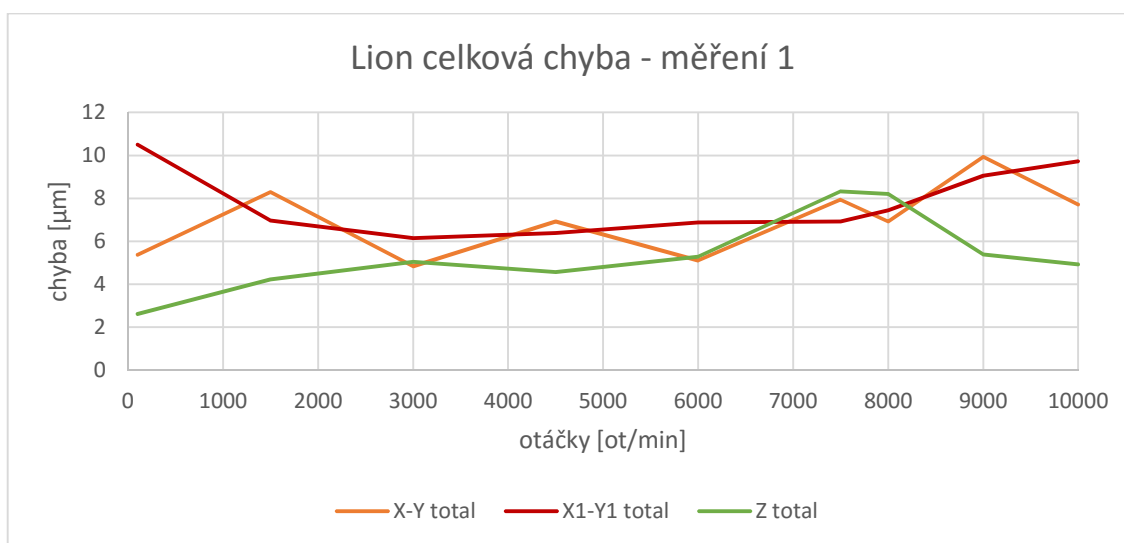
Hodnocení vibrací:

Vřeteno stroje MCU 700 je elektrovřeteno firmy Kessler s dvoustupňovou převodovkou. Při překročení 3500 ot/min se zařadí druhý rychlostní stupeň. To lze vidět i na uvedených grafech. Dle vypracovaného vyhodnocení je patrné, že stroj má nejhorší vibrace vřetena v ose Y. Od 7 000 ot/min se zvyšují hodnoty rychlosti vibrací na prvních dvou otáčkových frekvencích. První otáčková frekvence roste rychleji než druhá otáčková frekvence. Vzhledem ke zvýšené první otáčkové frekvence ve všech osách, lze konstatovat, že vřeteno je mírně nevyvážené.

Vyhodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Tabulka 6-4 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Kessler na stroji MCU 700 – měření č. 1

Měření 1										
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000	9000	10000
X-Y	Synchronní	5	5,81	2,75	4,54	4,23	6,06	5,57	8,37	5,12
	Asynchronní	0,92	4,28	3,54	4,49	2,48	2,76	2,45	3,64	4,23
	Celková	5,37	8,29	4,83	6,93	5,1	7,93	6,92	9,94	7,71
X1-Y1	Synchronní	10,12	5,74	4,39	4,07	5,76	5,23	5,82	6,64	6,77
	Asynchronní	0,72	4	4,03	4,22	3,66	2,81	2,79	3,5	5,07
	Celková	10,5	6,97	6,15	6,39	6,88	6,93	7,44	9,06	9,72
Z	Fundamentální	2,13	2,11	1,96	2,04	3,25	3,74	5,14	3,04	2,48
	Residuální	0,29	0,76	1,76	0,84	2,02	3,5	2,69	1,11	0,99
	Asynchronní	0,48	1,89	3,02	2,56	2,2	2,31	2,09	2,59	2,39
	Celková	2,61	4,22	5,04	4,57	5,28	8,33	8,21	5,39	4,93



Graf 6-8 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 1 stroj, MCU 700

Hodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Z měření přesnosti chodu vřetena za rotace je patrné, že největší přesnost stroj dosahuje uprostřed otáčkového spektra. V tomto rozsahu otáček se chyba pohybuje pod 7 μm . Největší naměřená chyba je v radiálním směru, 10,5 μm při 100 ot/min a 9,9 μm při 9 000 ot/min. V axiálním směru dostáhla největší chyba hodnot 8,3 μm při 7 500 ot/min.

Přesnost vřetena je zatížena spíše chybou synchronní nad chybou asynchronní. Toto tvrzení potvrzuje dříve uvedený závěr, že vřeteno je mírně nevyvážené. Na přesnost vřetena nemá vliv směr otáčení.



6.1.3. MCV 1270, Kovosvit 8.000



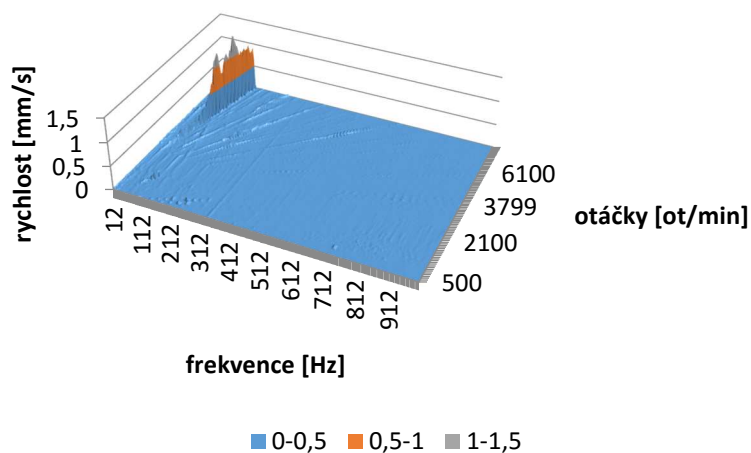
Vyhodnocení vibrací:

Tabulka 6-5 Vyhodnocení stroje MCV 1270 dle norem

	Určení třídy stroje: 2		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	1,49	0,29	0,3
Hodnocení stroje:	B	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	6799	6599	4299
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Hodnota RMS [mm/s]:	1,49	0,29	0,3
Hodnocení stroje:	B	A	A
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	1,49	0,3	0,3
Hodnocení stroje:	C	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	6799	6599	4299
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,58	0,14	0,18
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

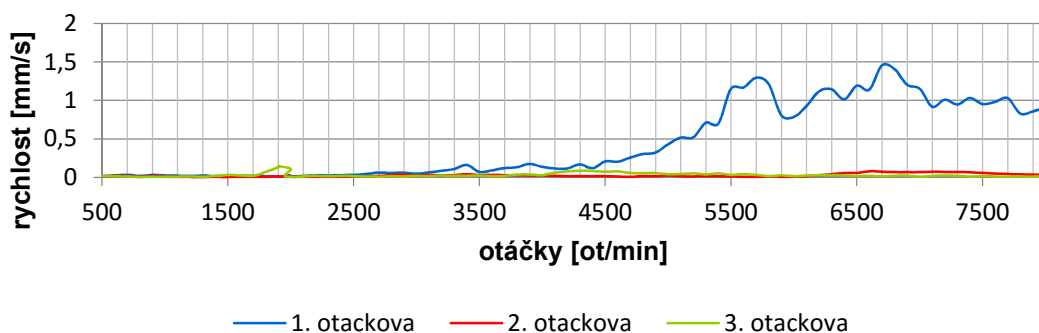


3D Graf naměřených dat - osa: X - PULSE



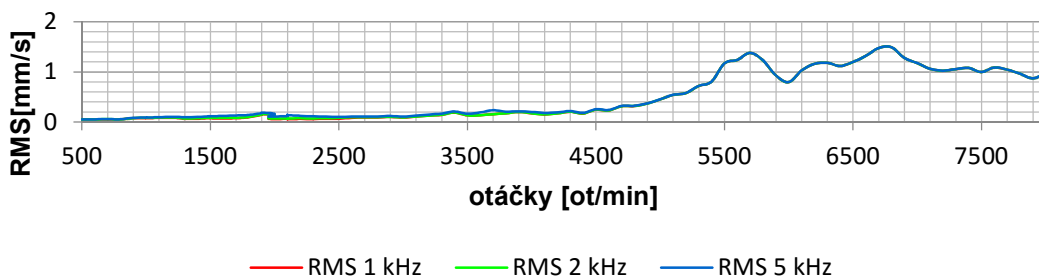
Graf 6-9 3D graf naměřených hodnot osy X frézky MCV 1270

Graf řez otáčkovou frekvencí - osa: X - PULSE



Graf 6-10 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy X frézky MCV 1270

Graf RMS - osa: X - PULSE



Graf 6-11 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCV 1270



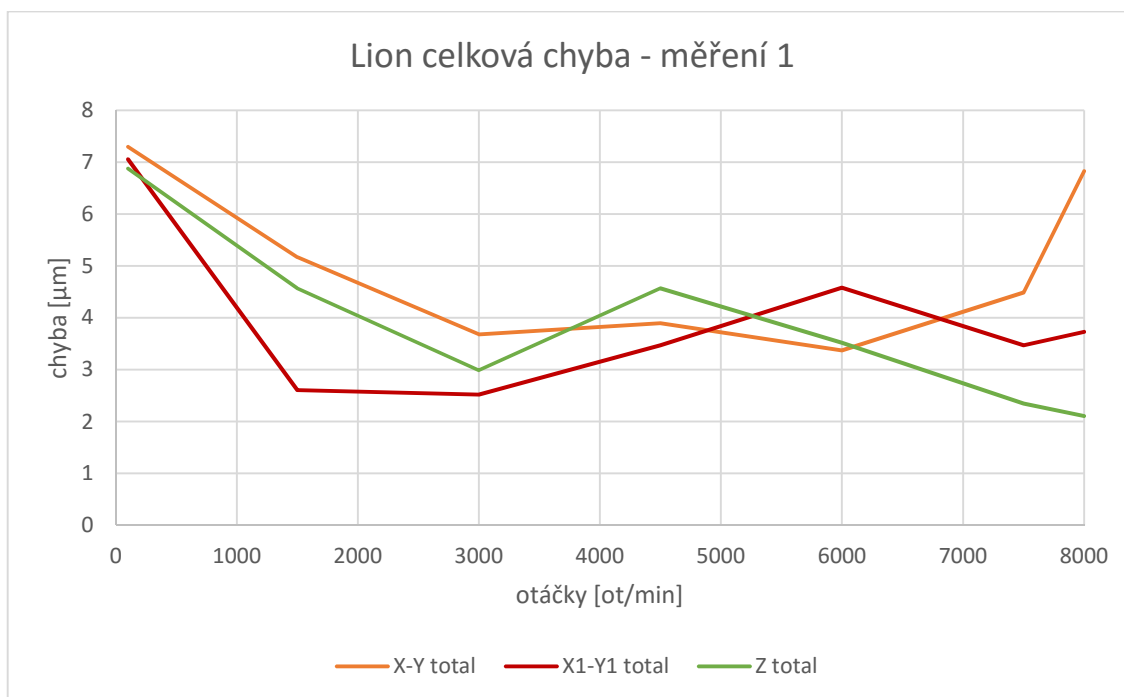
Hodnocení vibrací:

Vřeteno stroje MCV 1270 je s řemenovým převodem od firmy Kovosvit MAS s dvoustupňovou převodovkou. Při překročení 2500 ot/min se zařadí druhý rychlostní stupeň. Dle vypracovaného vyhodnocení je patrné, že stroj má nejhorší vibrace vřetena v ose X. Od 4 500 ot/min se zvyšují hodnoty rychlosti vibrací v ose X na první otáčkové frekvenci. V ose Y lze vidět nárůst druhé otáčkové frekvence s vrcholem na 5 600 ot/min. Na této ose mírně stoupá i třetí otáčková frekvence. V Ose Z je výrazné zvýšení první otáčkové frekvence již od 3 100 ot/min. Hodnoty RMS osy Y a Z dosahují maximálních hodnot 0,3 mm/s. Na ose X je maximální hodnota RMS 1 kHz 1,49 mm/s což značí, že tato osa je ovlivněna konstrukcí vřeteníku a stroje a mírnou nevývahou vřetena.

Vyhodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Tabulka 6-6 Výsledky měření přesnosti chodu vřetena za rotace vřetena Kessler na stroji MCV 1270 – měření č. 1

		Měření 1						
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000
X-Y	Synchronní	8,88	2,01	2,09	2,43	1,41	2,38	2,13
	Asynchronní	0,65	4,59	2,08	2,18	2,63	2,47	5,64
	Celková	7,3	5,17	3,68	3,9	3,37	4,49	6,83
X1-Y1	Synchronní	6,6	1,68	1,73	2,39	2,05	2,33	1,85
	Asynchronní	0,56	1,17	1,4	1,55	2,38	1,48	1,99
	Celková	7,06	2,61	2,52	3,47	4,58	3,47	3,73
Z	Fundamentální	5,69	3,38	3,04	1,92	0,99	0,28	1,04
	Residuální	1,43	1,27	1,19	1,74	1,75	1,08	0,67
	Asynchronní	0,47	0,76	0,8	1,31	1,12	0,81	1,11
	Celková	6,88	4,57	2,99	4,57	3,52	2,35	2,11



Graf 6-12 Celkové chyby u měření přesnosti chodu vřetena za rotace - měření č. 1, stroj MCV 1270

Hodnocení přesnosti chodu vřetena za rotace:

Z měření přesnosti chodu vřetena za rotace je patrné, že největší přesnost stroj dosahuje uprostřed otáčkového spektra. V tomto rozsahu otáček se chyba pohybuje pod $5 \mu\text{m}$. Největší naměřená chyba je v radiálním směru, $7,1 \mu\text{m}$ při 100 ot/min a $6,8 \mu\text{m}$ při $8\,000 \text{ ot/min}$. V axiálním směru je nejvyšší nepřesnost $6,9 \mu\text{m}$ při 100 ot/min . Druhá nejvyšší hodnota je $4,6 \mu\text{m}$ při $4\,500 \text{ ot/min}$.

Celková chyba je rovnoměrně rozložena mezi chybu synchronní a chybu asynchronní v radiálním směru. Ve směru axiální je chyba složená převážně z chyby synchronní. Na přesnost vřetena nemá vliv směr otáčení.



6.2. Měřené stroje v RCMT

Stroje měřené v RCMT jsou stroje v různé fázi živostnosti a opotřebení. U těchto strojů byly měřeny pouze vibrace aparaturou PULSE. Výsledky měření byly zpracovány programem na vyhodnocení měření a ke každému stroji byl vytvořen v tomto programu protokol a přílohy k protokolu. Výsledky vyhodnocení byly uloženy do DB. V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledky měření dle norem a grafy vibrací k ose s největší hodnotou RMS 10 Hz – 1kHz. Grafy ke zbylým osám jsou uvedeny v příloze. Protokoly a jejich přílohy jsou uvedeny v příloze na CD.



6.2.1. *TAJMAC- ZPS MCFV 5050 LN (LM1), Kessler 15.000*



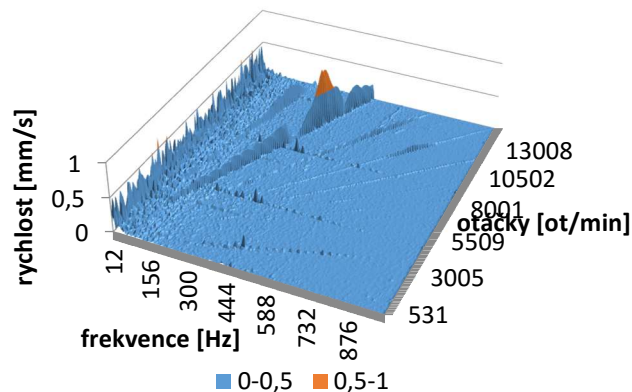
Vyhodnocení vibrací:

Tabulka 6-7 Vyhodnocení stroje LM1 dle norem

	Určení třídy stroje: 2		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	1,02	1,14	0,32
Hodnocení stroje:	A	B	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	5401	11808	12003
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Stroj nespĺňuje kritérium maximálních otáček			
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	1,11	1,14	0,32
Hodnocení stroje:	B	B	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	5401	11808	12003
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,32	0,54	0,19
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

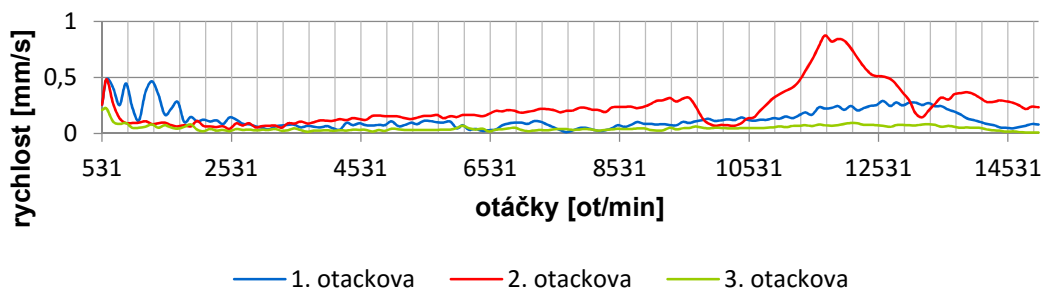


3D Graf naměřených dat - osa: Y - PULSE



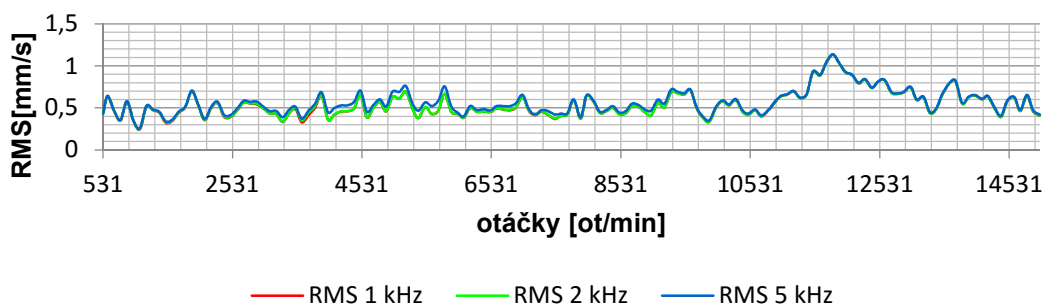
Graf 6-13 3D graf naměřených hodnot osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN

Graf řez otáčkovou frekvencí - osa: Y - PULSE



Graf 6-14 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN

Graf RMS - osa: Y - PULSE



Graf 6-15 Graf hodnot RMS osy Y frézky Tajmac-ZPSMSFV 5050 LN

Hodnocení vibrací:

Nejvyšší hodnota RMS je na ose Y. Hodnota RMS se pohybuje okolo hodnoty 0,5 mm/s do 10 000 ot/min, s následným růstem do hodnoty 1,14 mm/s na 11 800 ot/min.



Zvýšená hodnota RMS je způsobena zvýšením druhé otáčkové frekvence. Tato chyba může být způsobena vybuzením rezonanční frekvence. Na ose X jsou výrazné špičky na první otáčkové frekvenci na otáčkách 5 400 ot/min a 7 600 ot/min. Na ose Z je nejvyšší hodnota RMS 1 kHz 0,32 mm/s při 12 000 ot/min s výraznou chybou na druhé otáčkové frekvenci. Vzhledem k použitému elektrovřetenu Kessler je stav vřetena zhoršený oproti novému vřetenu. Je doporučeno stav vřetena sledovat a změřit vřeteno obálkovou metodou.

6.2.2. Haas TM1, Haas 4.000



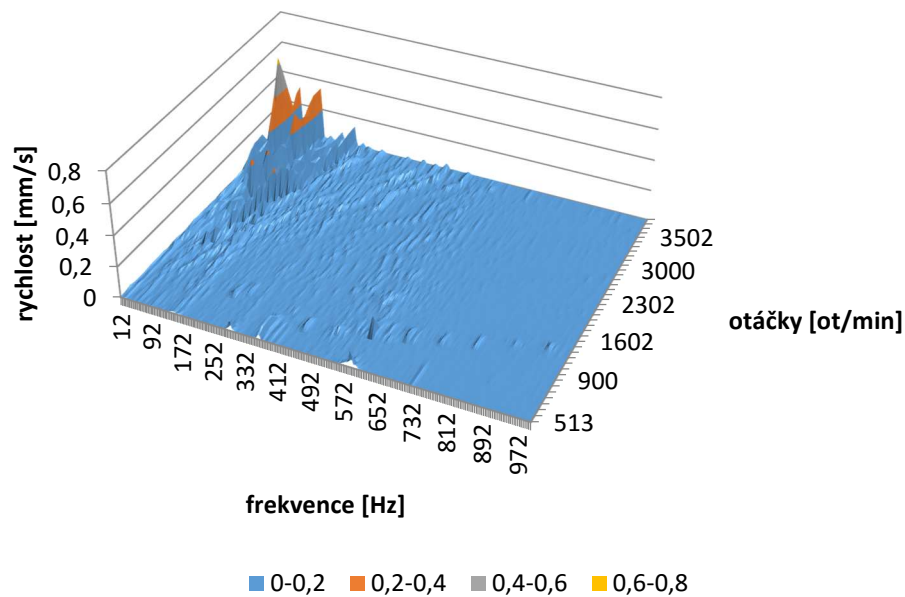
Vyhodnocení vibrací:

Tabulka 6-8 Vyhodnocení stroje Haas dle norem

	Určení třídy stroje: 1		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,37	0,43	0,77
Hodnocení stroje:	A	A	B
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	3603	3203	3401
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Stroj nesplňuje kritérium minimálního výkonu			
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,37	0,43	0,77
Hodnocení stroje:	A	A	B
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	3603	3203	3401
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,15	0,2	0,25
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

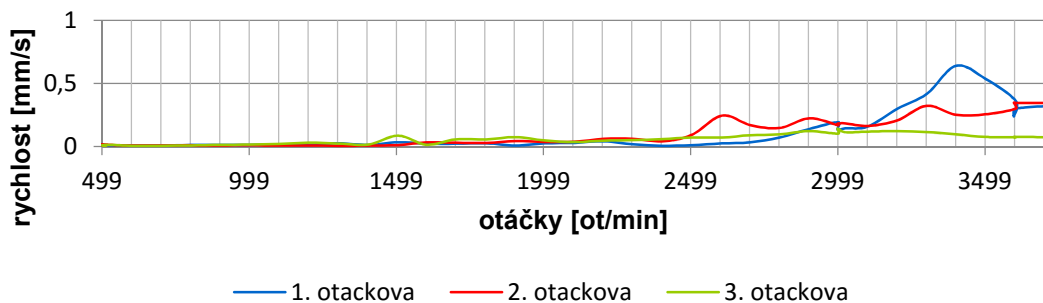


3D Graf naměřených dat - osa: Z - PULSE



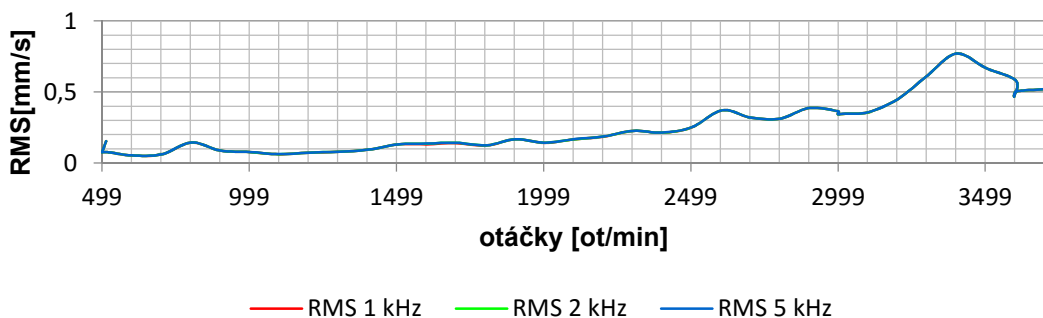
Graf 6-16 3D graf naměřených hodnot osy Z frézky Haas TM1

Graf řez otáčkovou frekvencí - osa: Z - PULSE



Graf 6-17 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Z frézky Haas TM1

Graf RMS - osa: Z - PULSE



Graf 6-18 Graf hodnot RMS osy Z frézky Haas TM1



Hodnocení vibrací:

Nejvyšších hodnot RMS dosahuje stroj v ose Z s vrcholem na 3 400 ot/min. Dosažená hodnota RMS 10 Hz – 1 kHz je 0,77 mm/s a je způsobena první otáčkovou frekvencí. Nárůst je pravidelný bez výrazných skoků. U měření stroje se projevuje horší otáčková regulace, kdy stroji před zvýšením otáček nejprve otáčky mírně klesnou (viz grafy v příloze). Hodnoty RMS osy X a Y jsou na nízké úrovni.

6.2.3. Kovosvit MCVL 1000, Kessler 42.000



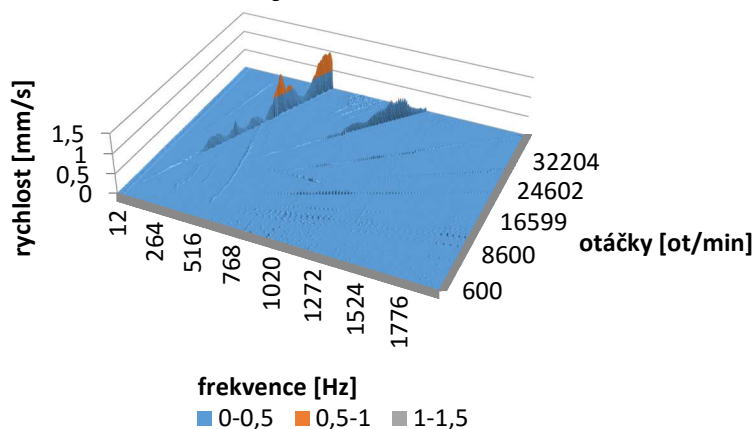
Vyhodnocení vibrací:

Tabulka 6-9 Vyhodnocení stroje MCVL 1000 dle norem

Určení třídy stroje: 2			
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,67	1,14	0,54
Hodnocení stroje:	A	B	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	30600	29604	29604
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Stroj nesplňuje kritérium maximálních otáček			
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Vřeteno nesplňuje kritérium maximálních otáček			
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,3	0,38	0,2
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12

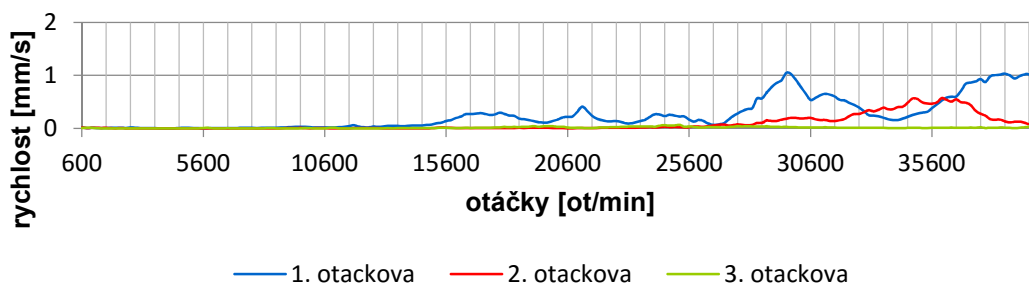


3D Graf naměřených dat - osa: Y - PULSE



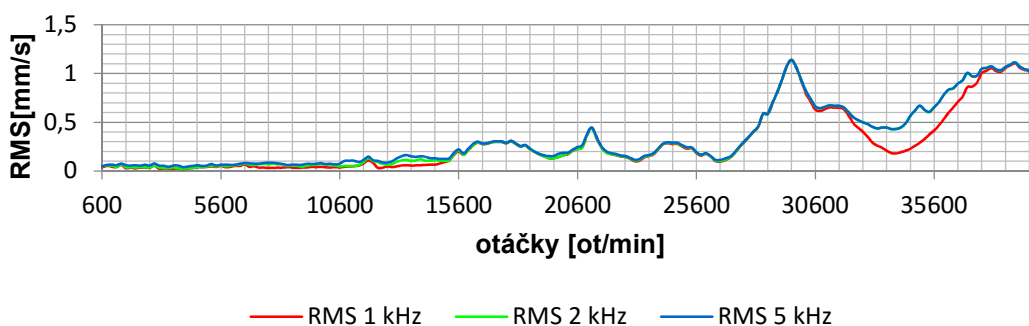
Graf 6-19 3D graf naměřených hodnot osy Y frézky MCVL 1000

Graf řez otáčkovou frekvencí - osa: Y - PULSE



Graf 6-20 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Y frézky MCVL 1000

Graf RMS - osa: Y - PULSE



Graf 6-21 Graf hodnot RMS osy Y frézky MCVL 1000

Hodnocení vibrací:

Nejvyšší hodnoty RMS jsou na ose Y s hodnotou 1,14 mm/s při 29 600 ot/min. Hodnoty RMS mají vrchol na všech osách na 30 000 ot/min. Tyto hodnoty jsou



způsobeny 1 otáčkovou frekvencí. Od 28 000 ot/min je na všech osách patrný nárůst druhé otáčkové frekvence s vrcholem na 34 000 ot/min. Při takto vysokých otáčkách to způsobuje zvýšenou hodnotu RMS 10 Hz – 5k Hz, což je patrné i na grafu 6-21. Vzhledem k velmi vysokým otáčkám vřetena, je vřeteno v dobrém stavu.

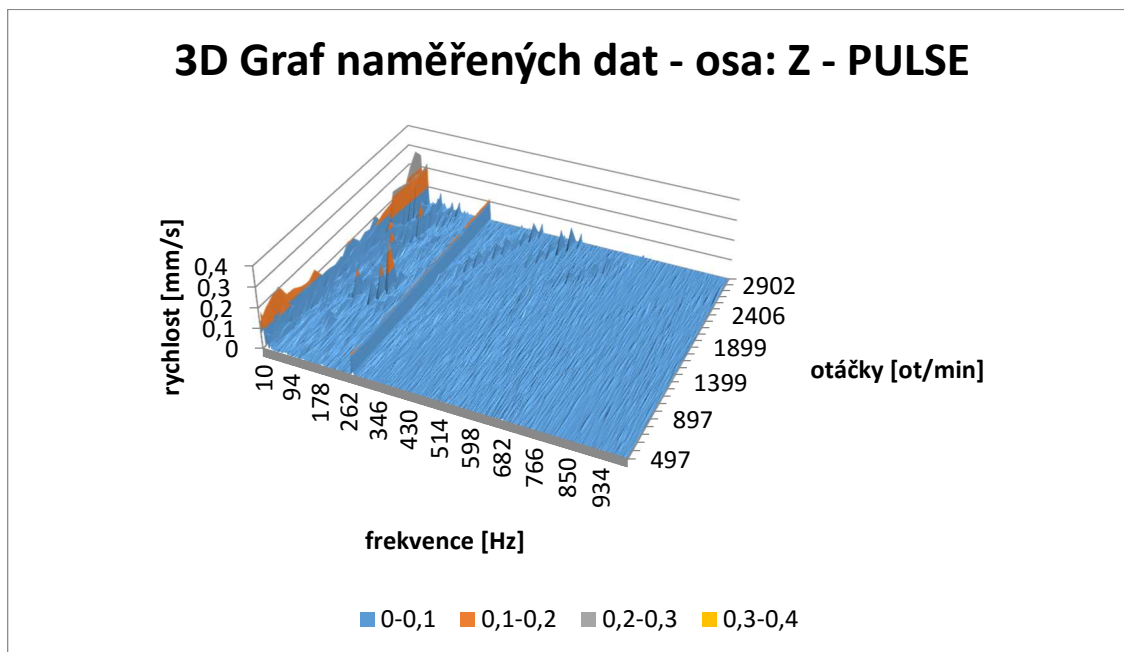
6.2.4. Emco turn 342, Emco 3.000



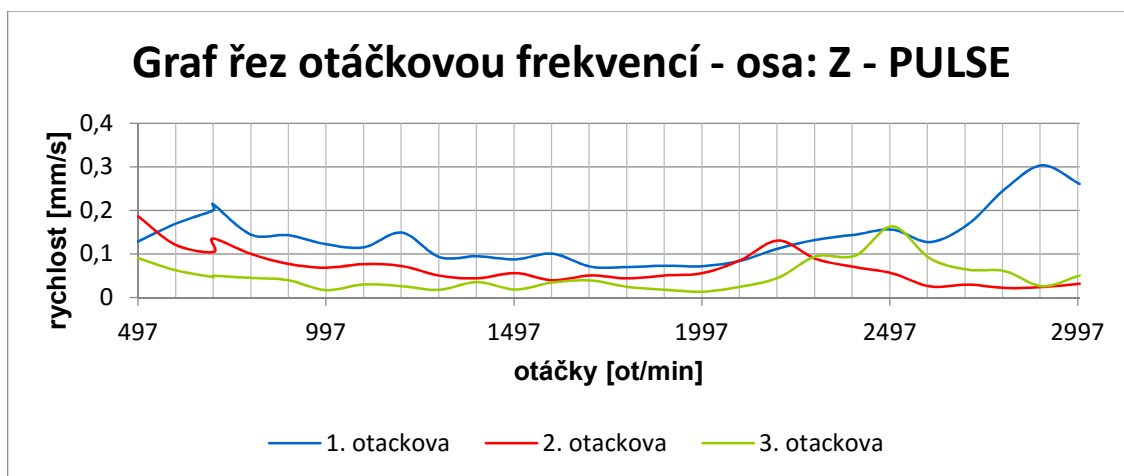
Vyhodnocení vibrací:

Tabulka 6-10 Vyhodnocení stroje Emco dle norem

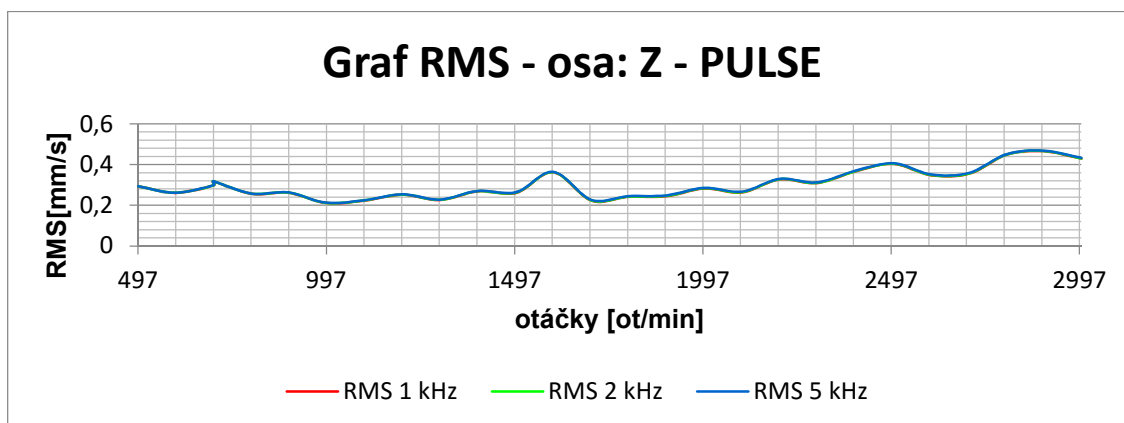
	Určení třídy stroje: 1		
	OSA X	OSA Y	OSA Z
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-1			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,35	0,29	0,47
Hodnocení stroje:	A	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	2201	1899	2902
Vyhodnocení podle normy: ČSN ISO 10816-3			
Stroj nesplňuje kritérium max. otáček nebo výkonu			
Vyhodnocení podle normy: NWIP - 10			
Hodnota RMS [mm/s]:	0,36	0,29	0,47
Hodnocení stroje:	A	A	A
Hodnota RMS MAX pro [ot/min]:	2201	1899	2902
Vyhodnocení podle normy: ČSN 20 0065			
Hodnocení stroje:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Hodnota RMS [mm/s]:	0,24	0,21	0,32
Mezní hodnota:	1,12	1,12	1,12



Graf 6-22 3D graf naměřených hodnot osy Z soustruhu Emco turn 342



Graf 6-23 Graf řezem otáčkovou frekvencí osy Z soustruhu Emco turn 342



Graf 6-24 Graf hodnot RMS osy Z soustruhu Emco turn 342



Hodnocení vibrací:

Hodnoty RMS na všech osách stroje jsou vyrovnané bez výrazné špičky. Podíl první, druhé a třetí otáčkové frekvence je na celkovou hodnotu RMS v osách Y a Z vyrovnaný. V ose X je při 1500 ot/min výrazná první otáčková frekvence. V celém otáčkovém spektru stroje je na frekvenci 274 Hz špička rychlosti vibrací. Ta je způsobena horší regulací otáček. Špička vzniká v okamžiku, kdy stroj zvyšuje rychlost otáčení vřetene.



6.3. Porovnání strojů měřených v Kovosvitu MAS

V této kapitole budu porovnávat stroje měřené v Kovosvitu MAS. Porovnání bude:

- a) podle přesnosti chodu vřetena za rotace
- b) podle vibrací

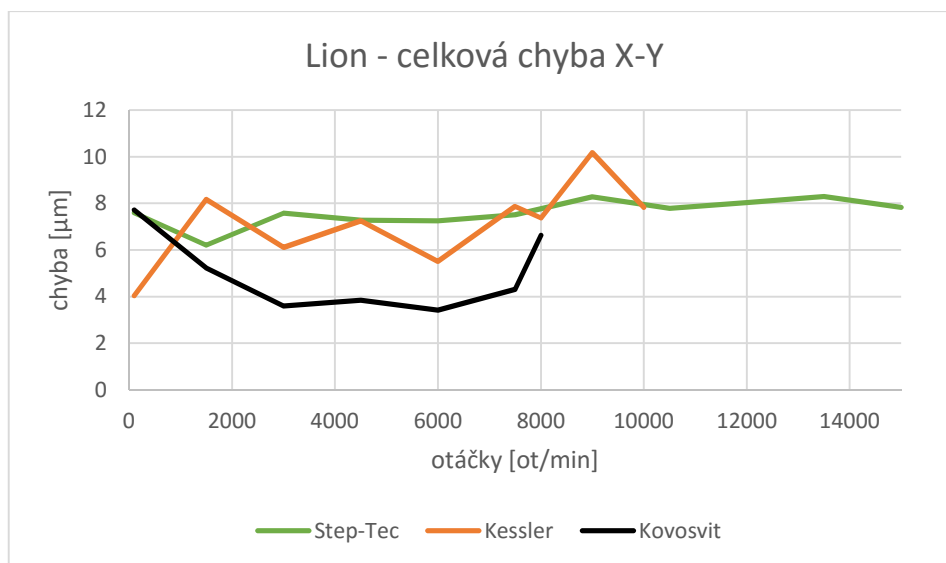
Vzhledem k charakteristice vřeten se nejedná o zcela porovnatelná vřetena. Vřeteno Step-Tec je vhodné pro dokončovací operace (stroj s označením SPEED). Vřetena Kessler a Kovosvit jsou vřetena vhodná pro hrubování. Tato dvě vřetena jsou navzájem dobře porovnatelná. Tomu odpovídají i parametry otáček a výkonu a dvourychlostní řazení.

Tabulka 6-11 tabulka parametrů porovnaných vřeten

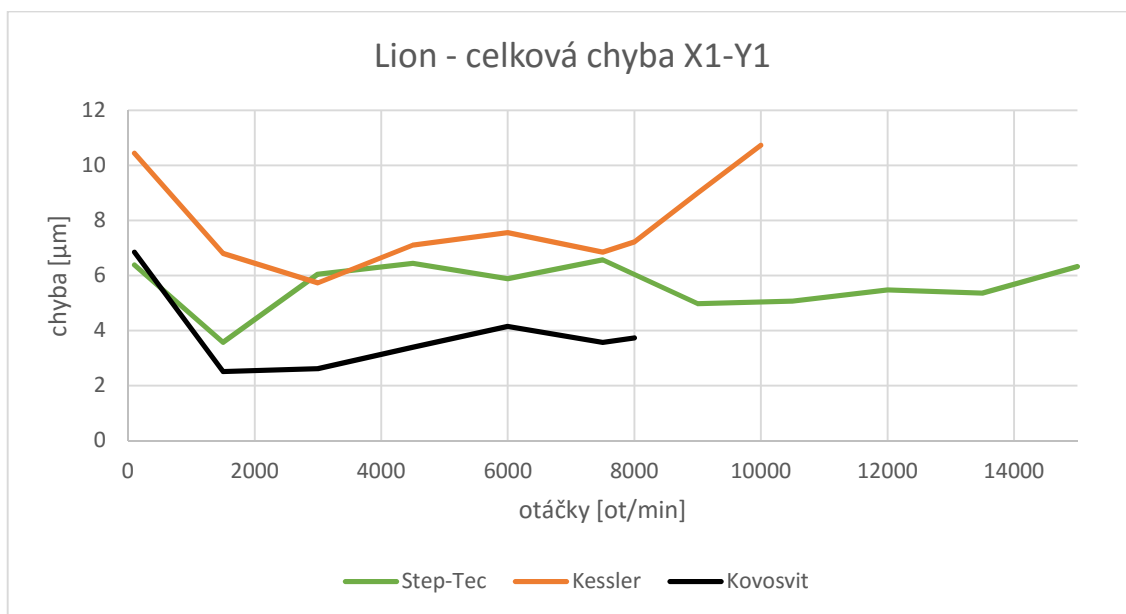
Typ	Výrobce	Výrobní číslo	Max. otáčky	Příkon
elektrovřeteno	Step-Tec	6045.0018	15 000 ot/min	30 kW
elektrovřeteno	Kessler	281 915	10 000 ot/min	20/26 kW
s řemenovým převodem	Kovosvit	625L/532	8 000 ot/min	28/43 kW

6.3.1. Porovnání dle přesnosti chodu vřetena za rotace

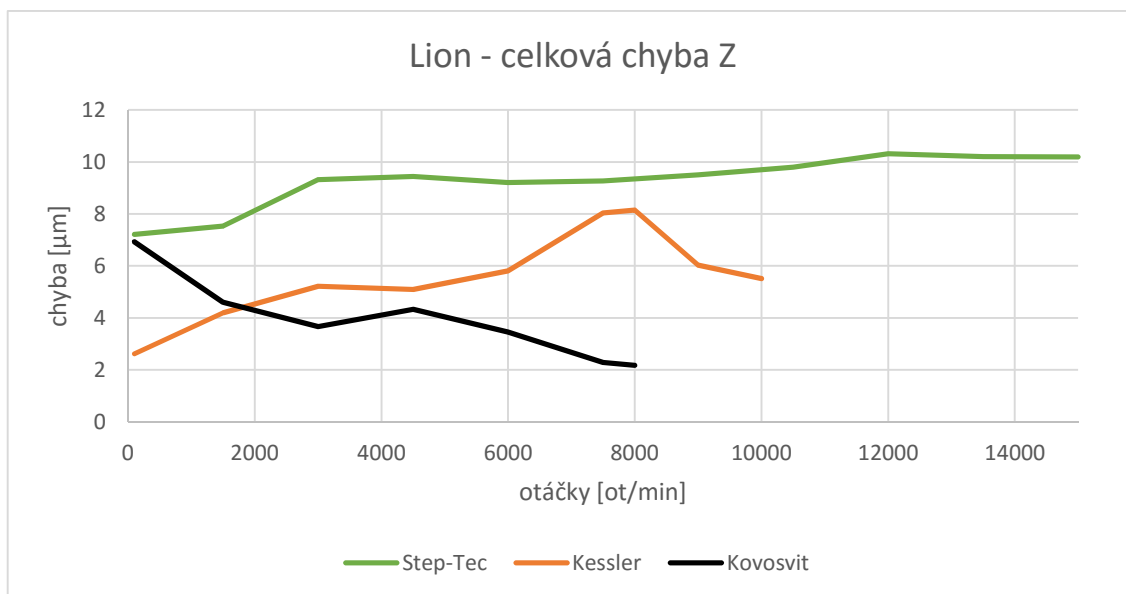
V následujících grafech jsou uvedeny průměrné hodnoty z obou měření celkových chyb podle rovin měření.



Graf 6-25 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v radiálním směru rovina X-Y



Graf 6-26 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v radiálním směru rovina X1-Y1



Graf 6-27 porovnání vřeten K-MAS - celková chyba v axiálním směru rovina Z

Porovnání strojů:

Z grafů 6-25 až 6-27 vyplývá, že podle měření přesnosti chodu vřetena za rotace je nejpresnější vřeteno od firmy Kovosvit MAS.

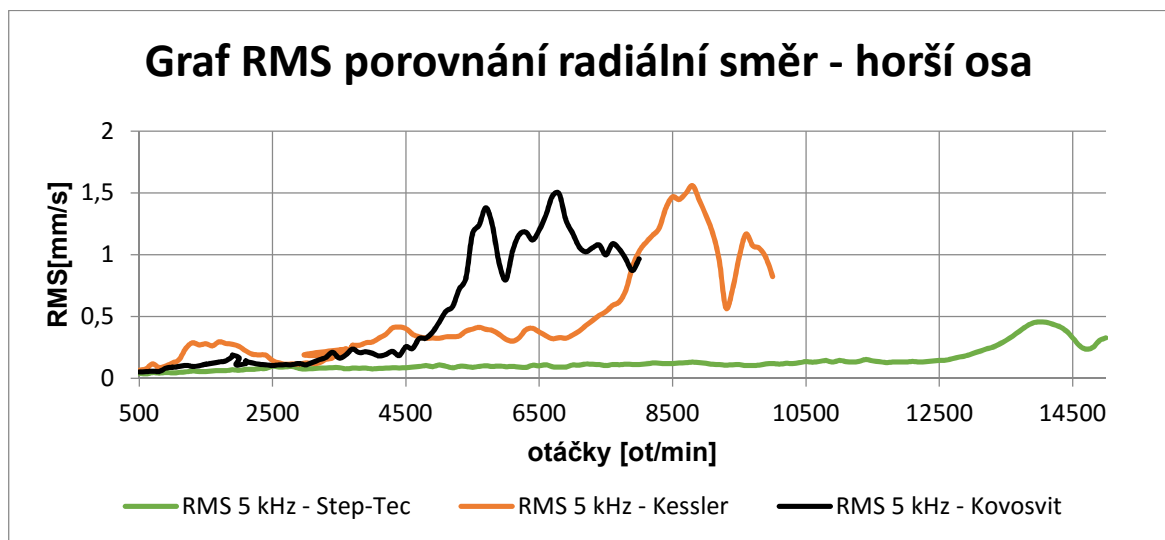
Vřeteno K-MAS má největší chybu na minimálních otáčkách. Tato chyba klesá a po dosažení 3 000 ot/min se chyba vřetena ustálí. V rovině X-Y je nárůst chyby od 7 500 ot/min do 8 000 ot/min. Vřeteno má nejmenší chybu ve všech měřených rovinách.



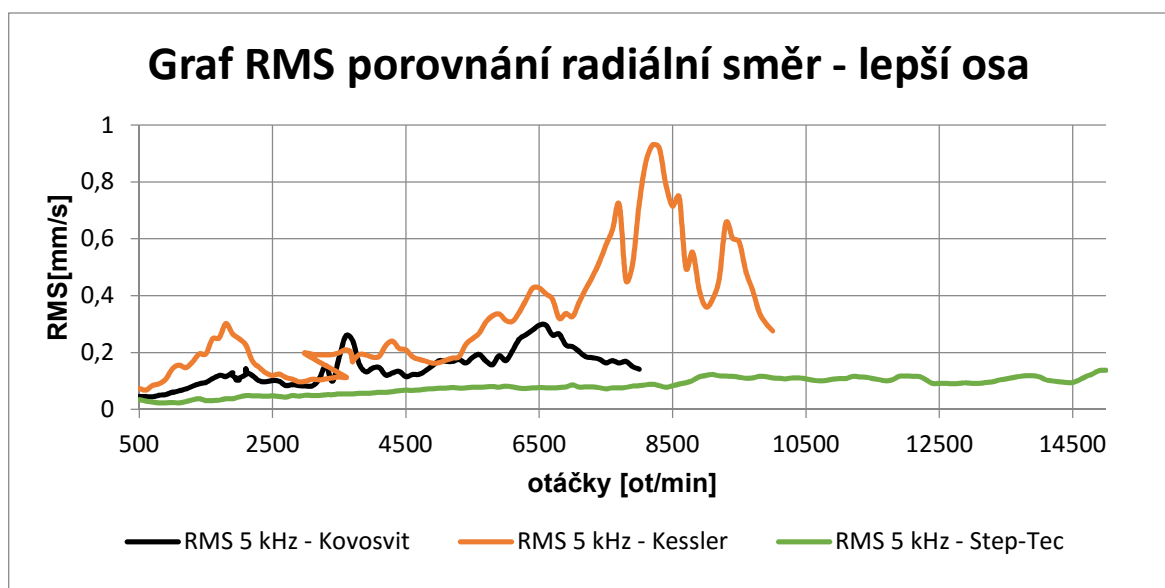
Vřeteno Kessler, které je parametry podobné s vřetenem Kovosvit, má horší přesnost (viz grafy). V radiálním směru má vřeteno přesnost od 4 μm do 11 μm . Ve směru axiálním je největší chyba při 8,15 μm .

Vřeteno Step-Tec je podle parametrů a určení výrobce vhodné pro dokončovací operace. Ve všech měřených rovinách dosahuje vřeteno lineárního průběhu chyby bez výrazných špiček. Nejhorších výsledků dosahuje vřeteno v axiálním směru. V tomto směru je změřená nepřesnost výrazně horší než u zbylých dvou vřeten. V radiálním směru jsou dosažené hodnoty porovnatelné s vřetenem Kessler, které dosahuje menší přesnosti.

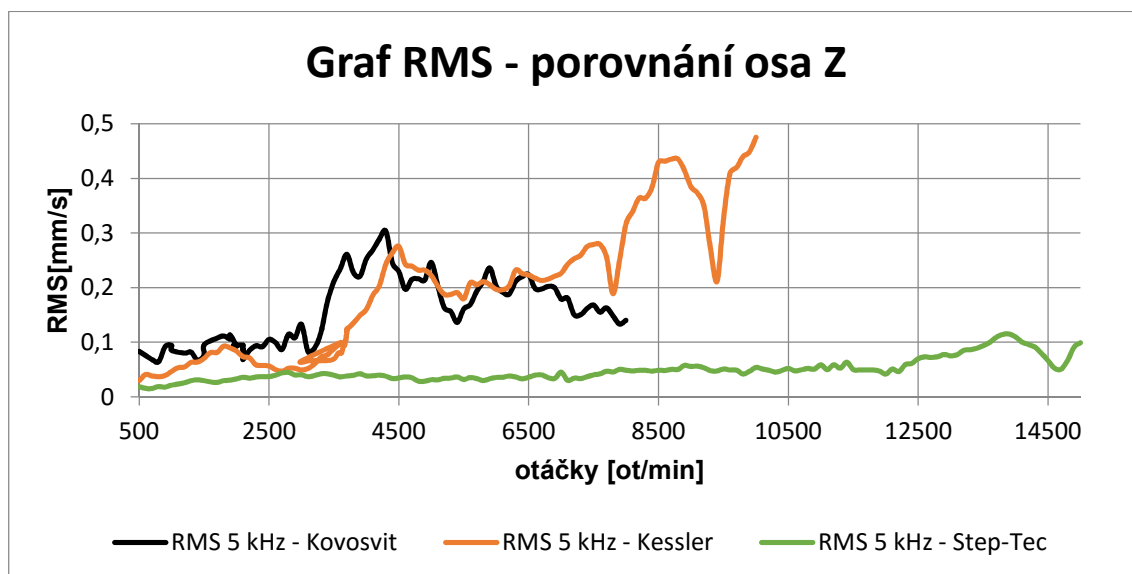
6.3.2. Porovnání dle vibrací



Graf 6-28 porovnání vřeten graf RMS - radiální směr horší osy



Graf 6-29 porovnání vřeten graf RMS - radiální směr lepší osy



Graf 6-30 porovnání vřeten graf RMS - axiální směr

Porovnání strojů:

Z hlediska vibrací (grafy 6-28 až 6-30) má jednoznačně nejlepší hodnoty vřeteno Step-Tec.

Vřeteno Step-Tec má v celém spektru otáček malé hodnoty RMS s vrcholem na 14 100 ot/min na osách X a Z. V ose Y se RMS hodnoty konstantně zvětšují od minimálních otáček po maximální, bez výrazných špičkových hodnot.

Při porovnání vřetena Kovosvit s vřetenem Kessler jsou hodnoty RMS vřetena Kovosvit nižší, než u vřetena Kessler. Tento rozdíl je nejlépe vidět na grafu 6-29. V axiálním směru jsou hodnoty RMS při stejných otáčkách velmi podobné.

6.3.3. Celkové zhodnocení strojů

Z hlediska vibrací je nejlepším vřetenem Step-TEC, přičemž má ovšem nejhorší přesnost chodu. Je ovšem nutné si uvědomit, že hodnoty celkových chyb do 10 μ m jsou pro frézovací vřetena dobrým výsledkem. Nejistota měření se ze zkušeností pohybuje v rozmezí $\pm 2\mu$ m. Z tohoto důvodu dáváme větší váhu měření vibrací pomocí akcelerometru. Podíváme-li se na vřeteno Step-TEC, průběh vibrací i přesnosti chodu je v celém otáčkovém rozsahu nejstabilnější, nevykazuje výrazná zvýšení způsobená přechody přes rezonance (navíc budící síly mají nižší úroveň). Vřetena Kovosvit MAS a Kessler jsou přibližně na stejné úrovni.



7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit aplikaci na automatizované vyhodnocení dat vibrační diagnostiky a ověření této aplikace na reálných měřeních. V počátku tvorby práce byla zvolena metodika řešení zadání. Na základě této metodiky byly cíle této diplomové práce úspěšně splněny. Aplikace umožňuje vyhodnocovat naměřená data z přístroje Adash VA4 (ve vlastnictví Kovosvit MAS) a Multianalyzátoru Bruel&Kjaer Pulse (ve vlastnictví RCMT). Aplikace bude bezplatně k dispozici na obou pracovištích.

V rešeršní části této práce jsem se věnoval druhům působící síly, definováním měřených veličin a jejich matematickým popisem. Následně jsem popsal měřící hardware a zpracování signálu z akcelerometru až po FFT analýzu. V poslední části rešerše jsem popsal metody měření (přesnost chodu vřetena za rotace a rozběhové testy) a vyhodnocení měření dle vybraných norem.

Před tvorbou aplikace bylo třeba zajistit import dat a testovací data pro aplikaci. Z tohoto důvodu mi byl společností Kovosvit MAS zapůjčen přístroj pro měření a analýzu vibrací ADASH VA4. V kapitole č. 3 popisují měření s přístrojem ADASH VA4 na různých strojích, která sloužila jako testovací data pro tvorbu aplikace.

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit aplikaci na automatizované vyhodnocení dat s výstupem v produktu MS Office. K tomuto účelu jsem vybral programovací jazyk VBA, který je součástí MS Office. Výhody této aplikace jsou zejména:

- a) dostupnost na PC s MS Office
- b) není nutné vlastnit licenci placených programovacích jazyků, např. MATLAB
- c) možnost použití bez HW klíče
- d) rychlé vyhodnocení měření
- e) přehledné grafické prostředí
- f) vyhodnocení měření dle norem
- g) tvorba protokolu
- h) tvorba přehledných grafů
- i) uložení měření do databáze
- j) v případě potřeby je možno přidat další metody vyhodnocení

Grafické prostředí je provedeno pomocí programu MS Excel, ve kterém jsou ovládací prvky aplikace. Samotná aplikace je pro přehlednost rozložena na více listech programu MS Excel, ve kterých se spouští jednotlivé části programu.



Aplikace vyhodnocuje měření vibrací rozběhových / doběhových testů a pro vstup slouží data z analyzátoru, která analyzátor zpracoval pomocí FFT. Program je navržen pro zpracování rychlosti vibrací, které vyhodnocuje pomocí norem:

- a) ČSN ISO 10816-1
- b) ČSN ISO 10816-3
- c) NWIP 10
- d) ČSN 20 0065
- e) vyhodnocení dle Berryho

Aplikace byla rozšířena o možnost uložení měření do databáze. Výstupem z aplikace je protokol o měření s přílohou ve formě grafů, u kterých lze vybrat mezi dvěma verzemi.

V průběhu tvorby aplikace jsem se musel potýkat s několika složitějšími problémy. Šlo zejména o:

- a) práce ze soubory
- b) zajištění importu dat ze souboru
- c) práce s formuláři a ovládacími prvky OLE Automation
- d) návrh algoritmu pro určení vlastních frekvencí
- e) zobrazení otáčkové frekvence
- f) zpracování automatického vyhodnocení norem
- g) tvorba grafů pomocí MS Excelu
- h) propojení MS Excelu a MS Accessu
- i) ukládání dat do DB

Vytvořená aplikace byla otestována na měřeních, která byla provedena na strojích v Kovosvitu MAS a RCMT. Měření v Kovosvitu MAS bylo na žádost pracovníků firmy rozšířeno o měření přesnosti chodu vřetena za rotace aparaturou LION Precision, v tomto případě byla data vyhodnocována samostatně (aplikace není určena pro vyhodnocení tohoto typu měření).

Měření rychlosti vibrací bylo následně vyhodnoceno pomocí vytvořené aplikace, a ke každému stroji byl vytvořen protokol o měření. Tato měření byla uložena do databáze, která je součástí vytvořené aplikace. K měřením v Kovosvitu MAS byl navíc vypracován protokol o zkoušce v rámci zvyklostí akreditované Zkušební laboratoře VCSVTT.



Na konci této diplomové práce se, opět na žádost pracovníků firmy Kovosvit MAS věnuji porovnání mezi stroji měřenými v Kovosvitu MAS. Z tohoto porovnání vychází z hlediska vibrací nejlépe vřeteno firmy Step-Tec a z pohledu přesnosti chodu vřetena za rotace je nejlépe hodnoceno vřeteno firmy Kovosvit.



8. Obsah přílohy a použitý software

8.1. Obsah příloh

Přílohy k měřeným strojům:.....	2
MCV 1000, typ vřetene.....	2
Vibrace:	2
Přesnost chodu vřetena za rotace:	4
MCU 700V-5X	8
Vibrace	8
Přesnost chodu vřetena za rotace:	10
MCV 1270:	14
Vibrace:	14
Přesnost chodu vřetena za rotace:	16
LM1	20
vibrace.....	20
Haas.....	22
Vibrace	22
MCVL 1000	24
Vibrace	24
Emco.....	26
Vibrace	26

8.2. Seznam použitého softwaru

Microsoft Office Word 360 ProPlus	Textový editor
Microsoft Office Excel 360 ProPlus	Tabulkový editor
Microsoft Office Access 360 ProPlus	Databázový systém
Adobe Reader	PDF prohlížeč
Labshop	Měřicí program
Lion Spindle Error	Měřicí program
DDS 2011	Vyhodnocovací program
A4410 virtual unit	Virtuální analyzátor
Wolfram mathematica	Výpočtový software



9. Použitá literatura

- [1] BILOŠ Jan, BILOŠOVÁ Alena. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika. In: Studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, 2012. 142 s. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Copyright © Jan Biloš, Alena Bilošová © Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [2] RUSŇÁK Karel. Kinematika. In: Studijní materiály, Západočeská univerzita, fakulta aplikovaných věd, 2008. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYI1/nuc.kmity.pdf>
- [3] RAČEK Jiří. Lineární kmitání. In: Technická mechanika, Studijní materiály, Vysoké učení technické, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~kpellant/10%20Linearni%20Kmity.pdf>
- [4] FOJTŮ Petr. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění. In: STČ – Konference Studentské tvůrčí činnosti, 2009. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [5] Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement. Cepstrum analysis. In: Brüel & Kjær Beyond measure [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Copyright © Brüel & Kjær. All Rights Reserved. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/analysis-software/signal-analysis/cepstrum-analysis>
- [6] Podniková norma ev. č. 002 rev01 Vibrace točivých strojů. Platnost od 7. 11 2005. Schválil Jaromír Šilhan, dokument je majetkem ČEZ, a.s., [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z : <http://www.cez.cz/edee/content/file/kontakt/pn-0002.pdf>
- [7] BOŘIL Tomáš. Fourier Series 3D – demonstrace principu Fourierových řad. In: webové stránky Tomáš Bořil measure [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: http://www.tomasboril.cz/hobbies_programs.html
- [8] JAKSCH Ivan. Technická diagnostika – měření a diagnostika vibrací. In: učební text, Technická univerzita v Liberci, fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2010. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdq/P8_vibrace%20ESF.pdf



- [9] Fajar. A Brief Introduction to Vibration Analysis of Process Plant Machinery (VI). In: Vibration analysis, 2011. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: http://freevibrationanalysis.blogspot.cz/2011/08/brief-introduction-to-vibration_5714.html
- [10] Samuel Petr. Závěrečný projekt – kalibrace akcelerometrů, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů, 2015. Vedoucí projektu Ing. Petr Chvojka, Ph.D.
- [11] NĚMEC Miroslav. Časové vzorkování obrazového toku. In: Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2009. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Aleš Drastich, CSc. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17379
- [12] CHVOJKA Petr. Rozběhové (doběhové) testy vřeten In: Studijní materiály, České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, 2010. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD - 2351086/4 2 Vibro-Diagnostika - rozbehy_dobehy.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-_2351086/4_2_Vibro-Diagnostika_-_rozbehy_dobehy.pdf)
- [13] Fielding DSP. Alias- Free Harmonic Distortion. In: Reviver [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <https://www.fieldingdsp.com/alias>
- [14] BILOŠOVÁ, Alena. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: studijní opora. Vyd. 1. In: Studijní materiály, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2758-2. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2758-2.pdf>
- [15] MATHEY John. Aplitude And Energy Correction – A Brief Summary. In: Prosig Noise and Vibration Blog, [online]. 1. 9. 2009 [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: <http://blog.prosig.com/2009/09/01/amplitude-and-energy-correction-a-brief-summary/>
- [16] Mathuranathan. Window Function – An Analysis. In: gaussian Waves signal processing simplified, [online]. 10. 2. 2011 [vid. 10. 12. 2015]. Copyright © 2015. GaussianWaves. Dostupné z: <http://www.gaussianwaves.com/2011/02/window-functions-an-analysis/>
- [17] CHVOJKA Petr. Vibro-Diagnostika Zpracování signálu II. In: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, České vysoké učení technické v Praze,



fakulta strojní, 2010 [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD - 2351086/4_1_Vibro-Diagnostika_-_zpracovani_signalu_II.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-_2351086/4_1_Vibro-Diagnostika_-_zpracovani_signalu_II.pdf)

[18] ČSN ISO 230-7: Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace. 1. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[19] SLAVÍČEK, Josef. Měření vřeten obráběcích strojů pomocí bezkontaktních snímačů. In: Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky 2013. 121s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D., [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66726

[20] Verified Technologies, Inc. Measuring vibration sources (Harmonics). In: Brakeview, [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Copyright 2009 © Verified Technologies, Inc. Dostupné z: <http://www.brakeview.com/harmonics.html>

[21] ČSN 20 0065: Obráběcí stroje na kovy Metody měření a hodnocení mechanického kmitání. 1. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992.

[22] ISO 10816-1: Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice. 1. Praha: Český normalizační institut, 1998.

[23] 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 15000 1/min při měření in situ. 1. Praha: Český normalizační institut, 1999.

[24] Kreidl M., Šmíd R.: Technická diagnostika. BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6

[25] International standard NWIP-10: Machine tool spindles -- Evaluation of spindle vibrations by measurements on non-rotating parts -- Part 1: motor spindles measured at speeds between 600 r/min and 30000r/min supplied with rolling elements bearings

[26] Fajar. Window Shapefactor and Equivalent Noise Bandwidth, 2011. [online]. [vid. 10. 12. 2015]. Dostupné z: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/Subsystems/gui/content/windows_shapefactor_and_equiv_noisebw.htm



[27] The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI. In. National Instruments, [online]. 8. 6. 2009 [vid. 10. 12. 2015]. Copyright © 2015 National Instruments Corporation. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/4278/en/>

[28] Berry J.: Proven Method for Specifying Both Spectral Alarm Bands As Well As Narrowband Alarm Envelopes Using Today's Condition Monitoring Software Systems, SKF technology conference, San Diego California 2000

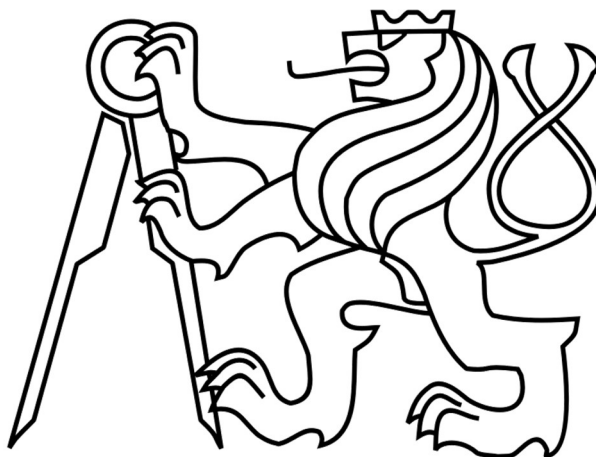
[29] Bach, Pavel. Perspektivy vývoje frézovacích vřeten: Future development of milling spindle. Praha: ČVUT, 2006, 26 s. ISBN 80-01-03437-2.

[30] Bach, Pavel a Stanislav Urbánek. Automatizace měření. Vyd. 1 Praha: ČVUT, 1993, 11 s. ISBN 80-01-00970-x.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



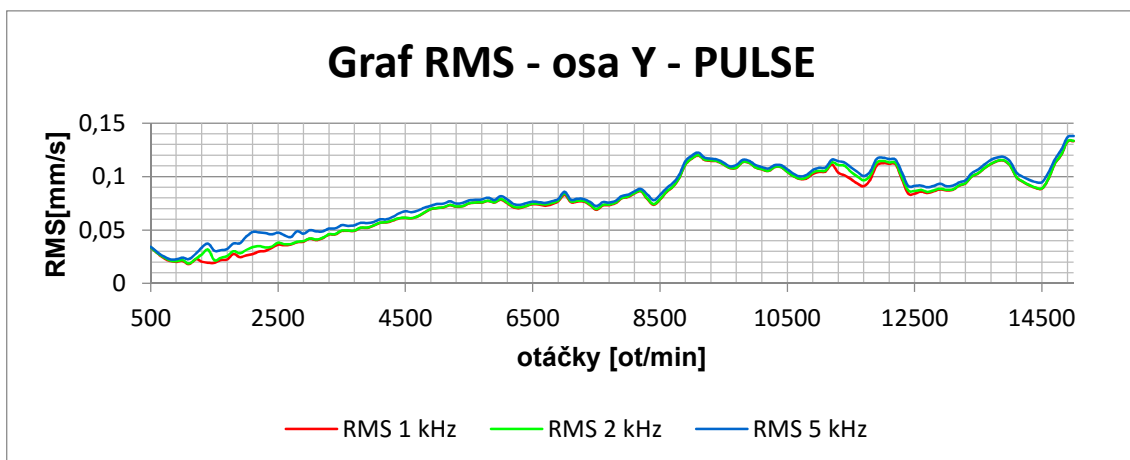
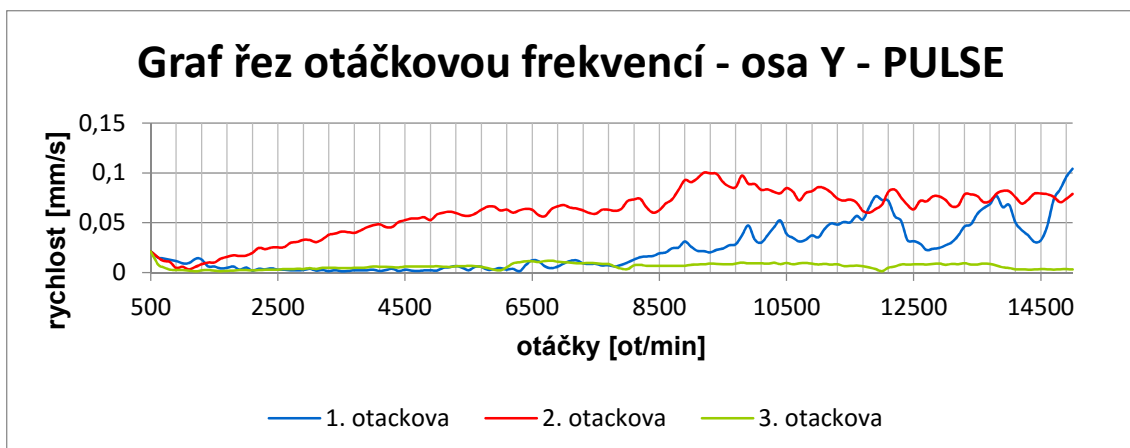
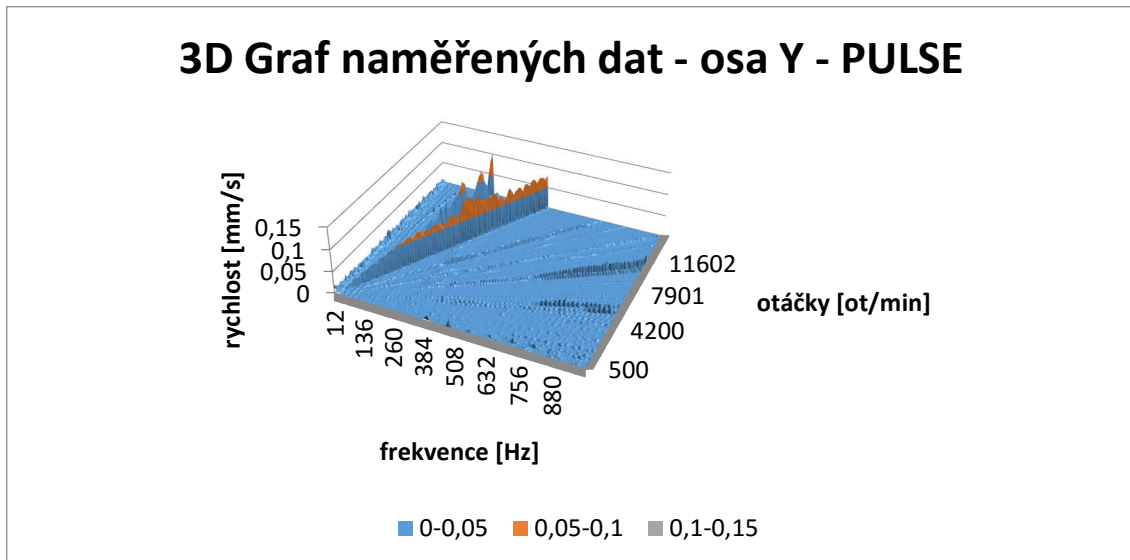
Přílohy k diplomové práci

**Automatizované vyhodnocení dat vibrační diagnostiky vřeten
obráběcích strojů**



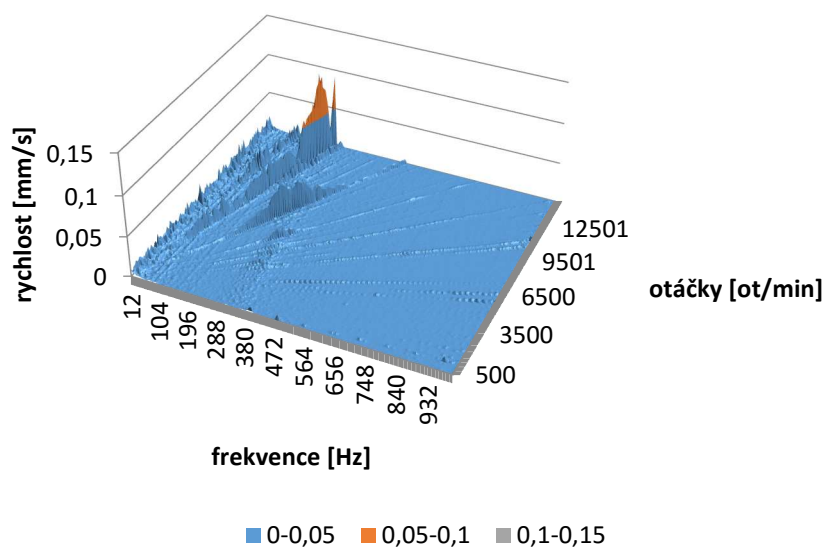
Přílohy k měřeným strojům: MCV 1000, typ vřetene

Vibrace:

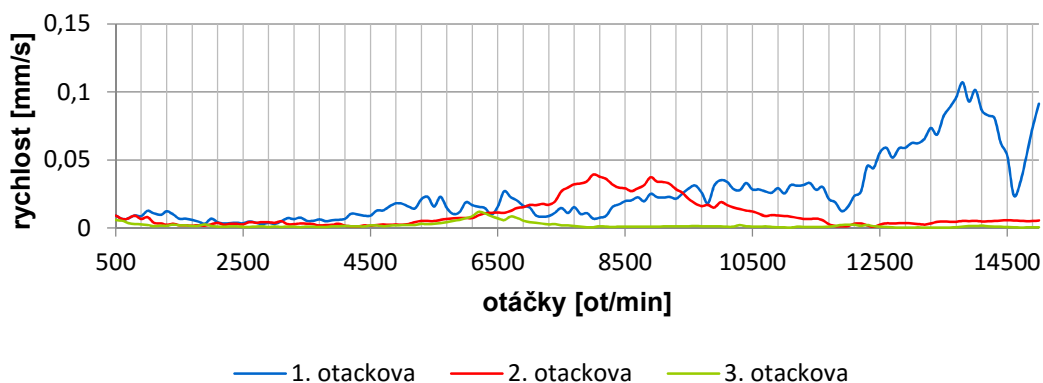




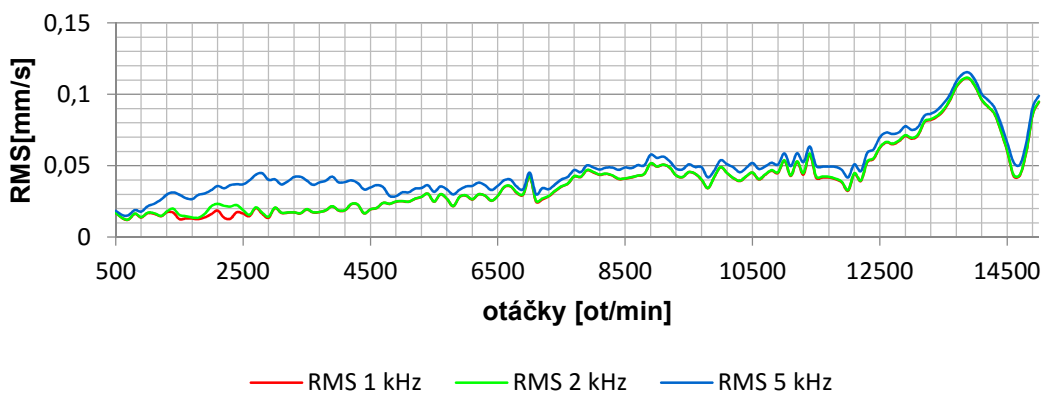
3D Graf naměřených dat - osa Z - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Z - PULSE



Graf RMS - osa Z - PULSE





Přesnost chodu vřetena za rotace:

Měření 1												
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500	15000
X-Y	synchronní	16,96	4,83	6,21	5,59	5,19	6,08	6,19	5,62	8,18	5,92	6,61
	asynchronní	1,16	1,88	2,51	3,32	3,07	3,58	3	3,58	3,64	3,39	3,88
	celková	17,45	6,09	7,75	6,88	6,79	7,86	7,64	7,05	8,38	7,37	7,99
X1-Y1	synchronní	4,1	2,4	3,22	2,65	2,64	3,36	2,51	2,01	2,74	2,61	3,16
	asynchronní	1,43	2,37	3,23	5,42	5,24	4,16	3,37	4,36	4,37	4,19	3,52
	celková	4,91	4,04	5,01	7,06	6,05	6,31	5,2	5,37	5,26	5,76	5,71
Z	fundamentální	6,12	5,84	6,07	6,02	6,13	6,44	6,66	7,22	7,31	7,41	7,67
	residuální	0,12	0,49	1,92	1,14	0,92	1,61	1,17	0,21	1,65	0,58	0,85
	asynchronní	1,04	1,47	2,21	3,1	2,84	2,73	2,23	2,7	2,92	2,62	2,3
	celková	7,07	7,74	9,38	9,03	8,68	9,5	8,8	9,5	10,91	9,62	10,55

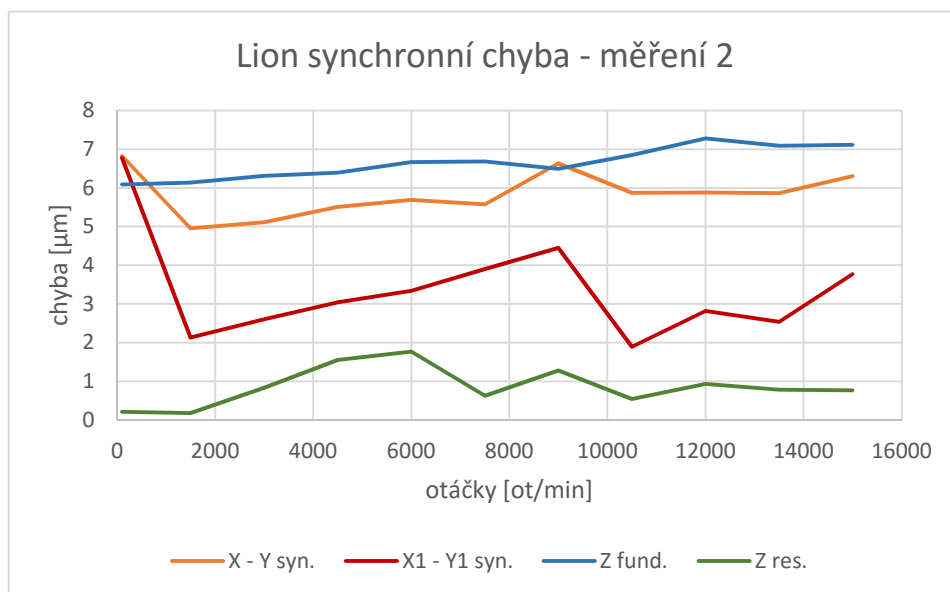
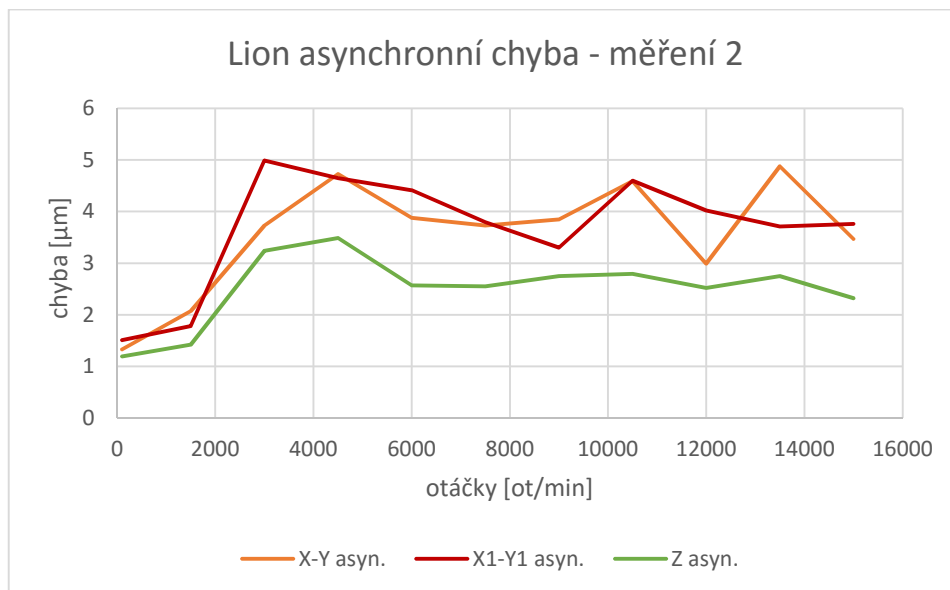
Rozdíl prvního a druhého měření												
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500	15000
X-Y	synchronní	-10,14	0,12	-1,1	-0,08	0,5	-0,51	0,44	0,25	-2,3	-0,06	-0,31
	asynchronní	0,17	0,19	1,22	1,41	0,81	0,15	0,85	1,01	-0,65	1,49	-0,41
	celková	-9,85	0,22	-0,33	0,79	0,91	-0,71	1,29	1,48	-0,69	1,85	-0,33
X1-Y1	synchronní	2,67	-0,27	-0,62	0,39	0,7	0,54	1,94	-0,12	0,08	-0,07	0,61
	asynchronní	0,08	-0,59	1,76	-0,77	-0,83	-0,37	-0,07	0,24	-0,35	-0,48	0,24
	celková	2,95	-0,94	2,08	-1,24	-0,34	0,52	-0,45	-0,59	0,44	-0,81	1,23
Z	fundamentální	-0,03	0,3	0,24	0,37	0,54	0,24	-0,17	-0,37	-0,03	-0,32	-0,56
	residuální	0,09	-0,31	-1,09	0,41	0,85	-0,98	0,11	0,33	-0,72	0,2	-0,08
	asynchronní	0,15	-0,05	1,03	0,39	-0,27	-0,18	0,52	0,09	-0,4	0,13	0,02
	celková	0,28	-0,41	-0,12	0,82	1,05	-0,47	1,4	0,59	-1,18	1,17	-0,7

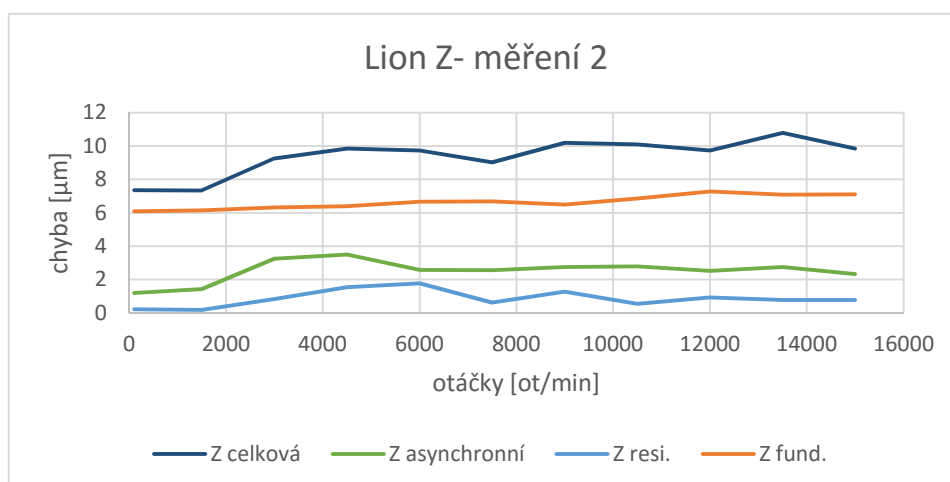
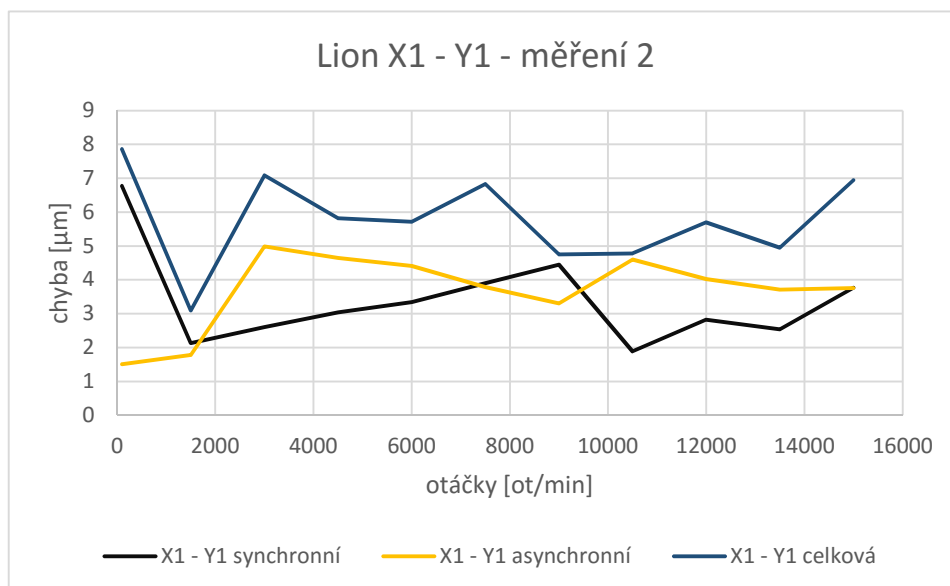
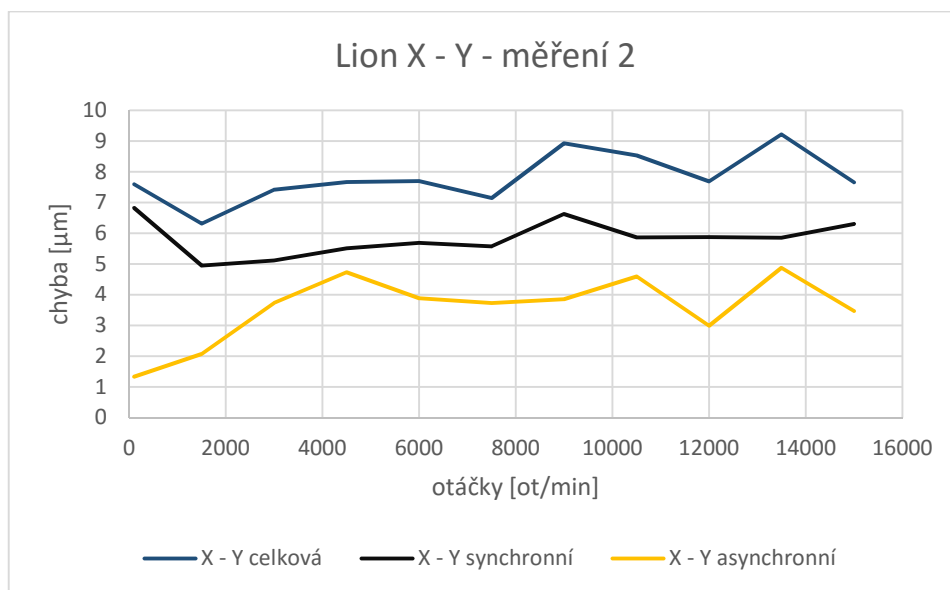


Měření 1 opačný chod				
otáčky		4500	10500	15000
x-y	synchronní	5,84	6,54	6,69
	asynchronní	3,05	4,72	3,84
	celková	7,54	8,84	8,75
x1-y1	synchronní	3,03	2,29	3,08
	asynchronní	5,05	4,42	3,53
	celková	6,89	4,76	5,52
z	asynchronní	2,74	3,22	2,92
	fundamentální	6,36	6,28	7,39
	residuální	1,39	0,8	1,01
	celková	9,38	10,55	10,55

Měření 2 opačný chod				
otáčky		4500	10500	15000
x-y	synchronní	6	6,29	7,09
	asynchronní	3,65	3,23	3,44
	celková	7,95	7,99	8,47
x1-y1	synchronní	2,84	2,24	2,61
	asynchronní	4,38	4,54	3,75
	celková	6,1	5,38	4,95
z	asynchronní	2,7	3,27	2,77
	fundamentální	6,01	7,05	7,6
	residuální	0,99	0,68	0,63
	celková	8,91	10,44	9,85

ROZDÍL				
otáčky		4500	10500	15000
X-Y	synchronní	0,37	0,975	1,065
	asynchronní	-0,675	0,5	-0,015
	celková	0,47	1,17	1,105
X1-Y1	synchronní	0,09	-0,725	-0,785
	asynchronní	-0,32	-0,345	-0,335
	celková	0,055	-0,81	-1,335
Z	fundamentální	-3,485	-3,155	-3,715
	residuální	4,84	5,32	6,375
	asynchronní	-2,105	-1,965	-1,82
	celková	-0,295	1,29	0,935

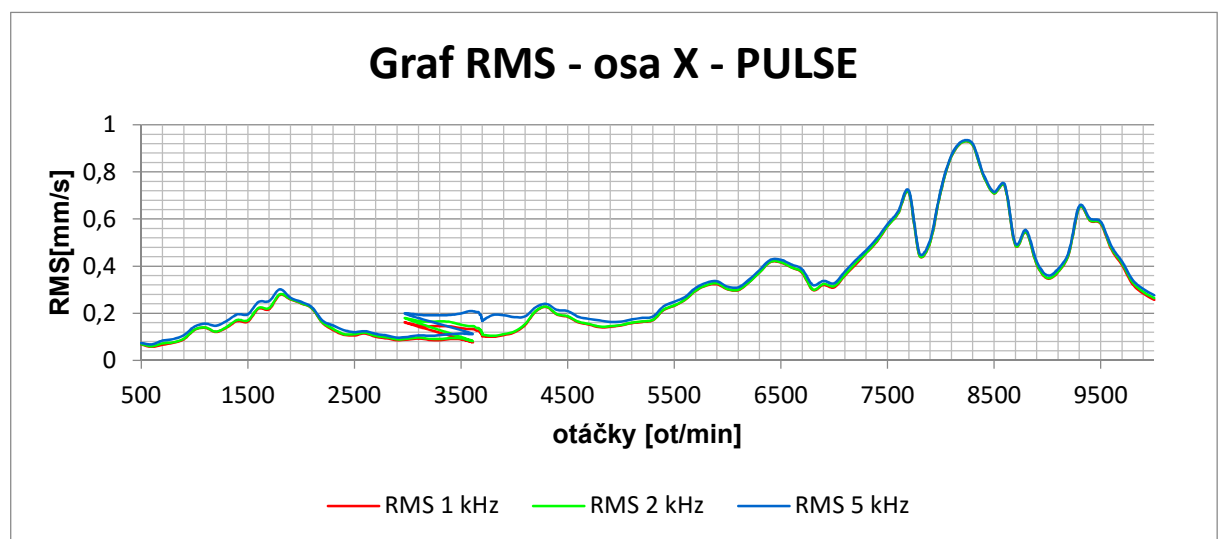
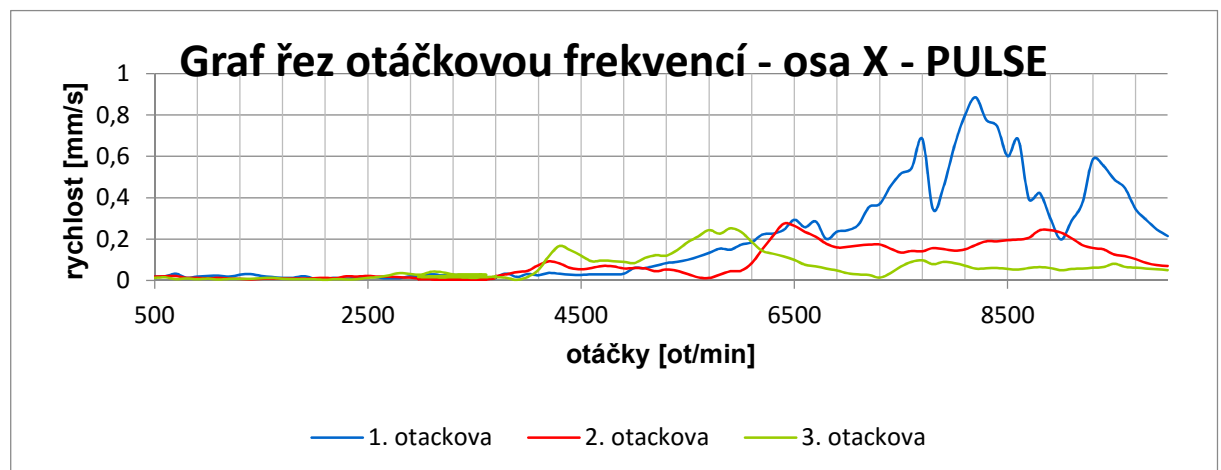
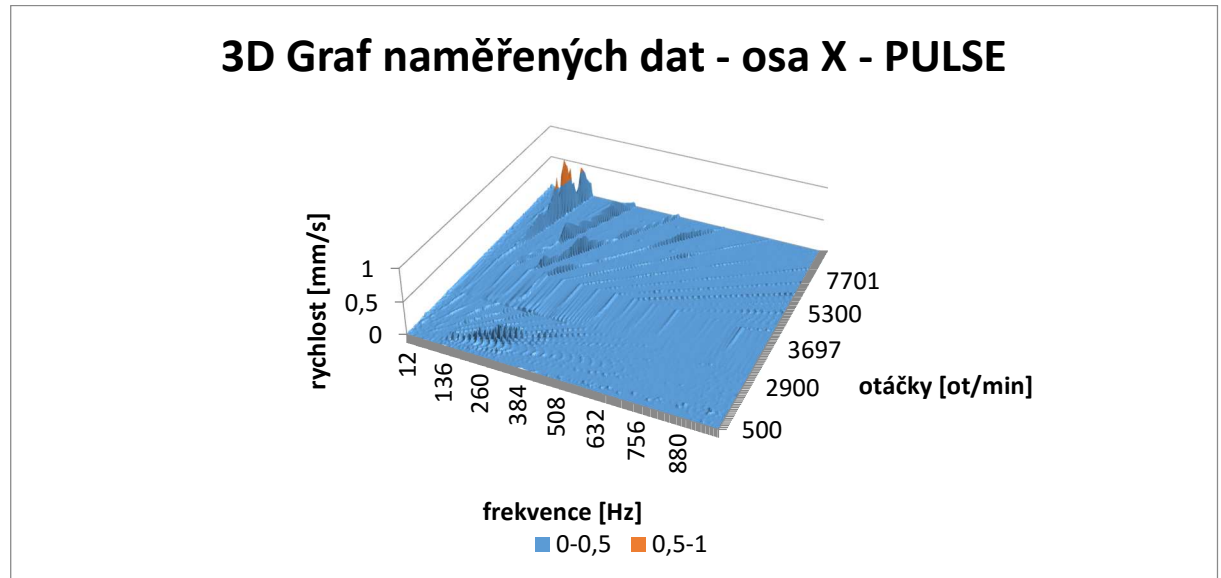






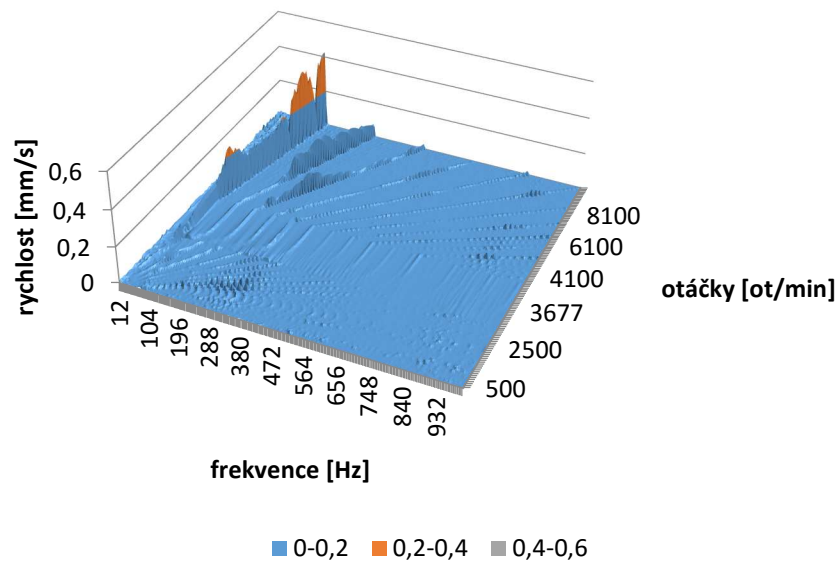
MCU 700V-5X

Vibrace

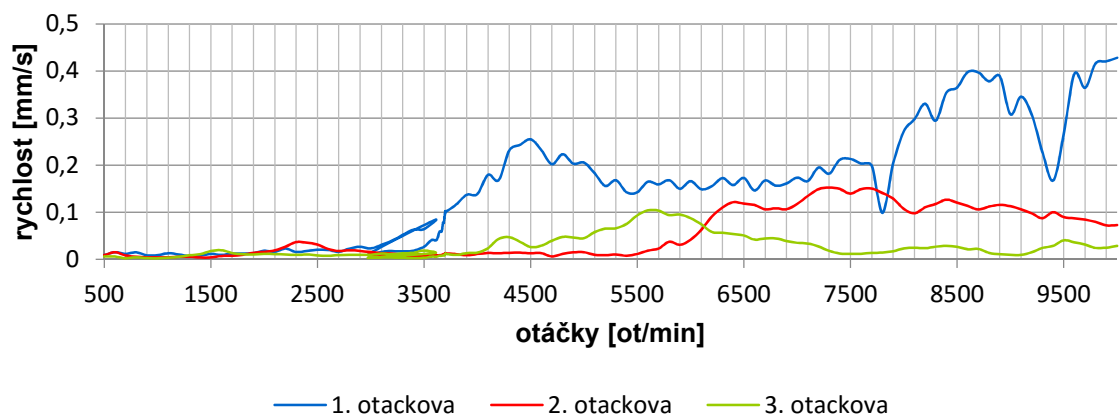




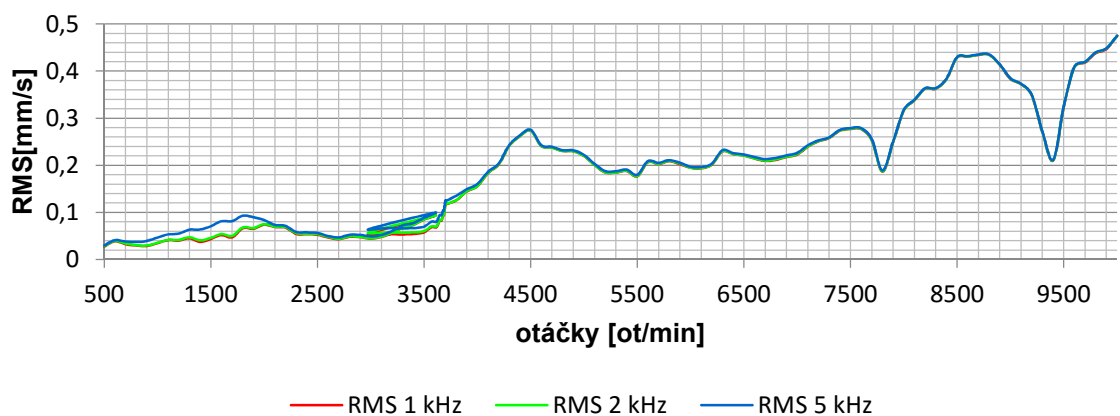
3D Graf naměřených dat - osa Z - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Z - PULSE



Graf RMS - osa Z - PULSE





Přesnost chodu vřetena za rotace:

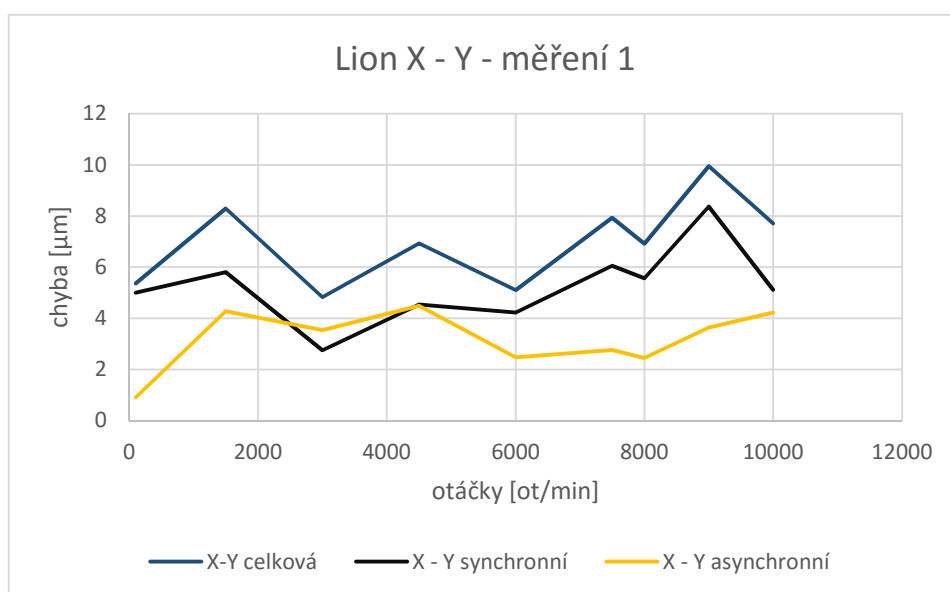
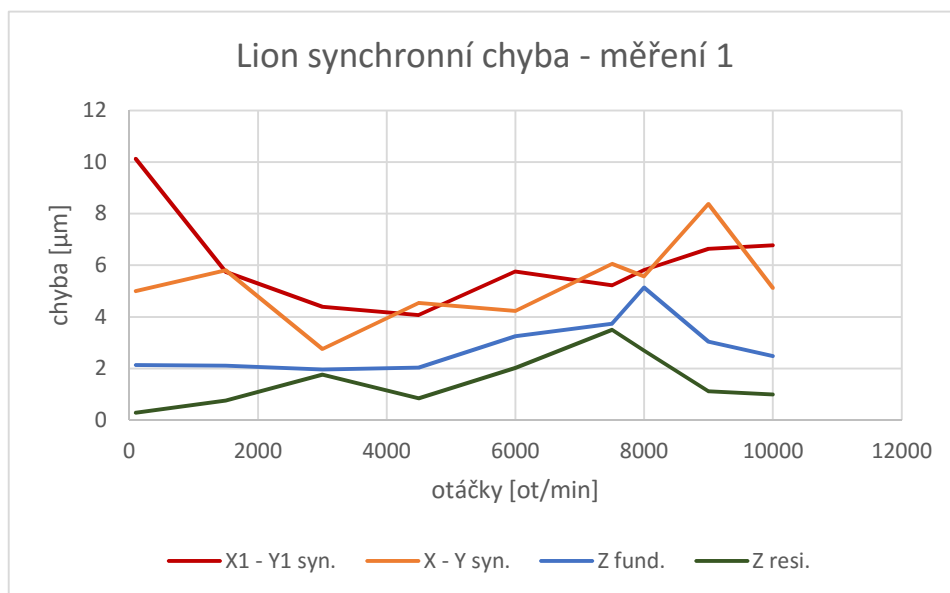
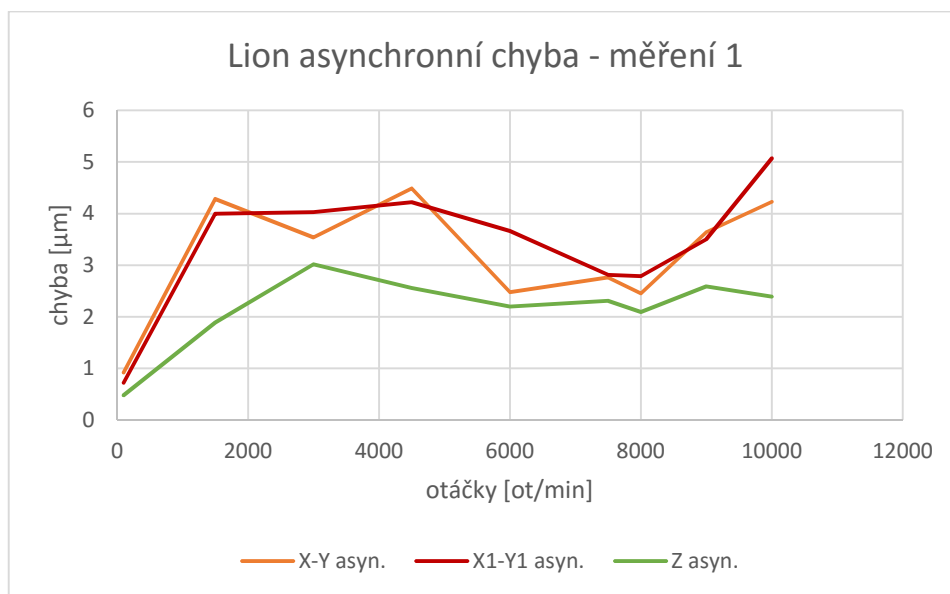
Měření 2										
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000	9000	10000
X-Y	synchronní	2,35	6,2	3,08	4,41	4,34	5,49	5,72	8,04	5,45
	asynchronní	0,7	3,55	5,15	4,39	3,44	3,51	3,6	4,04	4,46
	celková	2,71	8,06	7,39	7,56	5,92	7,8	7,83	10,4	7,94
X1-Y1	synchronní	9,92	5,08	3,61	4,95	5,45	5,13	6,11	6,37	9,81
	asynchronní	1,05	3,18	3,14	5	4,6	3,57	3,36	4,05	2,81
	celková	10,39	6,63	5,31	7,81	8,23	6,76	7,01	8,94	11,75
Z	fundamentální	2,15	2,09	1,98	2,09	3,39	3,65	5,25	3,08	2,27
	residuální	0,28	1,6	2,09	1,22	2,09	3,03	2,87	2	1,68
	asynchronní	0,45	1,54	2,81	2,93	2,23	2,88	1,94	3,34	3,14
	celková	2,62	4,16	5,39	5,63	6,33	7,74	8,09	6,68	6,1

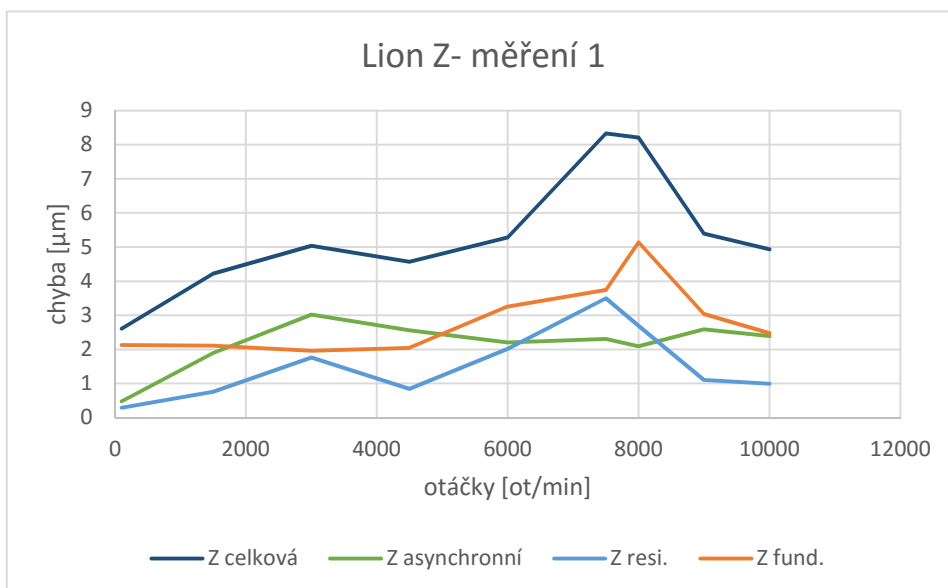
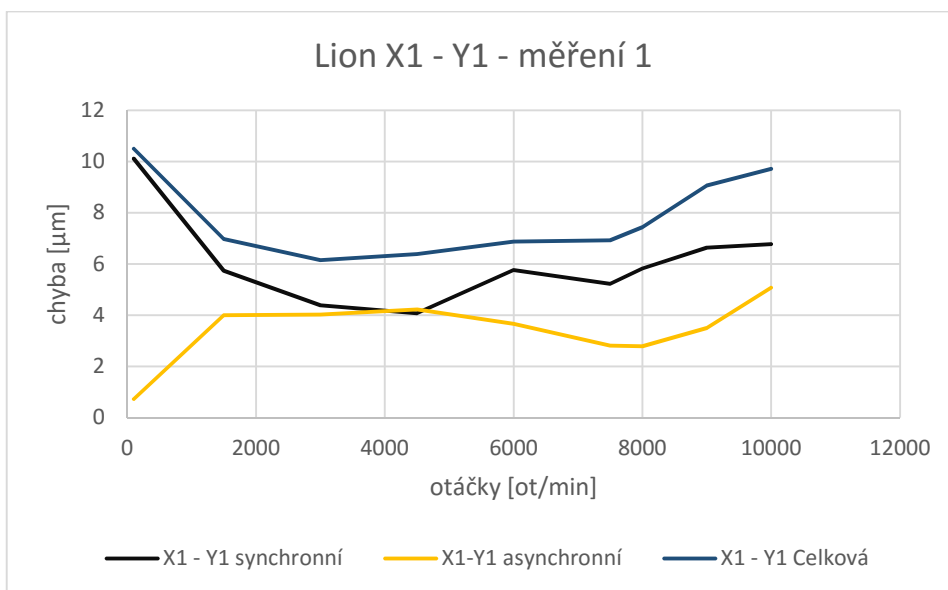
Rozdíl prvního a druhého měření										
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000	9000	10000
X-Y	synchronní	-2,65	0,39	0,33	-0,13	0,11	-0,57	0,15	-0,33	0,33
	asynchronní	-0,22	-0,73	1,61	-0,1	0,96	0,75	1,15	0,4	0,23
	celková	-2,66	-0,23	2,56	0,63	0,82	-0,13	0,91	0,46	0,23
X1-Y1	synchronní	-0,2	-0,66	-0,78	0,88	-0,31	-0,1	0,29	-0,27	3,04
	asynchronní	0,33	-0,82	-0,89	0,78	0,94	0,76	0,57	0,55	-2,26
	celková	-0,11	-0,34	-0,84	1,42	1,35	-0,17	-0,43	-0,12	2,03
Z	fundamentální	0,02	-0,02	0,02	0,05	0,14	-0,09	0,11	0,04	-0,21
	residuální	-0,01	0,84	0,33	0,38	0,07	-0,47	0,18	0,89	0,69
	asynchronní	-0,03	-0,35	-0,21	0,37	0,03	0,57	-0,15	0,75	0,75
	celková	0,01	-0,06	0,35	1,06	1,05	-0,59	-0,12	1,29	1,17



Měření 1 opačný chod					Měření 2 opačný chod				
otáčky		4500	8000	10000	otáčky		4500	8000	10000
x-y	synchronní	5,69	6,86	8,56	x-y	synchronní	5,75	6,47	7,86
	asynchronní	4,67	5,59	3,86		asynchronní	5,06	4	3,67
	celková	9,32	9,69	10,86		celková	8,46	8,47	9,78
x1-y1	synchronní	5,73	5,5	6,53	x1-y1	synchronní	6,41	5,61	8,76
	asynchronní	3,79	3,52	4,18		asynchronní	3,72	3,58	3,37
	celková	8,4	7,55	8,76		celková	8,91	8,25	11,08
z	asynchronní	4,67	5,41	4,54	z	asynchronní	4,93	5,53	5,43
	fundamentální	1,84	2,88	2,98		fundamentální	2,66	1,92	1,32
	residuální	2,44	3,51	2,1		residuální	3,44	2,45	2,11
	celková	8,09	9,97	8,44		celková	9,38	8,21	7,51

ROZDÍL				
otáčky		4500	8000	10000
X-Y	synchronní	1,245	1,02	2,925
	asynchronní	0,425	1,77	-0,58
	celková	1,645	1,705	2,495
X1-Y1	synchronní	1,56	-0,41	-0,645
	asynchronní	-0,855	0,475	-0,165
	celková	1,555	0,675	-0,815
Z	fundamentální	2,735	0,275	2,61
	residuální	1,22	-0,38	0,815
	asynchronní	0,195	0,965	-0,66
	celková	3,635	0,94	2,46

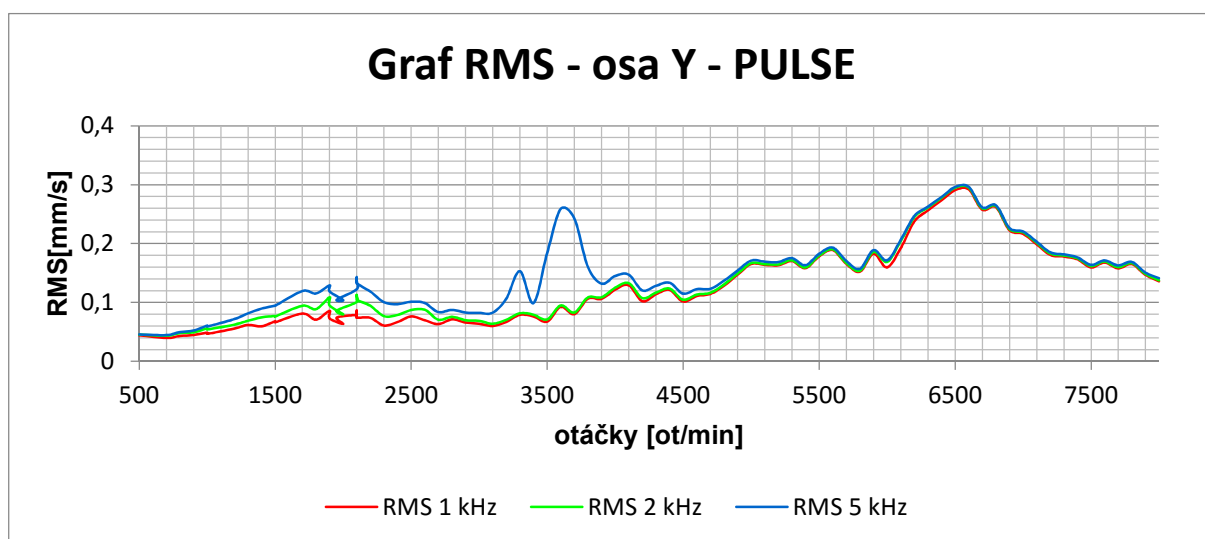
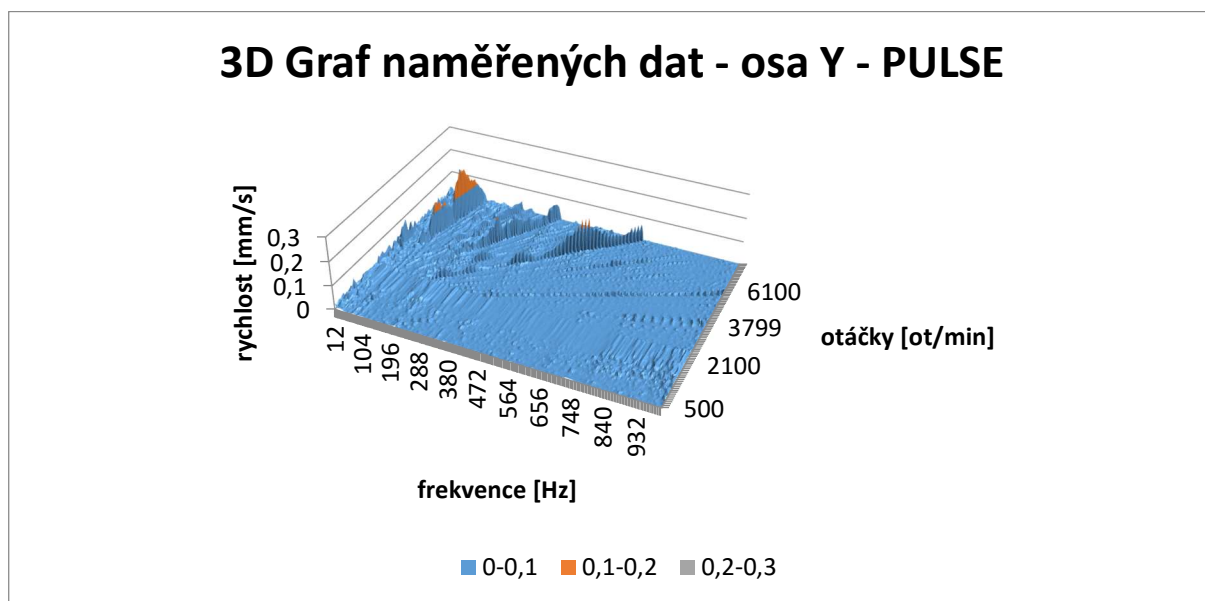






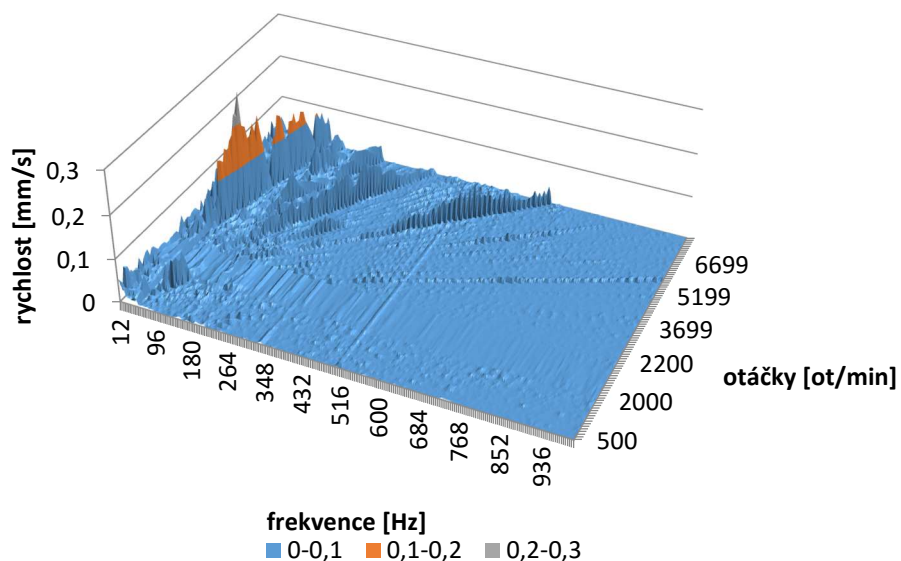
MCV 1270:

Vibrace:

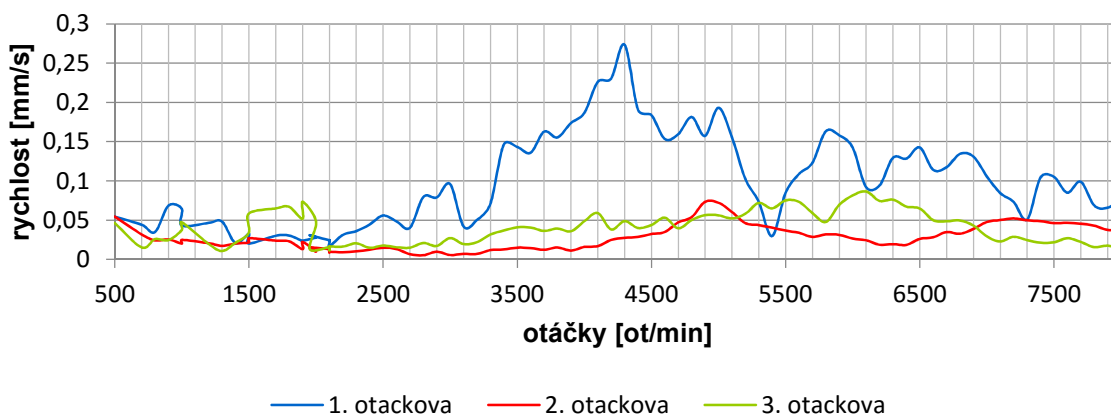




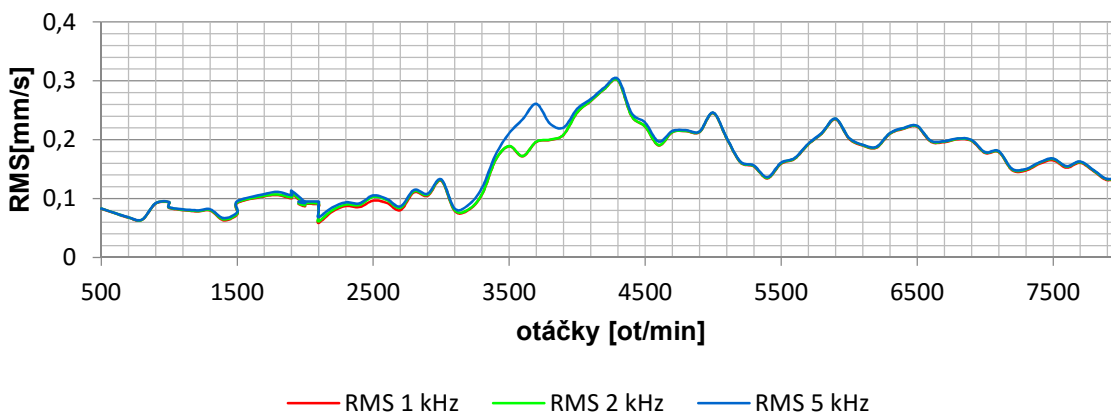
3D Graf naměřených dat - osa Z - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Z - PULSE



Graf RMS - osa Z - PULSE





Přesnost chodu vřetena za rotace:

Měření 2								
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000
X-Y	synchronní	7,66	2,33	2,34	2,29	1,31	2,51	2,33
	asynchronní	0,71	3,68	1,67	2,7	2,48	2,06	5,29
	celková	8,14	5,3	3,52	3,8	3,46	4,12	6,44
X1-Y1	synchronní	6,13	1,44	1,99	2,28	2	2,6	1,85
	asynchronní	0,66	1,28	1,82	1,67	1,81	1,57	1,99
	celková	6,64	2,4	2,71	3,31	3,73	3,66	3,73
Z	fundamentální	5,7	3,49	3,1	1,64	0,46	0,88	0,47
	residuální	1,43	1,25	1,53	1,88	1,84	1,04	0,66
	asynchronní	0,44	0,177	1,13	1,36	1,04	1,055	0,89
	celková	6,97	4,63	4,34	4,1	3,4	2,23	2,23

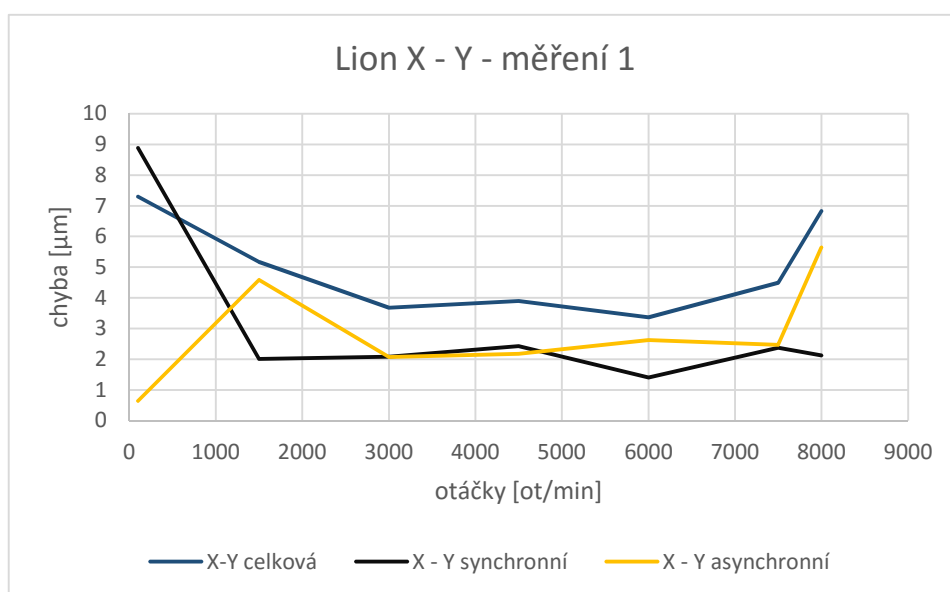
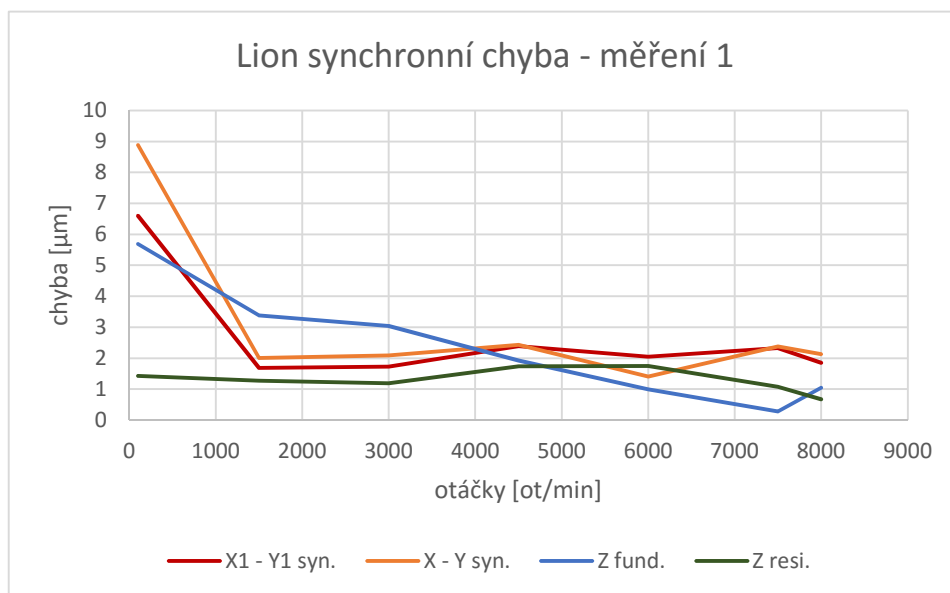
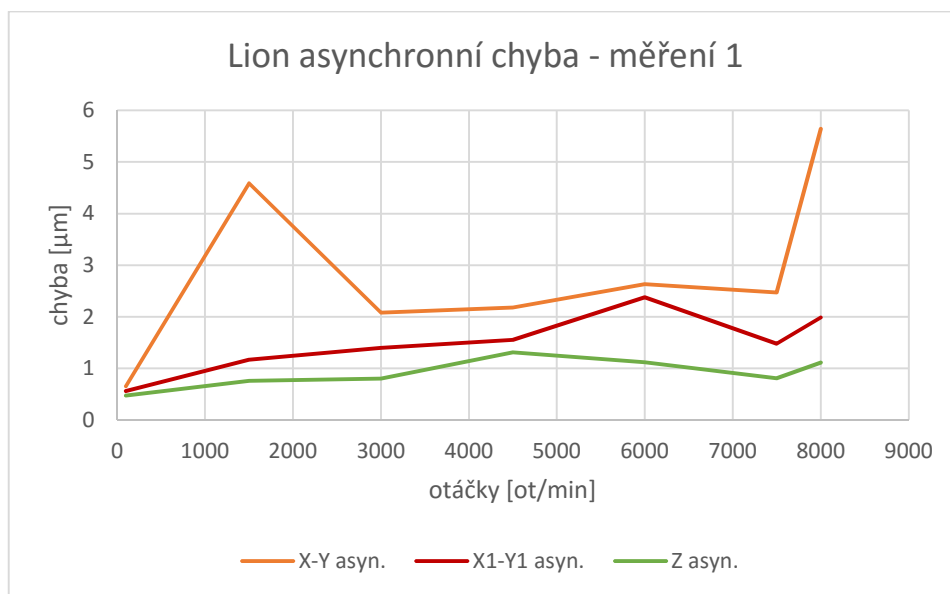
Rozdíl prvního a druhého měření								
otáčky		100	1500	3000	4500	6000	7500	8000
X-Y	synchronní	-1,22	0,32	0,25	-0,14	-0,1	0,13	0,2
	asynchronní	0,06	-0,91	-0,41	0,52	-0,15	-0,41	-0,35
	celková	0,84	0,13	-0,16	-0,1	0,09	-0,37	-0,39
X1-Y1	synchronní	-0,47	-0,24	0,26	-0,11	-0,05	0,27	0
	asynchronní	0,1	0,11	0,42	0,12	-0,57	0,09	0
	celková	-0,42	-0,21	0,19	-0,16	-0,85	0,19	0
Z	fundamentální	0,01	0,11	0,06	-0,28	-0,53	0,6	-0,57
	residuální	0	-0,02	0,34	0,14	0,09	-0,04	-0,01
	asynchronní	-0,03	-0,583	0,33	0,05	-0,08	0,245	-0,22
	celková	0,09	0,06	1,35	-0,47	-0,12	-0,12	0,12

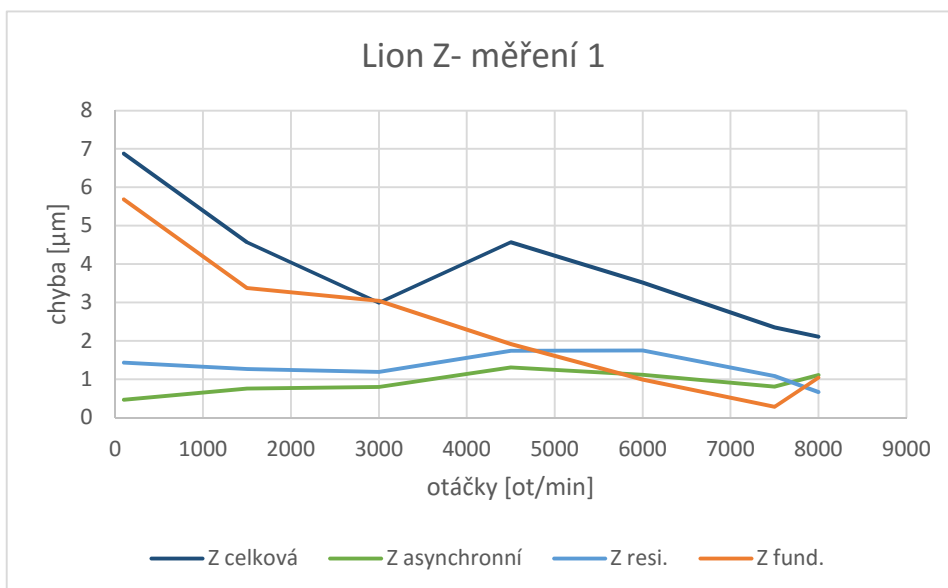
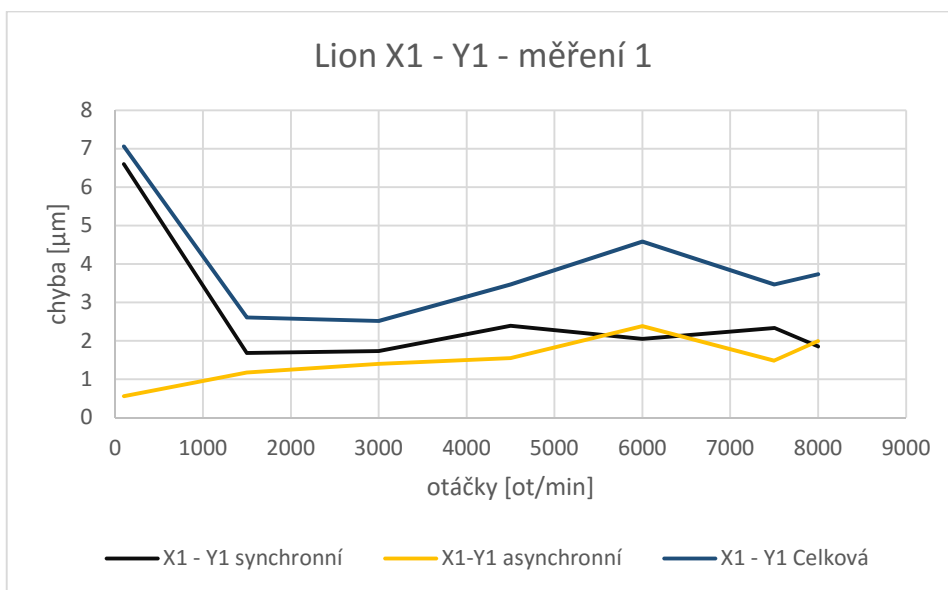


Měření 1 opačný chod			
otáčky		4500	8000
x-y	synchronní	2,96	1,47
	asynchronní	2,08	4,92
	celková	4,64	5,59
x1-y1	synchronní	1,88	1,68
	asynchronní	1,04	1,8
	celková	2,57	3,04
z	asynchronní	2,44	0,55
	fundamentální	1,13	0,73
	residuální	0,64	0,62
	celková	3,4	1,85

Měření 2 opačný chod			
otáčky		4500	8000
x-y	synchronní	3,34	1,57
	asynchronní	2,45	4,77
	celková	5,17	5,09
x1-y1	synchronní	2,28	1,63
	asynchronní	1,81	1,71
	celková	3,46	3,18
z	asynchronní	2,44	0,67
	fundamentální	1,32	0,78
	residuální	0,77	0,7
	celková	4,57	1,88

ROZDÍL			
otáčky		4500	8000
X-Y	synchronní	0,79	-0,71
	asynchronní	-0,175	-0,62
	celková	1,055	-1,295
X1-Y1	synchronní	-0,255	-0,195
	asynchronní	-0,185	-0,235
	celková	-0,375	-0,62
Z	fundamentální	0,66	-0,145
	residuální	-0,585	0,09
	asynchronní	-0,63	-0,34
	celková	-0,35	-0,305



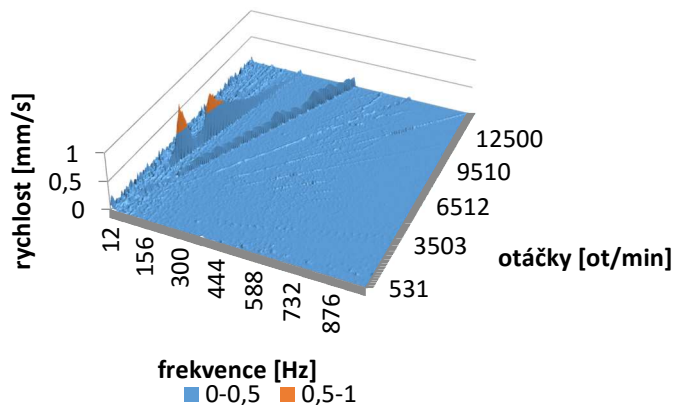




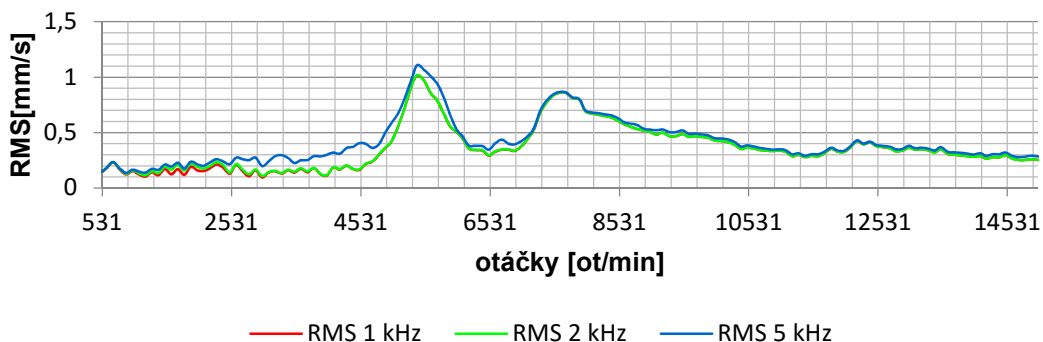
LM1

Vibrace

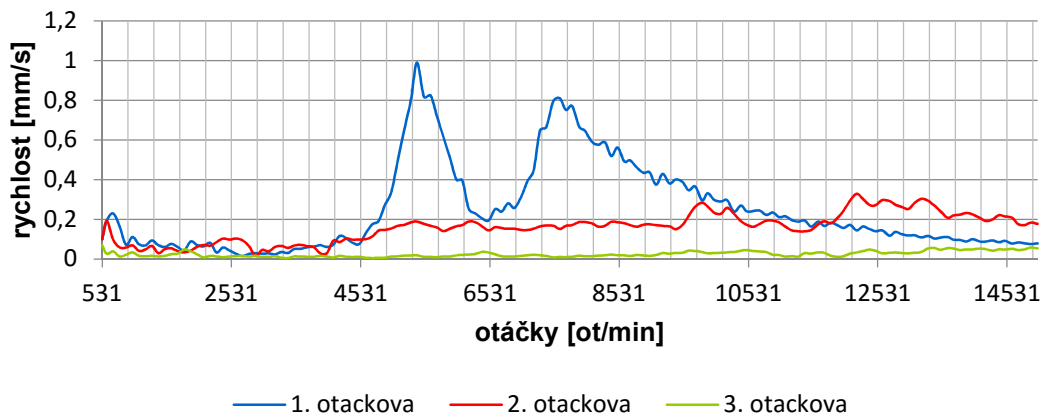
3D Graf naměřených dat - osa X - PULSE



Graf RMS - osa X - PULSE

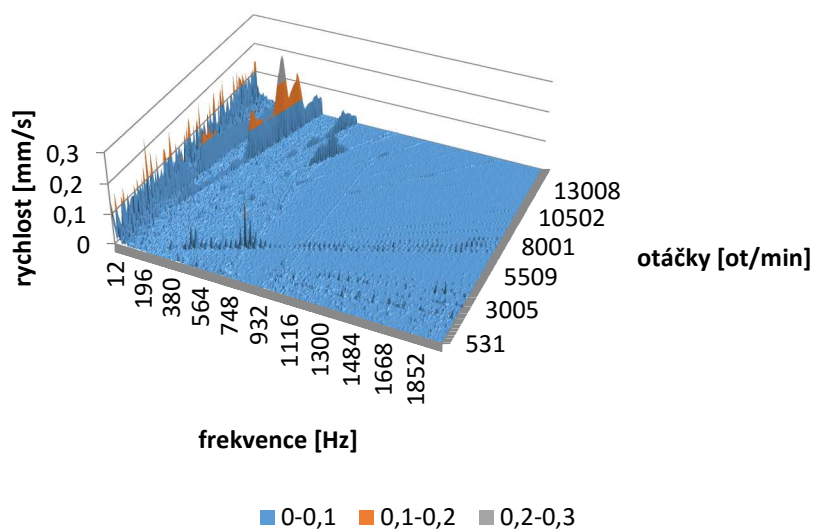


Graf řez otáčkovou frekvencí - osa X - PULSE

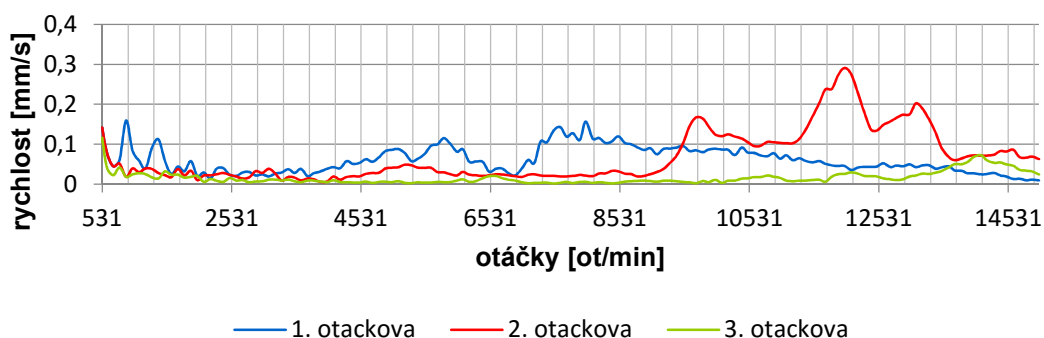




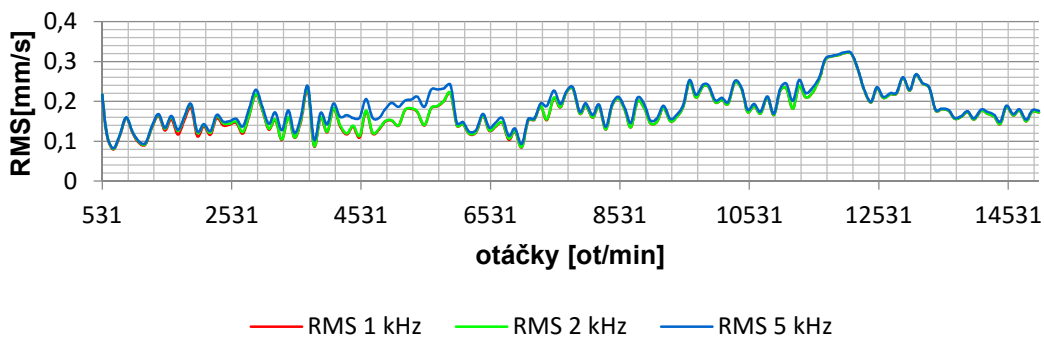
3D Graf naměřených dat - osa Z - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Z - PULSE



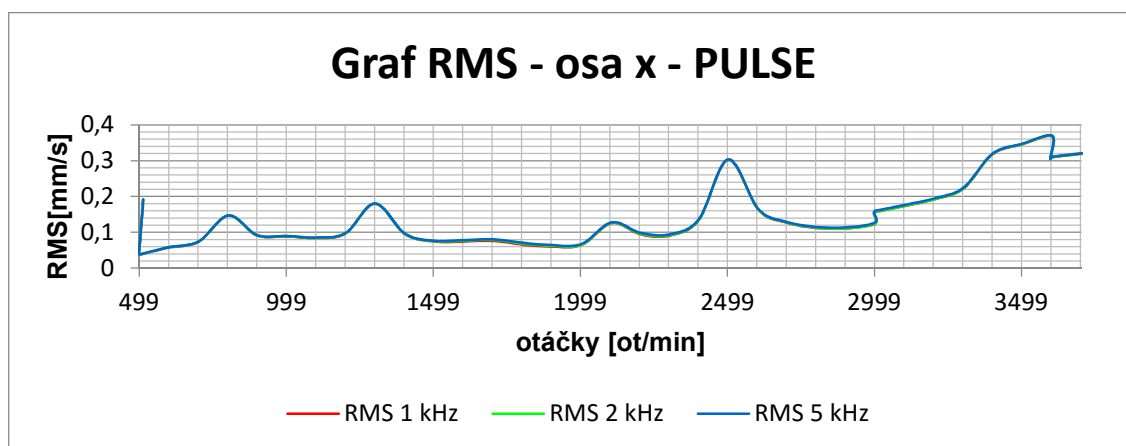
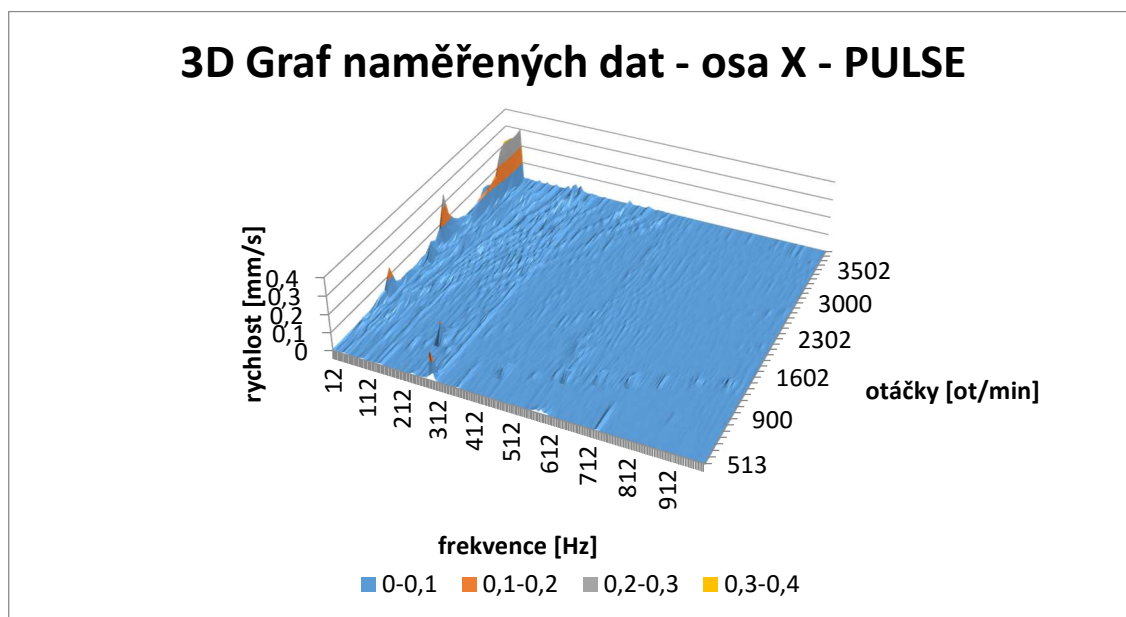
Graf RMS - osa Z - PULSE





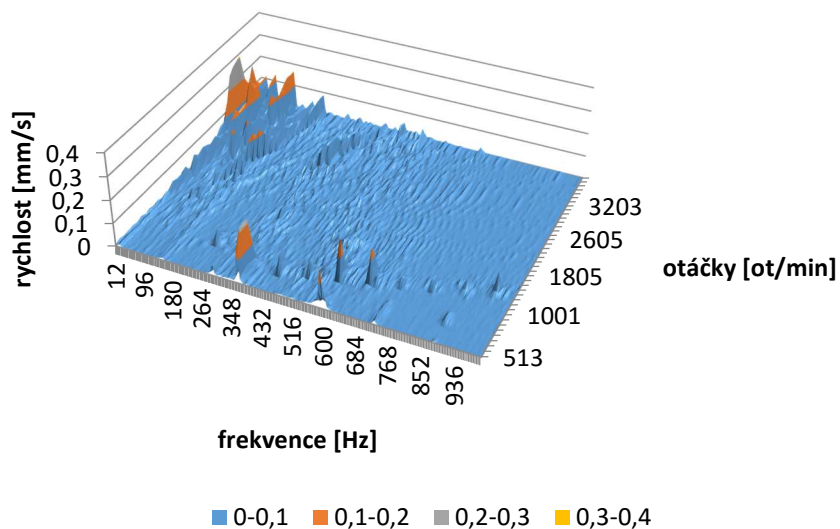
Haas

Vibrace

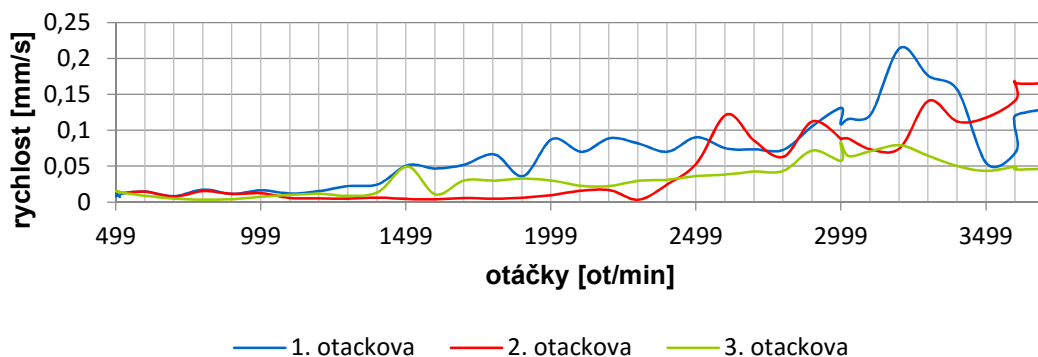




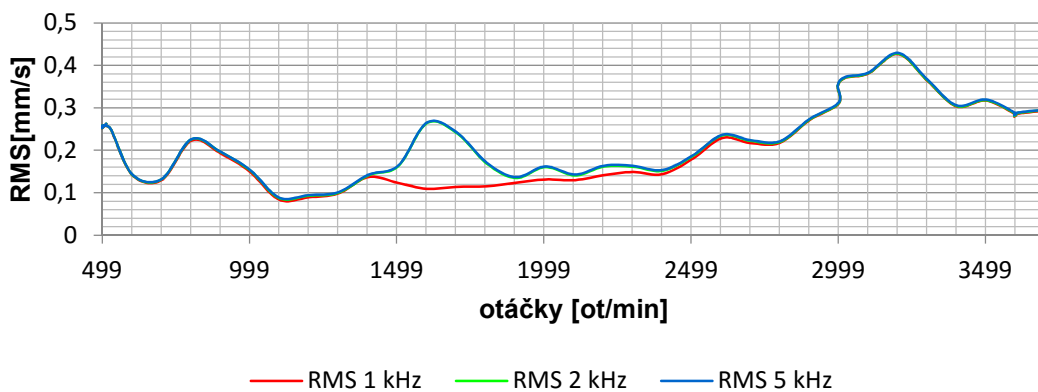
3D Graf naměřených dat - osa Y - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Y - PULSE



Graf RMS - osa Y - PULSE

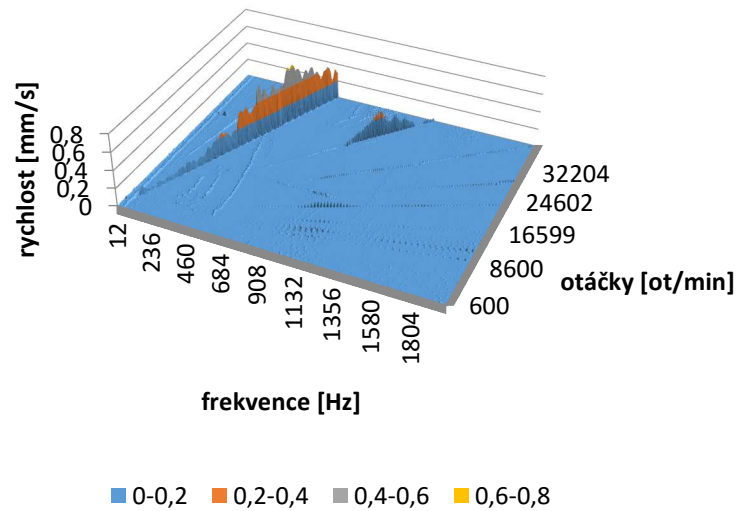




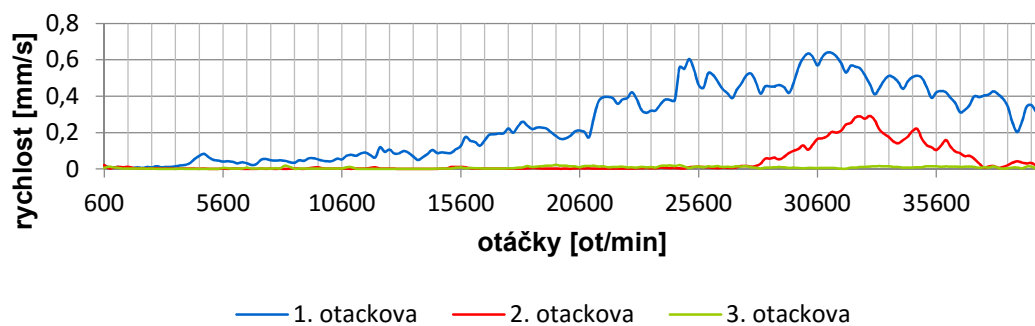
MCVL 1000

Vibrace

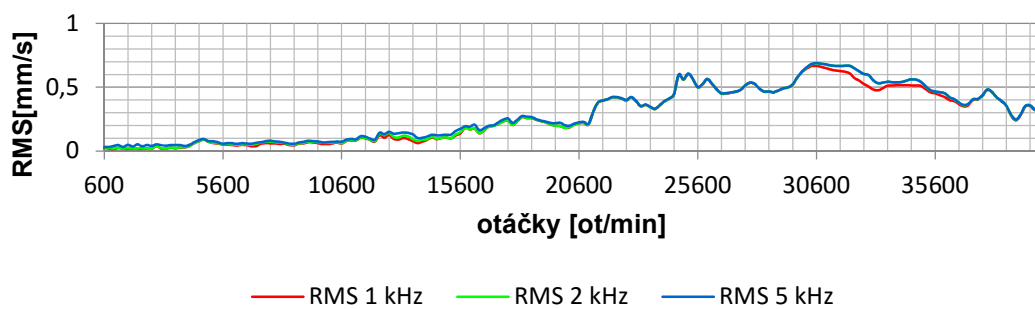
3D Graf naměřených dat - osa X - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa X - PULSE

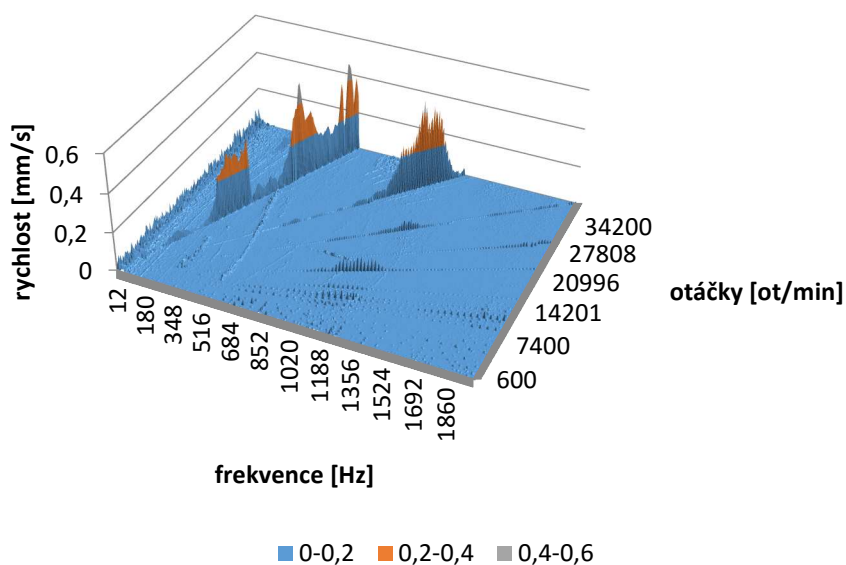


Graf RMS - osa X - PULSE





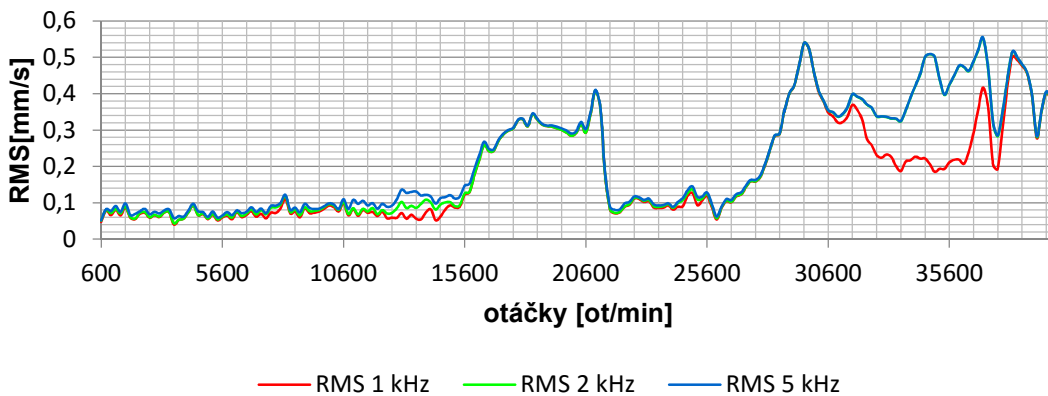
3D Graf naměřených dat - osa Z - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Z - PULSE



Graf RMS - osa Z - PULSE

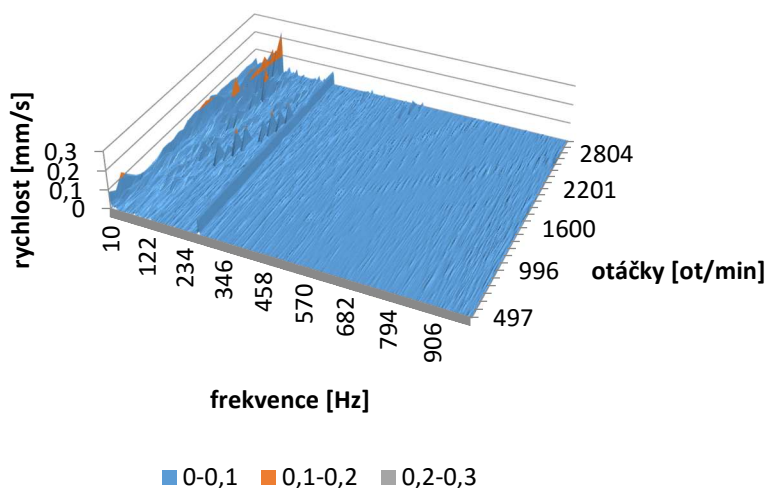




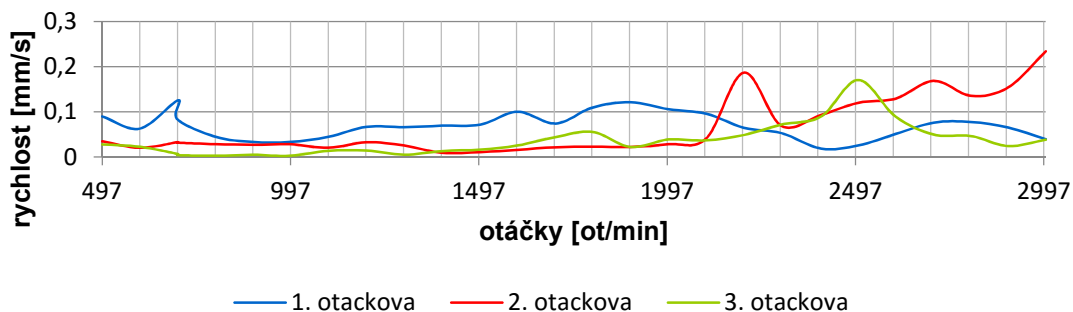
Emco

Vibrace

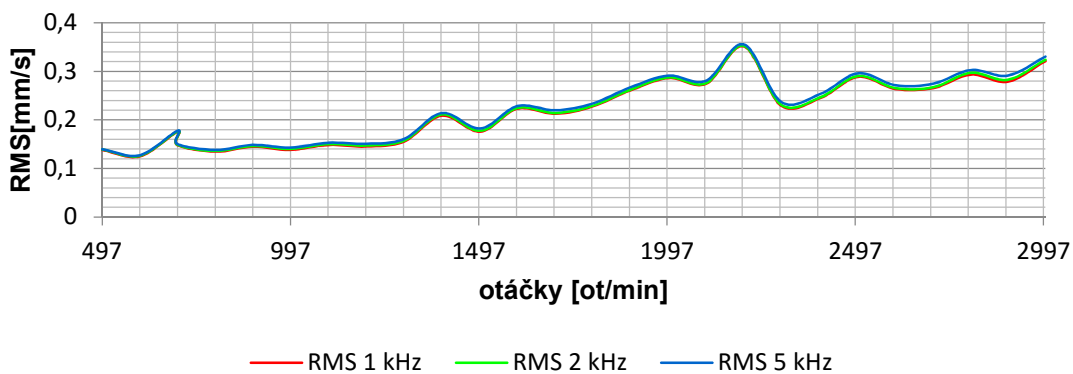
3D Graf naměřených dat - osa X - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa X - PULSE

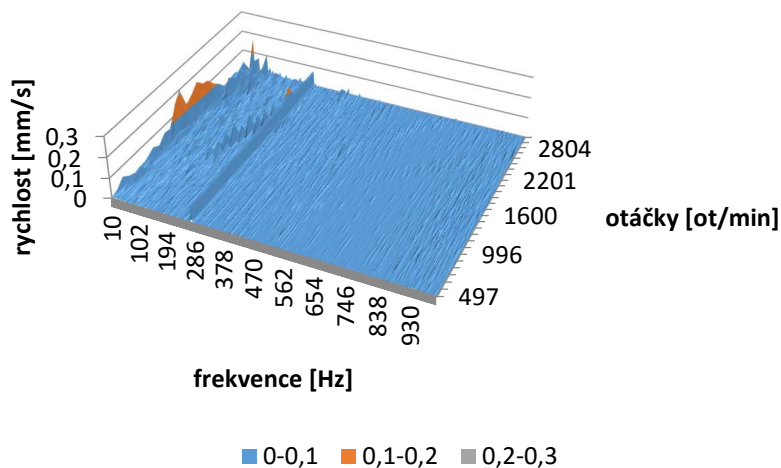


Graf RMS - osa X - PULSE

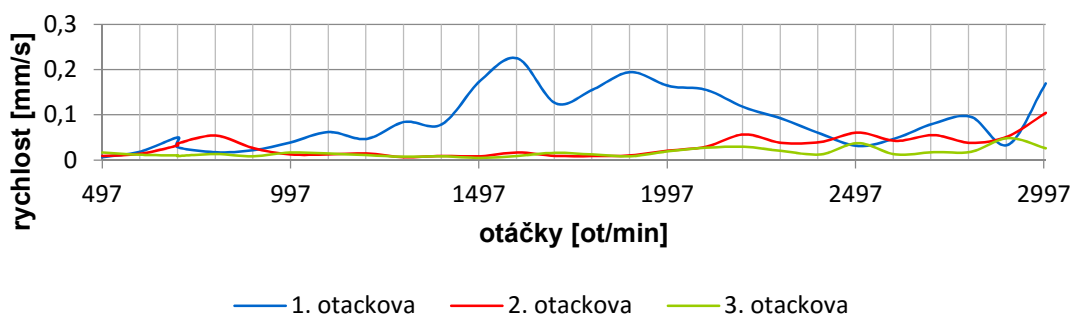




3D Graf naměřených dat - osa Y - PULSE



Graf řez otáčkovou frekvencí - osa Y - PULSE



Graf RMS - osa Y - PULSE

