

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Vibrodiagnostika obráběcích center

Multilathe

**Vibrodiagnostics of Multilathe Machining
Centers**

Student:

Bc. Petr Lisoněk

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student:	Bc. Petr Lisoněk
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace:	72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma:	Vibrodiagnostika obráběcích center Multilathe Vibrodiagnostics of Multilathe Machining Centers
Jazyk vypracování:	čeština

Zásady pro vypracování:

Aplikace multiparametrických metod umožňuje eliminaci chybného určení diagnózy stroje, resp. vhodné zvolené metody technické diagnostiky umožňují vysokou spolehlivost při odhalení vznikajících poruch již v jejich zárodku. Zvolte proto vhodné nástroje multiparametrické diagnostiky a aplikujte je při určování technického stavu obráběcích strojů. V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou týkající se diagnostiky obráběcích strojů a možností identifikace vznikajících závad. Zhodnoťte možnosti použití a výsledky jednotlivých metod při jejich aplikaci. Změřená data analyzujte a proveďte následná vyhodnocení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály firem - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84

ŠAFR, E. *Technika mazání*. 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

HRADECKÝ, F., VLK, M. *Tribotechnika*. 1. vydání, Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 297 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. 5. 2017



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Lisoněk

Adresa trvalého pobytu autora práce: 1. Května 184, 68734, Uherský Brod 3

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LISONĚK P. *Vibrodiagnostika obráběcích center Multilathe*: diplomová práce, Ostrava: VŠB - TUO, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2017, 72 stran, vedoucí práce: Ing. Jan Blata Ph.D.

Diplomová práce se zabývá měřením, analýzou a vyhodnocením technického stavu tří výrobních strojů Multilathe. Jedná se o vysokootáčková obráběcí centra, která jsou ve společnosti Česká zbrojovka a.s. využívána pro výrobu dřevěných pažeb střelných zbraní. Pro zjištění technického stavu byla využita metoda bezdemontážní technické diagnostiky konkrétně vibrodiagnostiky. Měření se provádělo přístrojem Adash A4400 VA4 Pro a vyhodnocení bylo provedeno v softwaru Virtual Unit VA4Pro. V závěru práce jsou porovnány velikosti vibrací strojů pro lepší orientaci v jejich technickém stavu.

Klíčová slova: vibrodiagnostika, Multilathe, soustruh

ANNOTATION OF MASTER THESIS

LISONĚK P. *Vibrodiagnostics of Multilathe Machining Centers*: the master thesis, Ostrava: VŠB - TUO, Faculty of mechanical engineering, Department of production machines and design, 2017, 72 pages, thesis directive: Ing. Jan Blata Ph.D.

The master thesis deals with detection, analysis and evaluation technical conditions of the three Multilathe production machines. It is a high-speed machine centers that are in the company of Ceska zbrojovka a.s. used for production gunstocks firearms. To determine the technical condition was used non-invasive metod, specifically vibrodiagnostic. For detection of the technical condition was used Adash A4400 VA4 Pro and evaluation were performed in software Virtual Unit VA4Pro. Finally, we compared the magnitude of vibration of the machines for better understanding of their technical condition.

Key words: vibrodiagnostics, Multilathe, lathe

OBSAH

Úvod.....	10
1. Představení společnosti Česká Zbrojovka a. s.	11
2. Vibrodiagnostika.....	14
2.1. Snímače vibrací.....	14
2.2. Rozdělení snímačů	14
2.3. Umístění snímačů.....	16
2.4. Metody vyhodnocování vibrací.....	18
3. Seznámení se stroji Multilathe.....	20
3.1. Technické specifikace strojů Multilathe	21
3.2. Postavení strojů Multilathe ve firmě	21
4. Popis měření	22
4.1. Vibrační analyzátor Adash A4400 VA4 Pro.....	23
4.2. Měřicí místa	25
5. Analýza a výsledky 1. vibrodiagnostického měření	26
5.1. Vyhodnocení stroje Multilathe 1 po prvním měření.....	27
5.2. Vyhodnocení stroje Multilathe 2 po prvním měření.....	31
5.3. Vyhodnocení stroje Multilathe 3 po prvním měření.....	35
5.4. Porovnání technického stavu strojů po prvním měření.....	39
6. Analýza a výsledky 2. vibrodiagnostického měření	43
6.1. Vyhodnocení stroje Multilathe 1 po druhém měření	43

6.2.	Vyhodnocení stroje Multilathe 2 po druhém měření	48
6.3.	Vyhodnocení stroje Multilathe 3 po druhém měření	52
6.4.	Porovnání technického stavu strojů po druhém měření	57
7.	Vývoj technického stavu strojů.....	61
7.1.	Vývoj technického stavu stroje Multilathe 1	61
7.2.	Vývoj technického stavu stroje Multilathe 2	65
7.3.	Vývoj technického stavu stroje Multilathe 3	68
8.	Závěr	71

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

apod.	a podobně
atd.	a tak dále
např.	například
tab.	tabulka
obr.	obrázek
a.s.	akciová společnost
s	sekunda
mm/s	milimetr za sekundu
mm	milimetr
kW	kilowatt
g	jednotka zrychlení
ms	milisekunda
ot/min	otáčky za minutu
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ČSN	Česká státní norma
RMS	efektivní hodnota vibrací
RPM	otáčky za minutu
μm	mikrometr
Hz	Hertz
a	zrychlení
v	rychlost
DP	diplomová práce

Úvod

Z důvodu společností snižovat výrobní náklady si diagnostika zajistila důležitou pozici ve výrobních procesech. Absence diagnostického oddělení ve firmě může zapříčinit zbytečné výpadky ve výrobě a dochází tak ke snižování spolehlivosti firmy a zisku. Technická diagnostika zajišťuje bezproblémový chod výrobních zařízení, zjišťuje jejich aktuální technický stav, plánuje údržbu na dobu, kdy se odstávka stroje nejméně projeví ve výrobě a předchází tak poruchám. Mezi hlavní metody technické diagnostiky patří vibrodiagnostika, tribodiagnostika a termodiagnostika.

Vibrodiagnostika využívá pro zjištění stavu strojů rychlost a zrychlení vibrací. Naměřená data se analyzují a zjišťuje se z nich, jaká závada se na daném zařízení vyskytuje. Pro každou závadu se využívá specifická metoda vyhodnocování vibrací.

V diplomové práci se budu zabývat zjišťováním technického stavu třech obráběcích center Multilathe za použití vibrodiagnostiky ve společnosti Česká zbrojovka a.s. Po naměření dat je analyzuji, vyhodnotím stav strojů, porovnáám mezi sebou a v časovém horizontu jednotlivé zařízení.

Ve firmě Česká zbrojovka a.s. má technická diagnostika vysoké postavení ve výrobě. Dokáží tak předcházet výpadkům ve výrobě a opravy strojů mohou plánovat na vhodnou dobu. Ve společnosti je vysoce rozvinut systém TPM a je zde kladen velký důraz na kvalitu vyrobených produktů.

Obráběcí stroje Multilathe jsou osazeny čtyřmi vřeteny a mohou taky vyrábět až čtyři součásti najednou. Používají se pro obrábění dřevěných částí střelných zbraní, jako jsou pažby. Je zde kladen vysoký důraz na přesnou výrobu z důvodu požadavků na vysokou kvalitu povrchů. Obrábí se zde z bukového a ořechového dřeva.

1. Představení společnosti Česká Zbrojovka a. s.

K tvorbě této kapitoly bylo využito zdrojů [1], [2], [3], [4], [5].

Výroba v České Zbrojovce se dělí na dvě základní specializace. První obor se zaměřuje na zbrojní výrobu. Ve druhé specializaci se firma zaměřuje na nezbrojní průmysl.



Obr. 1 areál společnosti Česká zbrojovka a.s. v Uherském Brodě [3]

Zbrojní specializace

Zabývá se produkcí zbraní pro různé účely např.: sport, lov (brokovnice, kulovnice), hobby (vzduchovky), ozbrojené složky (pistole, automatické zbraně, granátomety a odstřelovací pušky).

Firma také zabezpečuje povrchovou úpravu krátkých nebo loveckých zbraní jako je zdobení (niklování, zlacení) nebo zhotovení okrasných rytin.

Výčet některých produktů

- Granátometry: CZ 805 G1



Obr. 2 granátomet CZ 805 G1 [4]

- Pistole: CZ P-10C, CZ Shadow 2, Dan Wesson ECO
- Odstřelovací puška: CZ 750 S1 M1
- Samopal: CZ Scorpion Evo 3 A1
- Vzduchovky: Slavia 630 Standard, Slavia 634, CZ 200S Hunter
- Kulovnice: CZ 527 Thumbhole, CZ 557 Predator, CZ 527 Varmit –Laminated
- Brokovnice: CZ-USA Sporter, Brno Combo



Obr. 3 brokovnice CZ-USA Sporter [5]

Nezbrojní specializace

Letecká výroba

Firma se zabývá výrobou, opravou a montáží převodovek leteckých motorů Walter M601. Dále zde probíhá také výroba různých druhů ozubených kol.

Výroba nářadí

Probíhá zde výroba řezných nástrojů pro výrobu otvorů (vrtáky, záhlubníky), závitů, různé frézovací nástroje. Různé druhy měřidel pro měření geometrických veličin, válcové nebo závitové kalibry. Přípravky pro uchycení, manipulaci nebo úpravu strojních dílů.

Automobilový průmysl

Na strojích Hydromat HB 45/12 zde probíhá obrábění automobilových součástí, dle požadavku zákazníka. Na hydraulických lisech se tváří složitější automobilové díly. A dále se zde provádí finální úpravy vyrobených dílů, odmaštění a výstupní kontrola v metrologickém centru.

Další výroba

Ve firmě se také provádí další operace. Mezi nejzákladnější patří povrchové úpravy dílů (chromování, lakování nebo fosfátování). Je zde možnost výběru z různých druhů tepelné úpravy (žihání, cementování nebo kalení). A v neposlední řadě také kompletní výroba odlitků menších rozměrů od návrhu přes výrobu forem až po povrchovou úpravu.

2. Vibrodiagnostika

K tvorbě této kapitoly a podkapitol bylo využito zdrojů [6], [7], [8].

Vibrodiagnostika je jednou z nejpoužívanějších metod technické bezdemontážní diagnostiky. Je vhodná na většinu strojních zařízení, které vykonávají posuvný, rotační nebo jiný pohyb a vyprodukují při práci vibrace. Využívá se pro zjištění technického stavu zařízení a pomáhá předcházet nečekaným odstávkám nebo haváriím strojů, při kterých by mohlo docházet k přestávkám ve výrobě nebo zranění osob obsluhující zařízení. Díky preventivním vibrodiagnostickým kontrolám můžeme naplánovat odstávku stroje a jeho opravu na dobu, kdy bude zařízení nejméně chybět ve výrobním procesu. Vibrodiagnostické kontroly nám v neposlední řadě šetří také velké finanční prostředky. Po naměření vibrací se signál analyzuje a vyhodnocuje vhodně zvolenou metodou.

2.1. Snímače vibrací

Snímače vibrací slouží pro převod mechanického kmitání, což je nestálý děj, kdy hmotný bod vykonává pohyb kolem klidové polohy, na elektrickou veličinu. Naměřený signál je dále zesilován, zpracováván a analyzován. Pro dosažení co nejpřesnějších dat je vyrobeno velké množství druhů senzorů, které se od sebe liší např.: dynamickým rozsahem, rozsahem frekvence, hmotností, rezonančními vlastnostmi, přesností, cenou, citlivostí atd.

2.2. Rozdělení snímačů

Snímače vibrací můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. První skupinou jsou tzv. **seismická zařízení**. Ty se upevňují přímo na konstrukci měřeného stroje a výslednou veličinou jsou celkové vibrace zařízení. Do druhé kategorie spadají **snímače relativní výchylky**. Tyto senzory snímají relativní vibrační výchylku mezi rotující a statickou částí stroje.

Snímače můžeme dále rozdělit dle měřených veličin, jako jsou výchylka, zrychlení a rychlost.

Pomocí **snímačů výchylky** vibrací lze změřit rozdíl polohy nebo vzdálenosti mezi původní a stávající polohou senzoru. Dříve se tyto snímače konstruovaly na jednoduchém mechanickém principu, kdy byla výchylka zaznamenávána pákovým mechanismem. Tyto snímače se v dnešní době již téměř nevyužívají a byly nahrazeny **bezdotykovou sondou**. Většina bezdotykových sond funguje na principu vířivých proudů. Cívkou prochází vysokofrekvenční střídavý proud, který vytváří vysokofrekvenční magnetické pole. Nachází-li se v tomto magnetickém poli vodivý materiál (rotor stroje), jsou v tomto materiálu vygenerovány vířivé proudy. Tyto proudy jsou snímány a dále analyzovány. Výstup sondy je pak přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotující a nerotující částí stroje. Tyto sondy jsou používány u zařízení, na kterých provádíme orbitální analýzu pro zjištění technického stavu. Mohou to být například větší turbínová zařízení.

Snímače zrychlení (akcelerometry) jsou jedny z nejpoužívanějších snímačů vibrací. Naměřenou veličinu můžeme libovolně transformovat na výchylku nebo rychlost vibrací. Akcelerometry patří do skupiny seismických zařízení, které zjišťují absolutní hodnoty vibrací měřeného stroje. Princip funkce snímače je založen na piezoelektrickém jevu. Senzor se skládá z jednoho nebo více piezoelektrických krystalů. Na stěny krystalu působí síly a je zde generován elektrický náboj, který je měřen a zpracováván. Elektrický náboj je závislý na síle. Hmotnost snímače je neměnná. Tudíž je elektrický náboj úměrný zrychlení. Citlivost snímače je závislá na seismické hmotnosti závaží působícího na krystal. Při zvětšování váhy závaží se citlivost snímače zvětšuje, ale zároveň je zmenšován frekvenční rozsah a rozměry senzoru narůstají. Akcelerometry dělíme dle působící síly na smykové, ohybové a tlakové. Tyto snímače jsou hojně rozšířeny z důvodu jednoduché konstrukce a nízké pořizovací ceny.

Snímače rychlosti jsou složeny z magnetu a cívky. Princip funkčnosti senzoru je založen na pohybujiícím se magnetu, který indukuje elektrické napětí. Velikost napětí je závislá na rychlosti změny magnetického pole. Mezi nevýhody se řadí větší hmotnost, rozměry a cena. Senzor rychlosti je jedním z kategorie seismických snímačů.

2.3. Umístění snímačů

K dosažení co nejpřesnějšího měření se musíme řídit zásadami pro umístování snímačů. V případě porušení těchto zásad může dojít k naměření zkreslených hodnot. To může vést až ke špatnému určení technického stavu strojního zařízení.

Volba správných snímačů a dalších měřících zařízení je nezbytná pro získání relevantních hodnot stejně jako výběr vhodného místa pro umístění snímačů vibračního signálu. Měřící místo musí být zvoleno tak, aby se signál mohl bezprostředně šířit ze zdroje přímo do senzoru. Snímače umístujeme do nejkratší možné vzdálenosti od ložisek, aby nedocházelo zeslabení signálu. Vyhýbáme se místům, kde dochází k přechodu mezi materiály a měříme pouze na místech, která jsou v přímém kontaktu s ložisky. Z tohoto důvodu musí technik dobře znát konstrukci diagnostikovaného stroje.

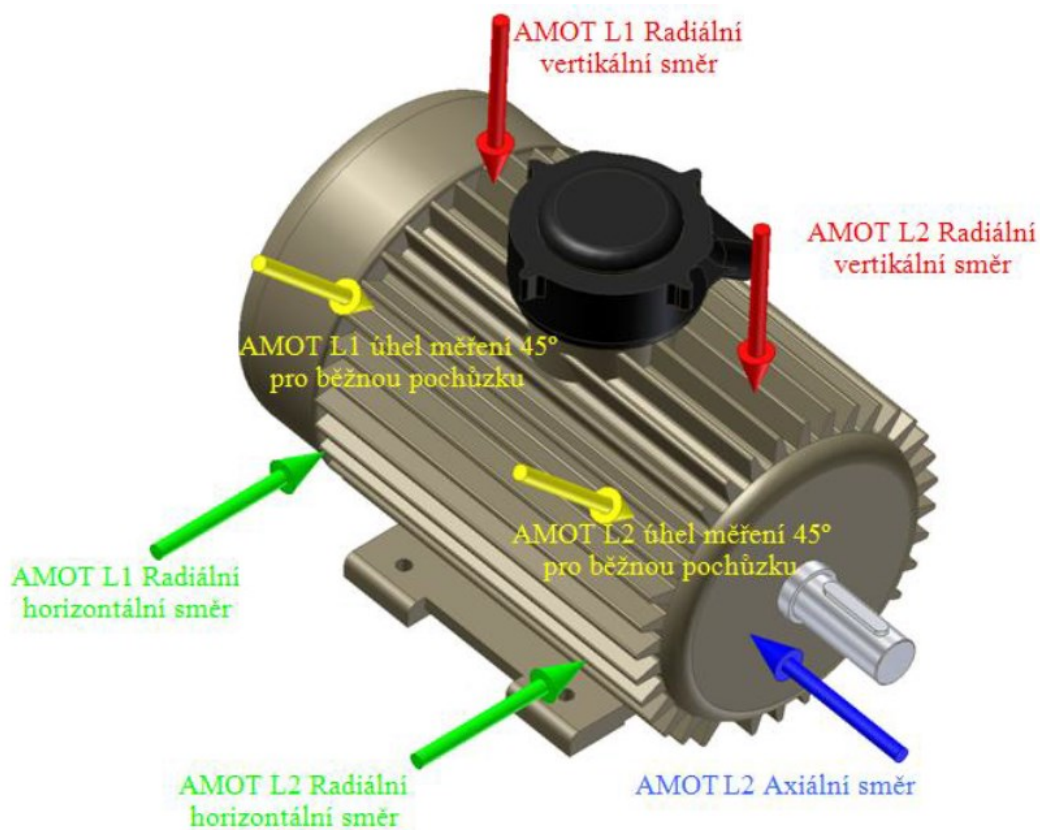
Dobrá znalost měřeného zařízení je klíčová i pro určení technického stavu z naměřených hodnot. Je podstatné vědět, jaké konstrukční části stroj obsahuje a kde je máme hledat. Vibrodiagnostické měření se provádí v předem naplánovaných intervalech a za stejných podmínek jako předchozí měření. Snímače umístujeme vždy na stejná místa. Otáčky a zatížení stroje musí zůstat taktéž konstantní. Toto zajistí, že můžeme jednotlivá měření mezi sebou porovnávat a dle potřeby trendovat.

Senzory umístujeme na předem očištěné plochy. Vyhýbáme se také plochám se silnými nátěry nebo laky, aby nedocházelo k útlumu signálu. Kontrola čistoty plochy samotného snímače je také nezbytná, protože každá nečistota mezi strojem a senzorem vede ke zkreslení měřeného signálu.

Frekvenční rozsah měření je do velké míry ovlivněn i upevněním snímačů k povrchu stroje. Každý druh upevnění má svá omezení a podle toho se také odvíjí rozsah naměřeného frekvenčního spektra. Pro dosažení nejlepšího spojení můžeme využít šroubového spoje. Toto připevnění, ale nemůžeme využít na všech zařízeních. Dále můžeme využívat např.: spojení pomocí lepidla nebo připevnění permanentním magnetem.

Měření se provádí většinou ve třech směrech (horizontální, vertikální a axiální) v každém měřícím bodě. Díky tomu, že ne všechny druhy poruch se nachází v jednom směru, můžeme zjistit celkový stav stroje. Tzn. z horizontálního směru, kde se většinou naměří větší vibrace způsobené konstrukcí stroje, můžeme zjistit např.: nevyváhu zařízení, zatímco v axiálním nesouosost. Můžeme se setkat i s měřením, které probíhá

pod úhlem 45° . Tento druh se používá pro zjištění aktuálního a pouze orientačního stavu stroje. Nemůžeme s ním dosáhnout tak přesných výsledků jako měření v horizontálním, axiálním a vertikálním směru současně.



Obr. 4 umístění snímačů na motoru [6]

Při upevňování senzorů dbáme na bezpečnost. Snímače umísťujeme na bezpečných místech. Do dostatečné vzdálenosti od rotujících částí stroje a na dobře přístupná místa.

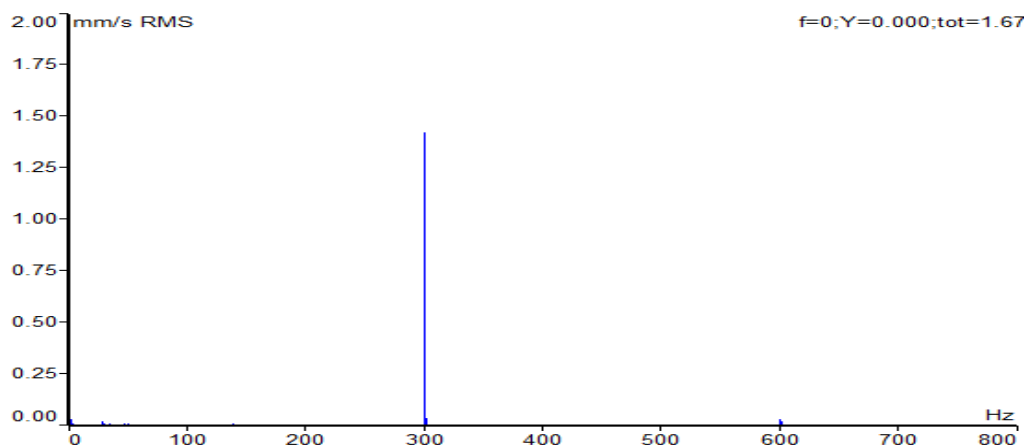
2.4. Metody vyhodnocování vibrací

Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Rychlá Fourierova transformace neboli Fast Fourier Transformation je jedna z nejvyužívanějších metod pro analýzu naměřených vibrací. V naměřeném signálu vyhledává periodicky se opakující děje, které jsou zobrazeny ve frekvenčním spektru a přiřazuje k nim odpovídající frekvenci. Tato metoda je využívána u strojů, které vyvolávají vibrační signál periodicky se opakujícím rotačním pohybem.

V prvotně naměřeném signále je velmi složité rozeznat jednotlivé složky mezi sebou, protože se skládá z mnoha dějů. Z toho důvodů se využívá frekvenční rozklad, tzn. rozklad časového signálu na jednotlivé sinusové složky s odpovídající amplitudou a počátkem.

Ve frekvenčním spektru se poté zobrazují jednotlivá poškození postupně. Na první otáčkové frekvenci se zobrazí nevyváženost stroje s možnými násobky na druhé, třetí atd. frekvenci je-li nevyváha vysoká. Nesouosost se zobrazí velkou špičkou na druhé otáčkové frekvenci v radiálním směru a je způsobována špatným ustavením strojních zařízení. Dále se ve frekvenčním spektru zobrazují vady ložisek. Vznikají zde vyšší vibrační impulzy, které jsou způsobeny přechodem valivých elementů ložiska přes poškození místo. Frekvence, kde se vada ložisek projeví, jsou většinou udávány výrobcem a není tak nutné je dopočítávat. Poslední signál ve frekvenčním spektru tvoří záběr ozubených kol. Je to tzv. zubová frekvence složena z počtu zubů ozubeného kola a součinitele frekvence otáčení hřídele.



Obr. 5 příklad frekvenčního spektra při nevyváze stroje - špička vibrací na první otáčkové frekvenci (18000 ot/min) [autor]

Kepstrální analýza

Ve frekvenčním spektru vyhledává periodicky se opakující děje a zjišťuje pravidelně se opakující rozdíly mezi sousedícími frekvenčními čarami. Tato diagnostická metoda je výborná pro frekvenční spektra s několika nosnými frekvencemi s namodulovanými bočními pásmy. Je využívána pro zjišťování technického stavu převodovek a ozubených kol.

Obálková metoda

Tato metoda je využívána pro zjišťování stavu valivých ložisek a ozubených kol. Vznikají zde periodicky se opakující se děje, které mají mnohem menší vibrační signál a amplitudu, než např.: signál vznikající otáčkami. Pokud dojde k závadě na vnitřní straně ložiska, vzniká malý opakující se signál s frekvencí odpovídající závadě ložiska. Tento vibrační signál je způsobován valivými elementy, které procházejí přes poškozené místo. Signál má velmi malou energii a je ztracen v šumu ostatních budících otáčkových frekvencí. Při zjišťování závady používáme vzorce pro určení obálkové metody.

Základní vzorce obálkové metody:

Poškození vnějšího kroužku:
$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \varphi\right)$$

Poškození vnitřního kroužku:
$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \varphi\right)$$

Poškození valivých elementů:
$$BSF = \frac{Pd}{2 \cdot Bd} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi\right)$$

Poškození klece:
$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \varphi\right)$$

Veličiny:

Průměr valivého elementu:	B_d	[m]
Střední průměr ložiska:	P_d	[m]
Otáčky hřídele:	RPM	[min ⁻¹]
Kontaktní úhel:	φ	[°]
Počet valivých elementů ložiska:	n	[-]

3. Seznámení se stroji Multilathe

K tvorbě této kapitoly a podkapitol bylo využito zdrojů [9], [10], [11].

Stroje Multilathe jsou vysokorychlostní CNC řízená obráběcí centra. Výrobní operace provádějí v pěti osách. Využívají se pro výrobu vysoce přesných produktů ze dřevěného materiálu. Především pak pro výrobu pažeb střelných zbraní a vyřezávání jejich složitějších částí. (Mohou ale být také využita i pro výrobu jiných rotačních dílů.) Díky tomu že disponují čtyřmi vřeteny je na nich možné vyrábět až čtyři stejné výrobky najednou, což šetří spoustu času a finančních prostředků. Každé vřeteno má svůj elektromotor, který slouží jako jeho vlastní pohon. Uvnitř stroje je uložen zásobník až na 40 nástrojů (10 nástrojů pro každé vřeteno). Tyto výrobní prostředky jsou k dispozici po celou dobu obrábění a stroj si je může automaticky sám vyměnit. Kompaktní rozměry obráběcího centra umožňují zařízení instalovat i do menších výroben a dílen. Uzavřený systém zabraňuje úniku prachu z obráběcího centra do prostoru obsluhy stroje. A také poskytuje velkou bezpečnost pro jeho obsluhu.



Obr. 6 obráběcí centrum Multilathe [9]

3.1. Technické specifikace strojů Multilathe

Tab. 1 Technické parametry obráběcího zařízení Multilathe

Technické specifikace obráběcího centra Multilathe				
		Pracovní záběr	Rychlost posuvu	Zrychlení posuvu
Osy:	X	2300 mm	30 m/min	3 m/s ²
	Y	340 mm	30 m/min	3 m/s ²
	Z	390 mm	30 m/min	3 m/s ²
	B	-15° +35°	14 RPM	500°/s ²
	C1, C2	360°	120 RPM	500°/s ²

	Parametry
Minimální délka obrobku:	300 mm
Maximální délka obrobku:	1 000 mm
Osová vzdálenost:	270 mm
Maximální otáčky	24 000 RPM
Výkon:	12 kW
Počet vřeten	4
Maximální počet nástrojů:	40 ks (10 nástrojů pro jedno vřeteno)

3.2. Postavení strojů Multilathe ve firmě

Obráběcí centra Multilathe mají ve společnosti Česká zbrojovka a.s. důležité postavení. Stroje jsou ve firmě využívány pro výrobu pažeb střelných zbraní. Vyrábí se z bukového a ořechového dřeva. Při výrobě je kladen velký důraz na kvalitu opracování, protože výsledný produkt musí mít perfektně upravený povrch z důvodu ergonomie držení zbraně a samozřejmě i z estetického hlediska.

4. Popis měření

První vibrodiagnostické měření proběhlo dne 11. 11. 2016 ve společnosti Česká Zbrojovka a.s. v souladu s normou ČSN ISO 10 816 na třech obráběcích centrech značky Multilathe. Na každém stroji byla diagnostikována všechna čtyři vřetena. Měření bylo prováděno přístrojem Adash A4400 VA4 Pro včetně tří snímačů vibrací pro horizontální, vertikální a axiální směr. Podmínky měření byly stanoveny na 18000 ot/min, bez zatížení s upnutým nástrojem.

Pro lepší porozumění vývoje technického stavu strojních zařízení Multilathe bylo uskutečněno dne 7. 4. 2017 další vibrodiagnostické měření. Technická diagnostika strojů probíhala za stejných podmínek jako předešlé měření s rozdílnými nástroji upnutými ve vřetenech a s odlišnou polohou obráběcích hlav.



Obr. 7 vibrodiagnostika obráběcích center Multilathe [autor]

4.1. Vibrační analyzátor Adash A4400 VA4 Pro

K tvorbě této kapitoly bylo využito zdrojů [12], [13], [14].



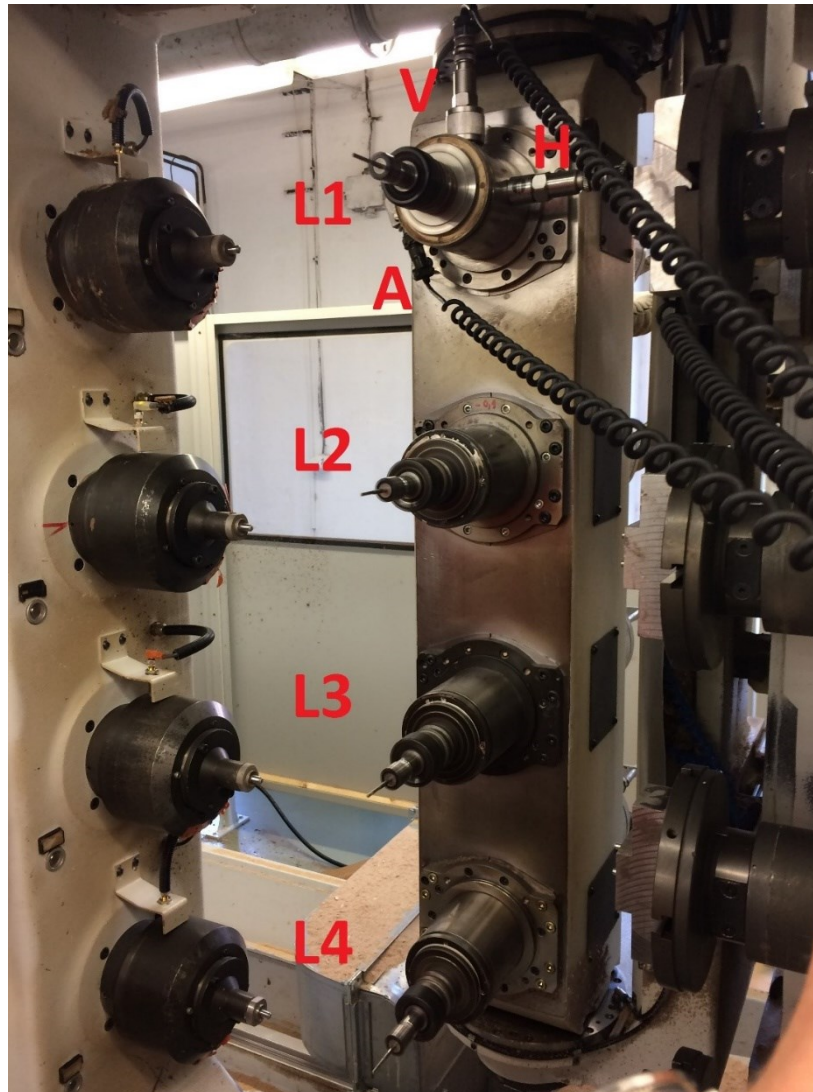
Obr. 8 měřicí přístroj Adash A4400 VA4 Pro se snímači vibrací [autor]

K měření vibrací byl využit přístroj od společnosti Adash konkrétně model A4400 VA4 Pro. Jedná se o přenosné zařízení určené především pro techniky zabývající se servisní a inspekční činností. Dále jej lze využít pro diagnostiku strojů a vyvažování. Přístroj je vybaven spousty moduly pro zjištění závady nebo její řešení např.: pochůzka, záznam, provozní vyvažování strojních zařízení, bump test, měření rozběhů a doběhů, akustická měření, atd.

Tab. 2 Technické parametry měřicího přístroje Adash A4400 VA4 Pro

Technické specifikace měřicího zařízení Adash A4400 VA4 Pro	
Vstupní kanály:	4 AC, ICP® napájení (0/1) 4 DC pro procesní veličiny 1 TACHO pro externí spouštění
Vstupní rozsah:	AC +/- 12 V špička-špička DC +/- 24V
AD převodník:	24 bitů 64 bitů zpracování signálu nevyžaduje AutoGain
Dynamický rozsah S/N:	120 dB
Frekvenční rozsah:	maximální rozsah: 1 Hz - 90 kHz (1 Ch, 194 kHz vzorkování) maximální rozsah: 1 Hz - 25 kHz (4 Ch, 64 kHz vzorkování) minimální rozsah: 1 Hz - 25 Hz (4 Ch, 64 Hz vzorkování)
Způsob vzorkování:	plně synchronní pro 4 kanály
Rozlišení FFT:	min. 100 čar max. 3 276 800 čar
Processor:	Intel Atom 1.6 GHz
Paměť, pochůzka:	120 GB, max. 4 GB pro jednu pochůzku, počet pochůzek je limitován pouze volnou pamětí
Zpracování dat:	FFT v reálném čase DEMODO - ENVELOPE analýza ACMT - analýza pomaloběžných ložisek řádková analýza uživatelská definice pásem měření RPM měření DC (procesních veličin) měření orbit
Displej:	barevný 800 x 600 bodů, LCD
Rozhraní:	USB
Napájení:	bateriové - 5 hodin provozu, AC 230 V
Rozměry a váha:	230 x 140 x 60 mm, 2,2 kg

4.2. Měřicí místa



*Obr. 9 pohled na měřicí místa na stroji Multilathe s vyznačenými měřicími body a směry
[autor]*

Vhodný výběr měřících míst je velmi důležitý pro přesné naměření dat. Měřicí místa byla před připevněním senzorů důkladně zbavena nečistot. Snímače vibrací byly upevněny pomocí magnetu. Bylo voleno nejbližší možné místo k ložiskům s ohledem na bezpečnost při měření.

Na každém stroji byla vybrána čtyři měřicí místa označena značkami L1 až L4 od shora dolů (jedno měřicí místo pro jedno vřeteno stroje). V každém měřicím místě byly upevněny tři snímače vibrací ve vertikálním, horizontálním a axiálním směru.

5. Analýza a výsledky 1. vibrodiagnostického měření

Pro analýzu a vyhodnocení naměřených vibrací bylo využito softwaru Virtual Unit VA4Pro.

Doporučené hodnoty vibrací

Přípustné hodnoty vibrací pro tato zařízení jsou stanoveny dle normy ČSN 20 0065. Měřené a analyzované veličiny jsou efektivní hodnoty rychlosti vibrací a efektivní hodnoty zrychlení vibrací.

Tab. 3 Tabulka doporučených efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz dle normy ČSN 20 0065 (v_{RMS})

Pásma vibrací	Mezní hodnoty rychlosti vibrací
A-B	0 - 0,6 mm/s
B-C	0,6 - 1,8 mm/s
C-D	od 1,8 mm/s

Tab. 4 Tabulka doporučených efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu 500 - 25600 Hz dle zkušeností vedoucího DP (a_{RMS})

Pásma vibrací	Mezní hodnoty zrychlení vibrací
A-B	0 - 2 g
B-C	2 - 4 g
C-D	od 4 g

Pásmo A - V tomto pásmu se nacházejí vibrace nových strojů nebo těsně po převzetí.

Pásmo B – Vibrace v tomto pásmu dovolují, aby stroje běžely po neomezeně dlouhou dobu bez nutnosti opravy.

Pásmo C – Stav strojů jejichž vibrace spadají do tohoto pásma je neuspokojivý pro dlouhodobější provoz. Provoz těchto strojů je doporučen do doby, než nastane možnost opravy.

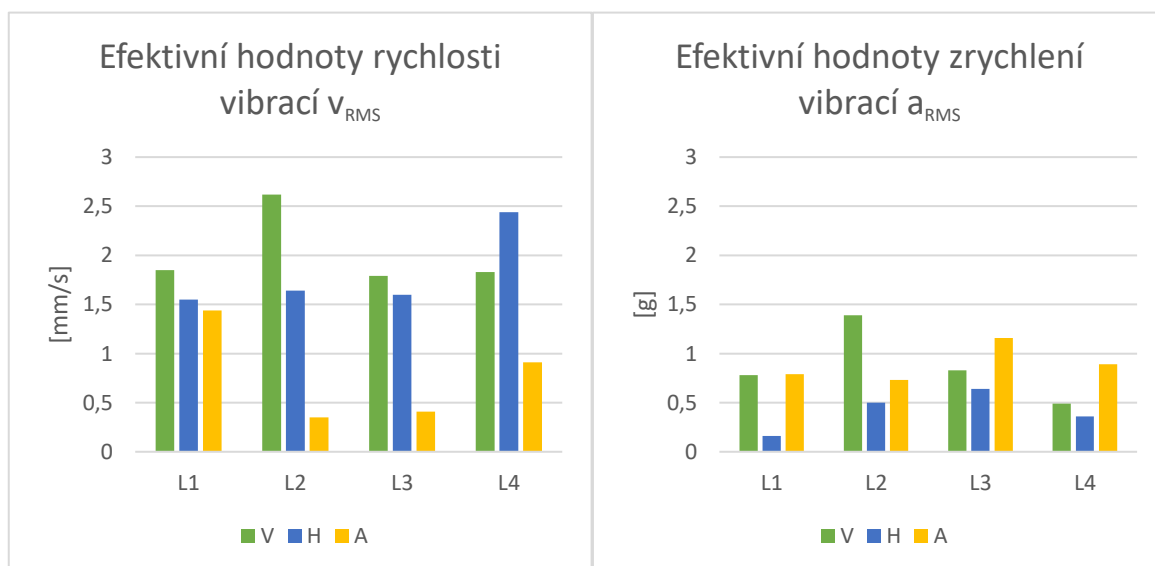
Pásmo D – Provoz strojů v tomto pásmu vibrací se nedoporučuje. Takhle vysoké vibrace mohou vyvolat poškození stroje.

5.1. Vyhodnocení stroje Multilathe 1 po prvním měření

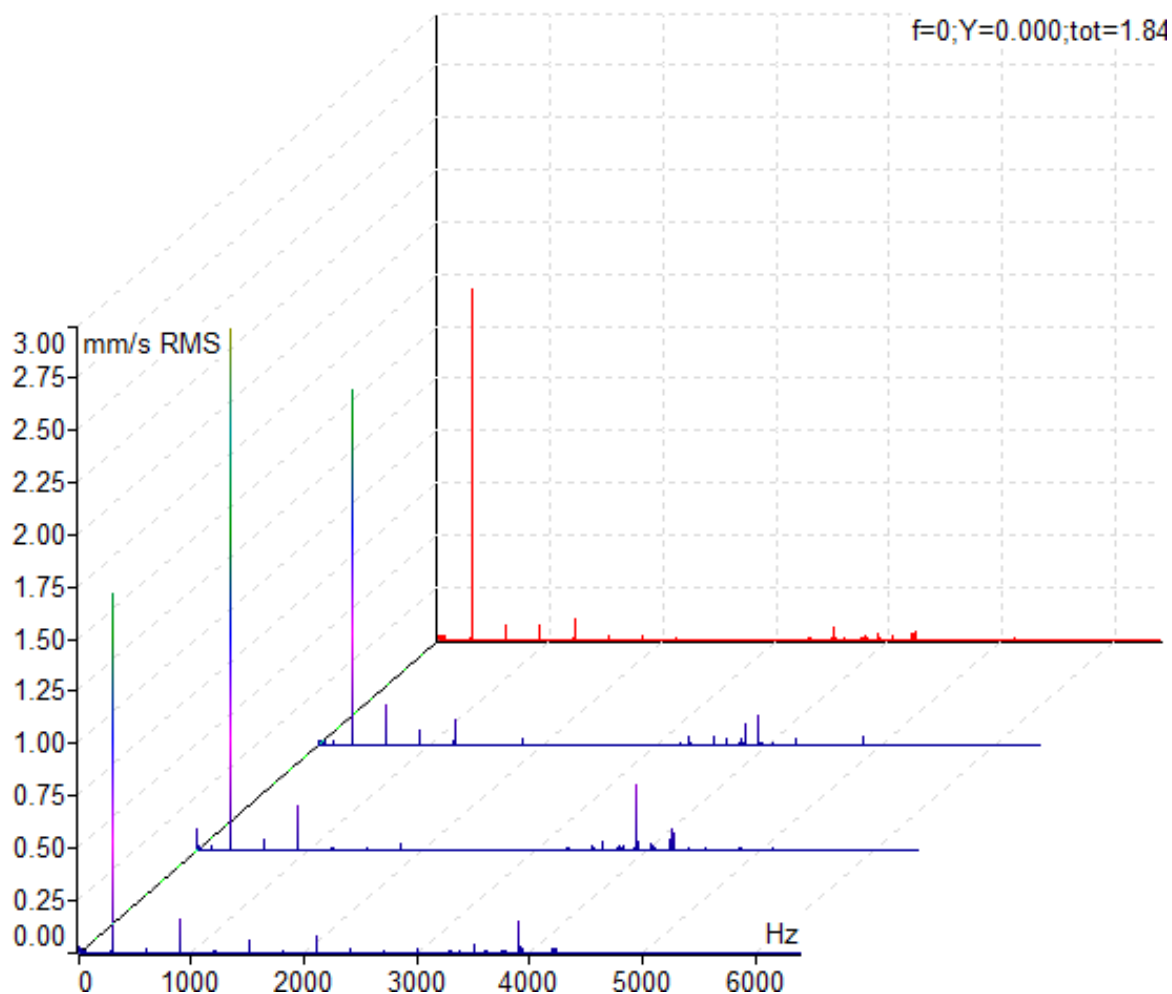
Tab. 5 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 1, první měření.

Multilathe 1		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	1,85	2,62	1,79	1,83
	H	1,55	1,64	1,6	2,44
	A	1,44	0,35	0,41	0,91
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	0,78	1,39	0,83	0,49
	H	0,16	0,5	0,64	0,36
	A	0,79	0,73	1,16	0,89
Max. otáčky [ot/min]		18000			

Z tabulky můžeme vyčíst, že nejvyšší rychlosti vibrací jsou na vřetenu číslo 2 (L2) ve vertikálním směru. Nejlepší je naopak vřeteno číslo 3 (L3), kde jsou rychlosti vibrací nejnižší. Všechna naměřená zrychlení vibrací spadají do pásma A-B.

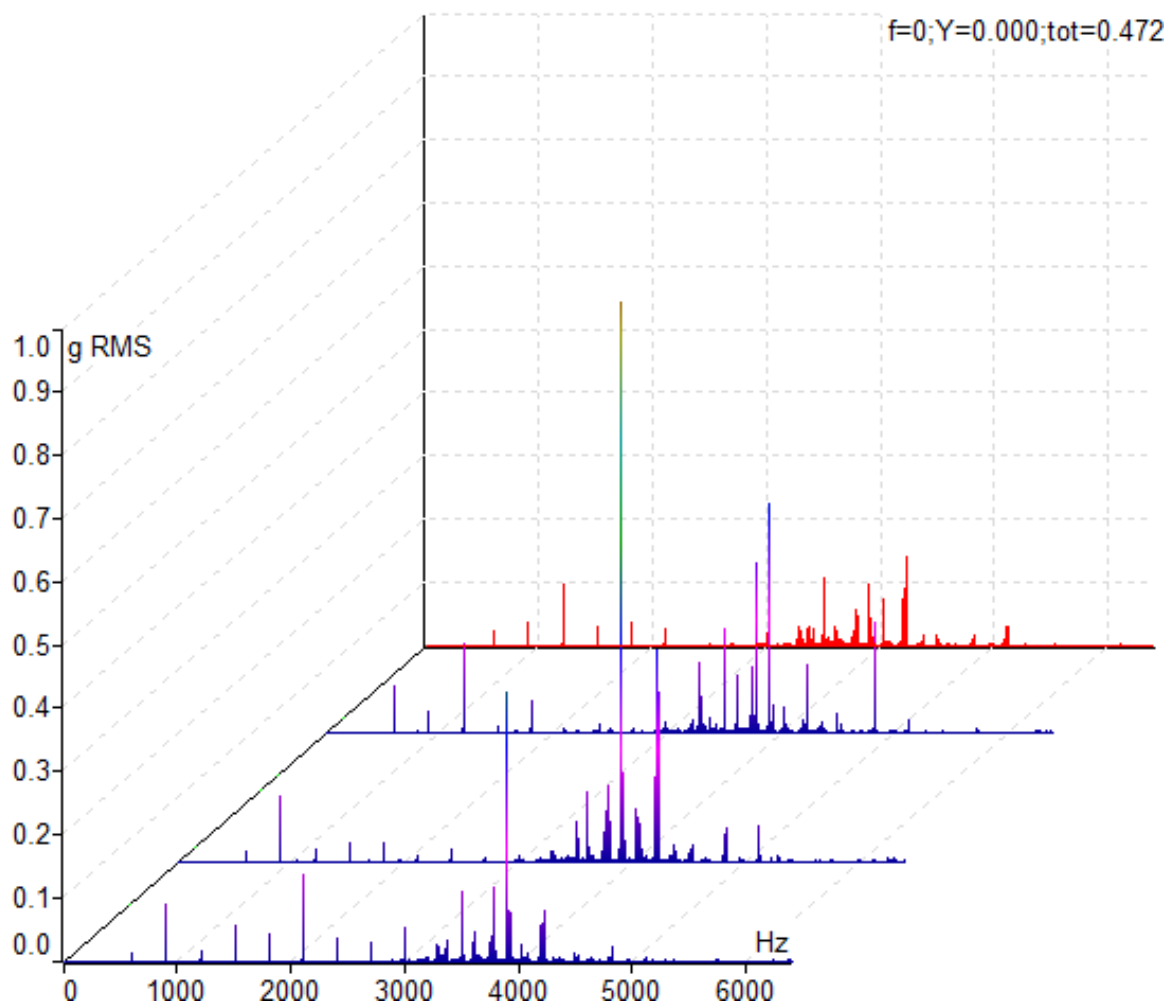


Obr. 10 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 1 ve všech měřených bodech (L1 – L4), první měření.



Obr. 11 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.

Srovnání všech vřeten stroje Multilathe 1 ve frekvenčním spektru měřeno vertikálním směrem při 18000 ot/min. Na strojích můžeme pozorovat špičku vibrací na první otáčkové frekvenci (300 Hz) a její násobky na dalších otáčkových frekvencích. Tyhle projevy vibrací ukazují na drobnou nevyváhu na vřetenech obráběcího centra.

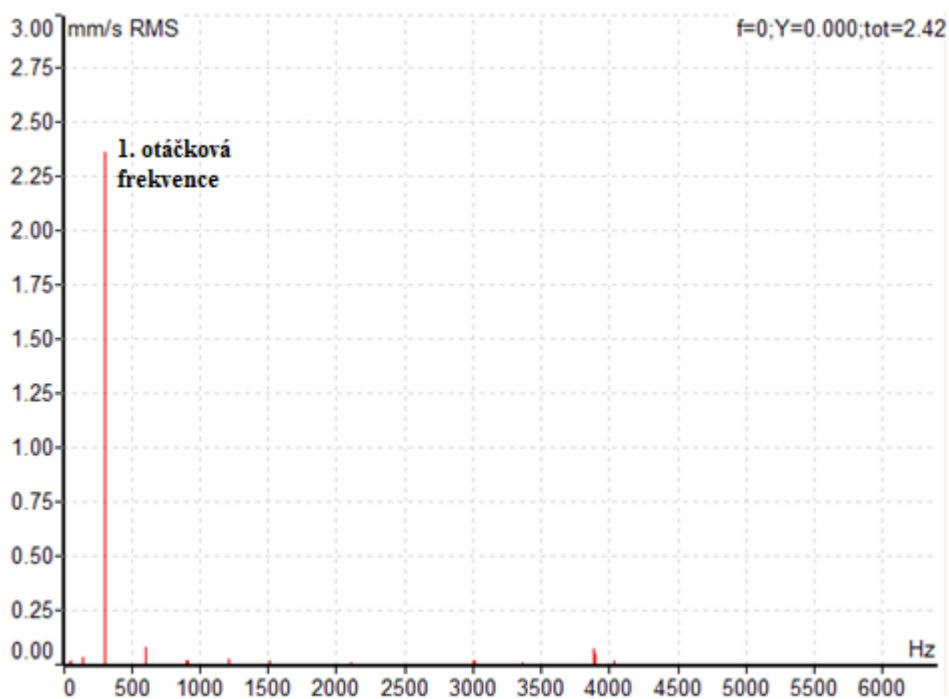


Obr. 12 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.

Z grafu je patrné že nejvyšší zrychlení vibrací se vyskytují na měřeném místě L2 kolem frekvence 4000 Hz. Zvýšené hodnoty zrychlení vibrací prisuzují možnému zhoršenému stavu ložisek, nicméně musíme brát v úvahu také vysokou rychlost 18000 ot/min, při které jsou zrychlení ve vyšších hodnotách.



Obr. 13 Měření vibrací na stroji Multilathe 1 v bodě L4. [autor]



Obr. 14 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací stroje Multilathe 1 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, měřeno v bodě L4 (vřeteno 4), první měření.

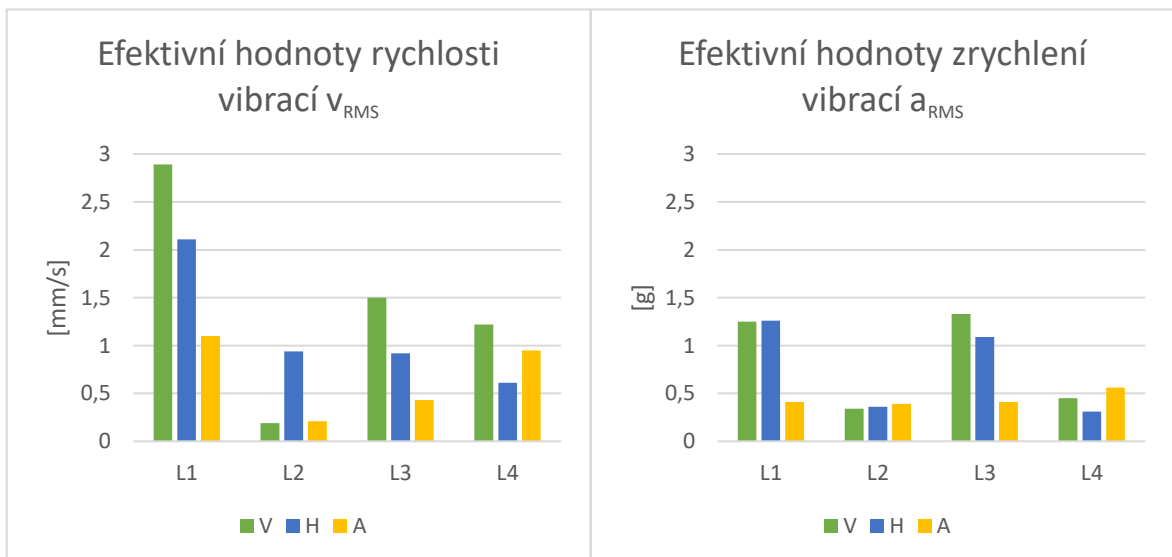
V měřícím místě L4 (vřeteno 4) byly naměřeny vyšší vibrace stroje v horizontálním i vertikálním směru. Po prozkoumání frekvenčního spektra je vidět špička na první otáčkové frekvenci a její malý násobek na druhé. Což značí nevyváhu na stroji Multilathe.

5.2. Vyhodnocení stroje Multilathe 2 po prvním měření

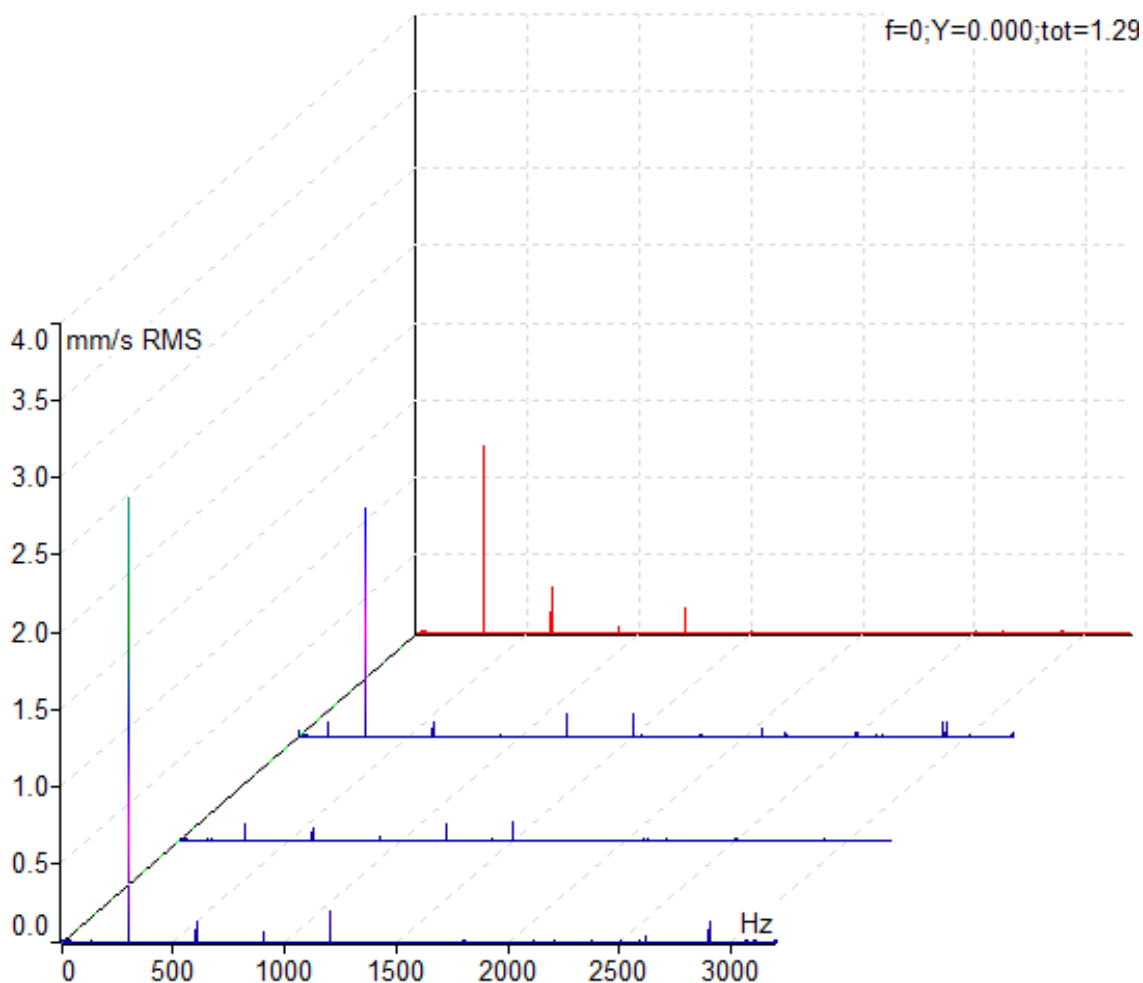
Tab. 6 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 2, první měření.

Multilathe 2		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	2,89	0,19	1,5	1,22
	H	2,11	0,94	0,92	0,61
	A	1,1	0,21	0,43	0,95
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	1,25	0,34	1,33	0,45
	H	1,26	0,36	1,09	0,31
	A	0,41	0,39	0,41	0,56
Max. otáčky [ot/min]		18000			

Nejvyšší vibrace byly naměřeny na vřetenu číslo 1 (L1), kdy dosahují rychlosti až 2,89 mm/s ve vertikálním směru a 2,11 mm/s ve směru horizontálním. Maximální zrychlení vibrací bylo naměřeno taktéž v bodě L1, ale jeho velikost je relativně nízká.

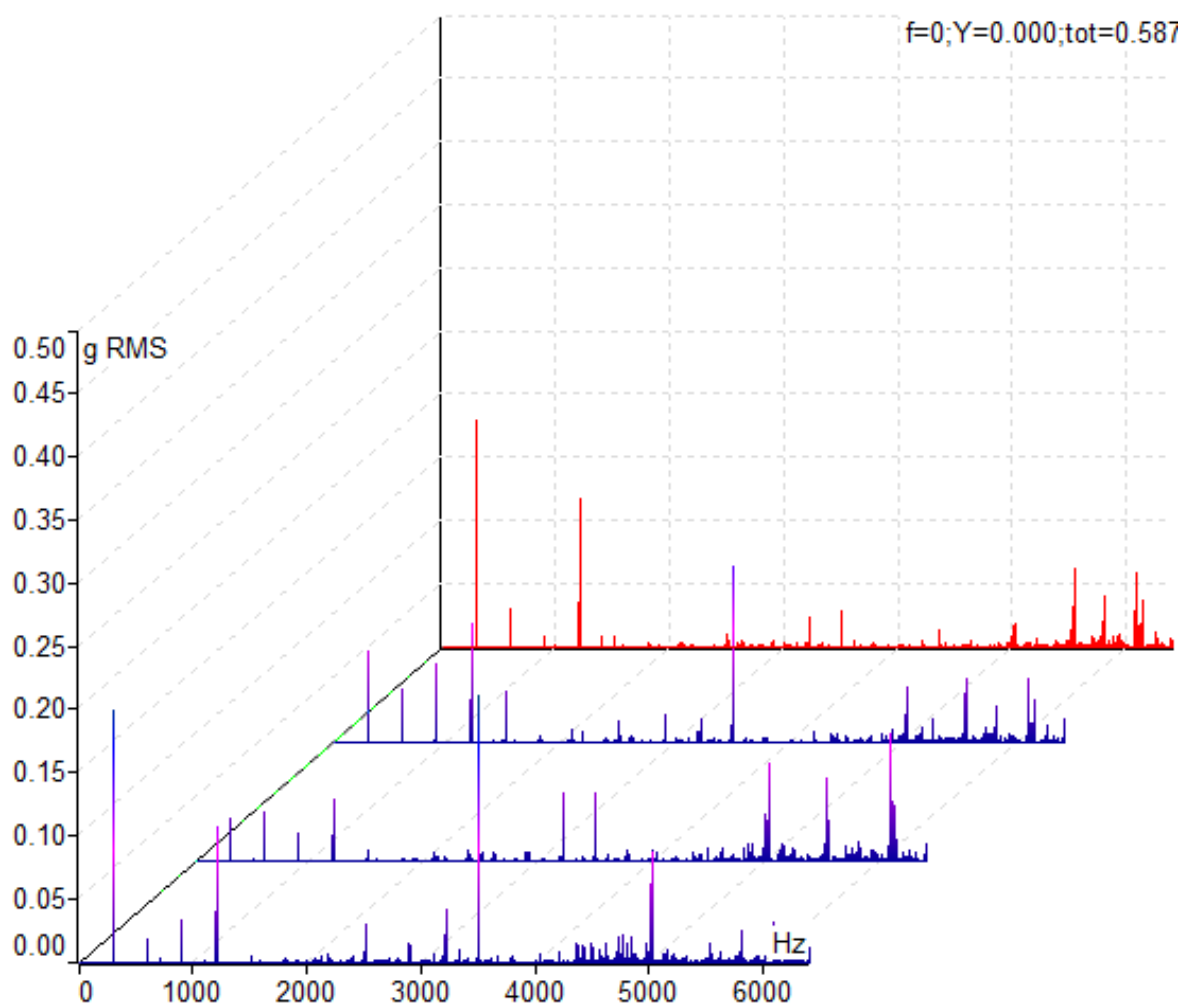


Obr. 15 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 2 ve všech měřených bodech (L1 – L4), první měření.

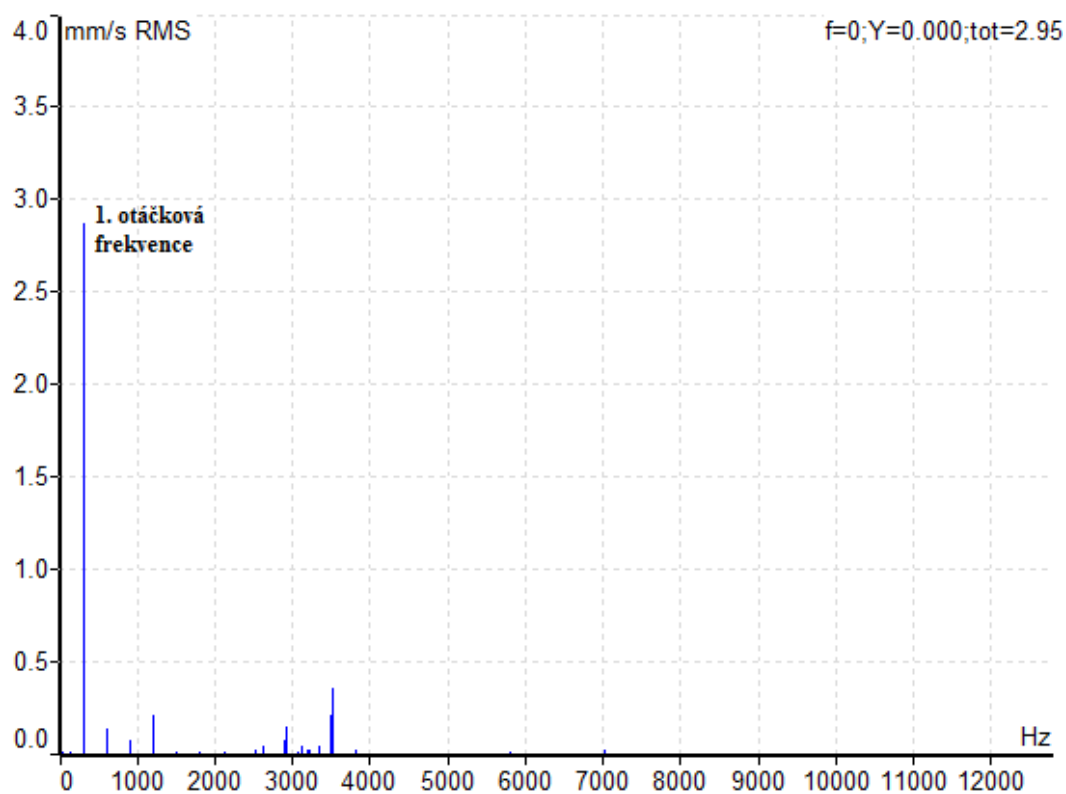


Obr. 16 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.

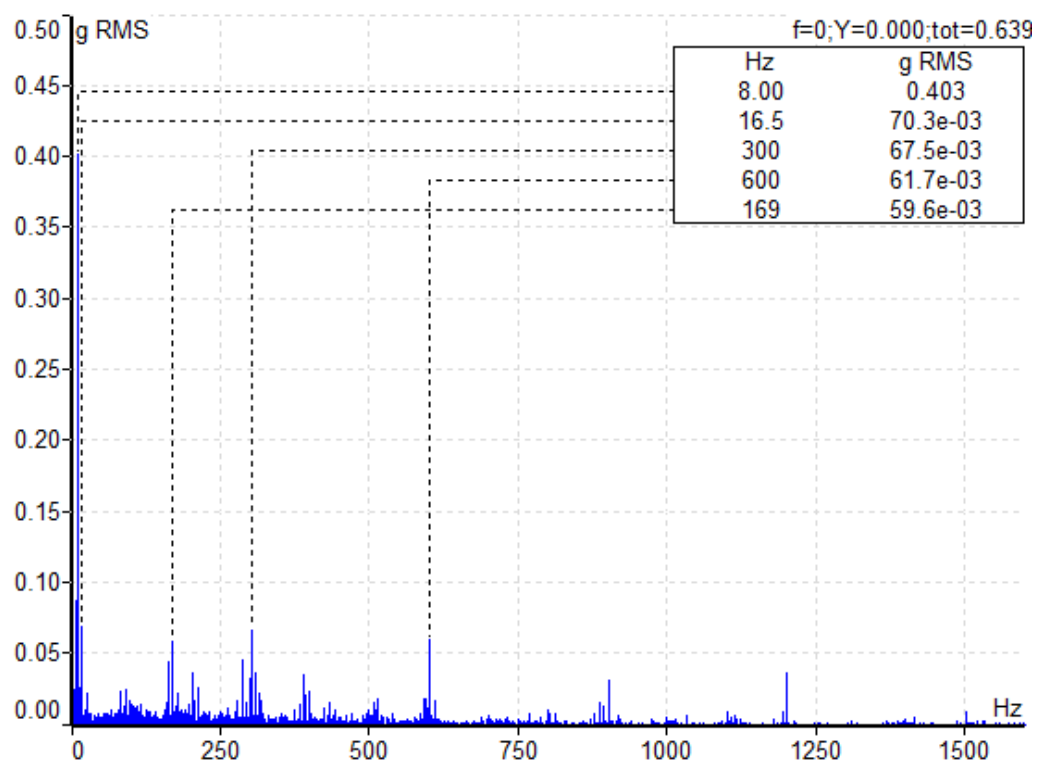
Největší vibrace se vyskytují na frekvenci 300 Hz, která odpovídá otáčkové frekvenci. V měřeném místě L2 je naměřená nejmenší rychlost vibrací 0,19 mm/s na první otáčkové frekvenci. Je to zároveň maximální rychlost vibrací naměřená v tomto měřicím místě. Maximální vibrace všech vřeten se nacházejí na první otáčkové frekvenci s jejich možnými násobky na dalších otáčkových frekvencích stroje. V měřených místech L1, L3 a L4 je diagnostikována navývaha.



Obr. 17 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.



Obr. 18 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, měřeno v bodě L1 (vřeteno 1), první měření.



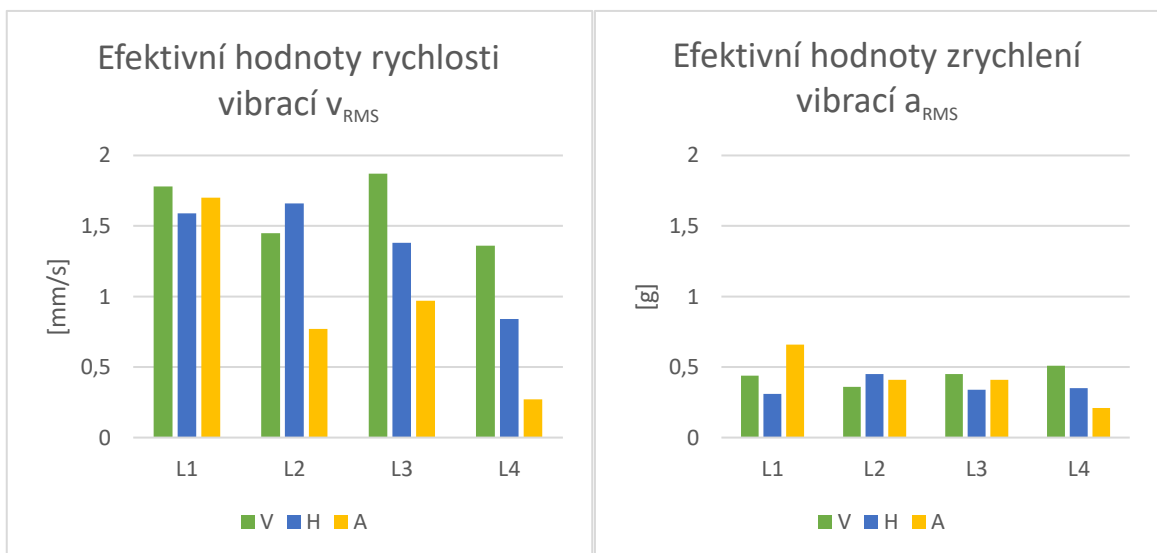
Obr. 19 Obálková metoda stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, v bodě L1 (vřeteno 1), první měření.

5.3. Vyhodnocení stroje Multilathe 3 po prvním měření

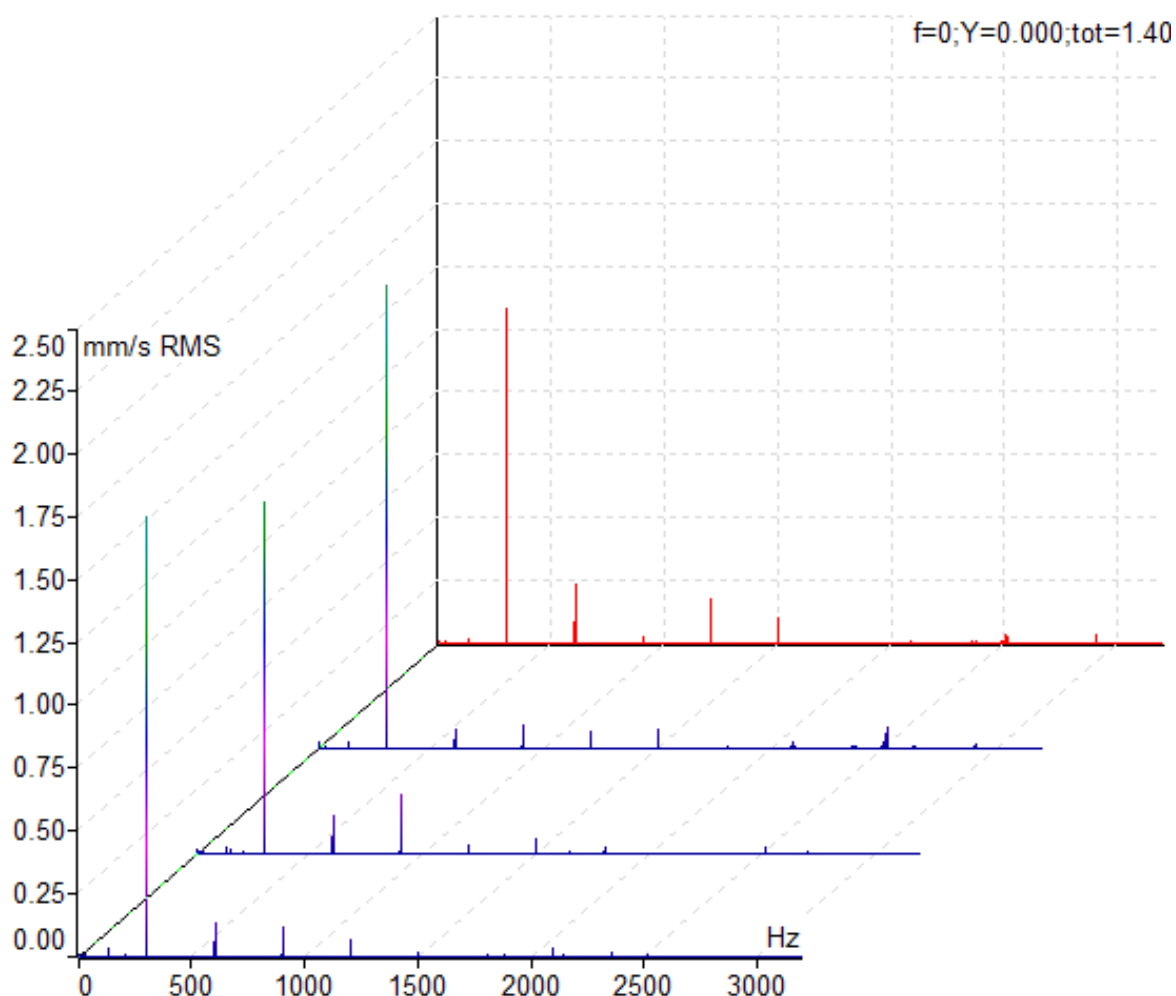
Tab. 7 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 3, první měření.

Multilathe 3		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	1,78	1,45	1,87	1,36
	H	1,59	1,66	1,38	0,84
	A	1,7	0,77	0,97	0,27
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	0,44	0,36	0,45	0,51
	H	0,31	0,45	0,34	0,35
	A	0,66	0,41	0,41	0,21
Max. otáčky [ot/min]		18000			

Maximální rychlost vibrací byla zjištěna v bodě L3. Na ostatním vřetenech jsou rychlosti vibrací mírně zvýšené. Zrychlení vibrací je jako u předchozích strojů v nízkých hodnotách.

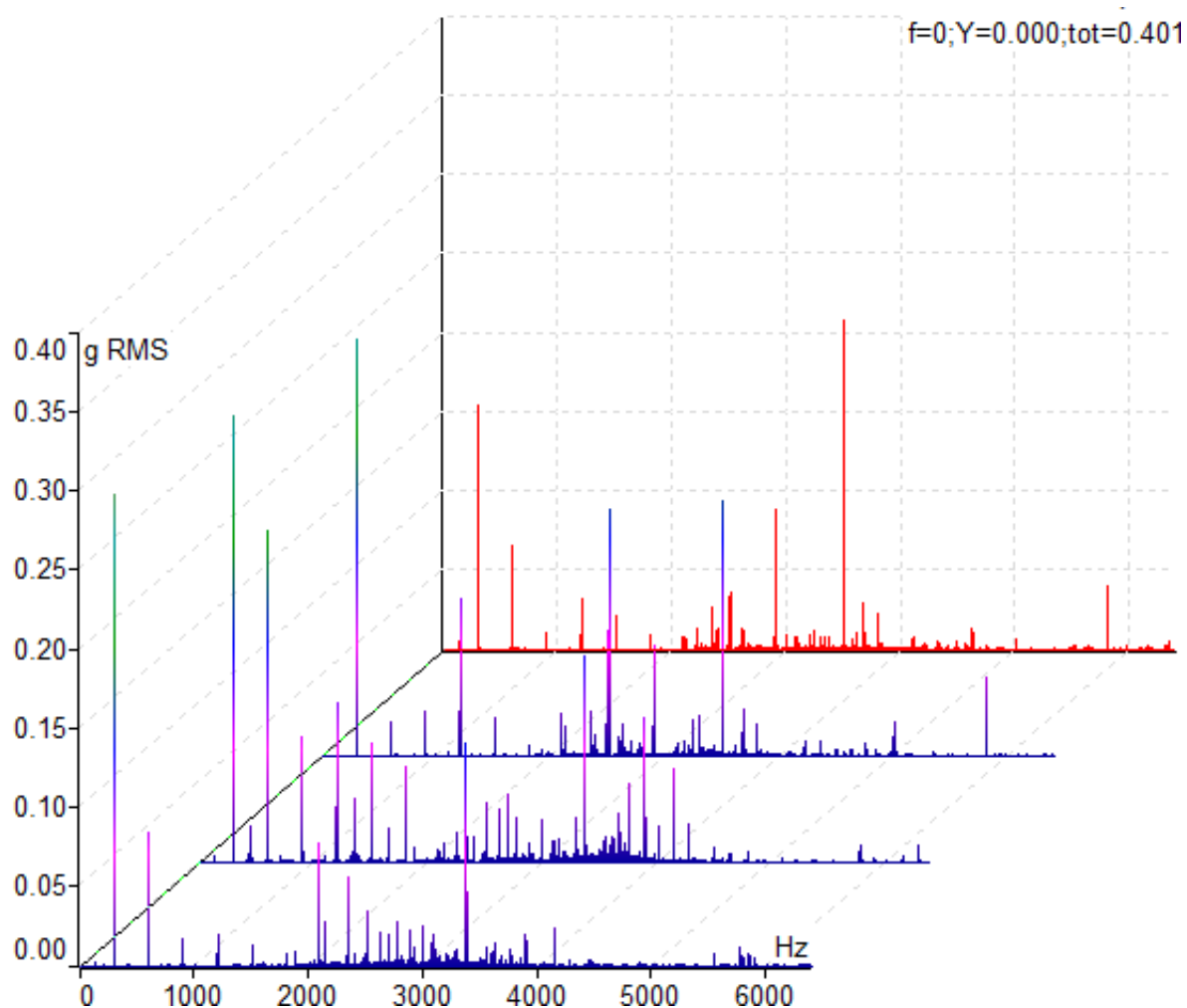


Obr. 20 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 3 ve všech měřených bodech (L1 – L4), první měření.



Obr. 21 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 3 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.

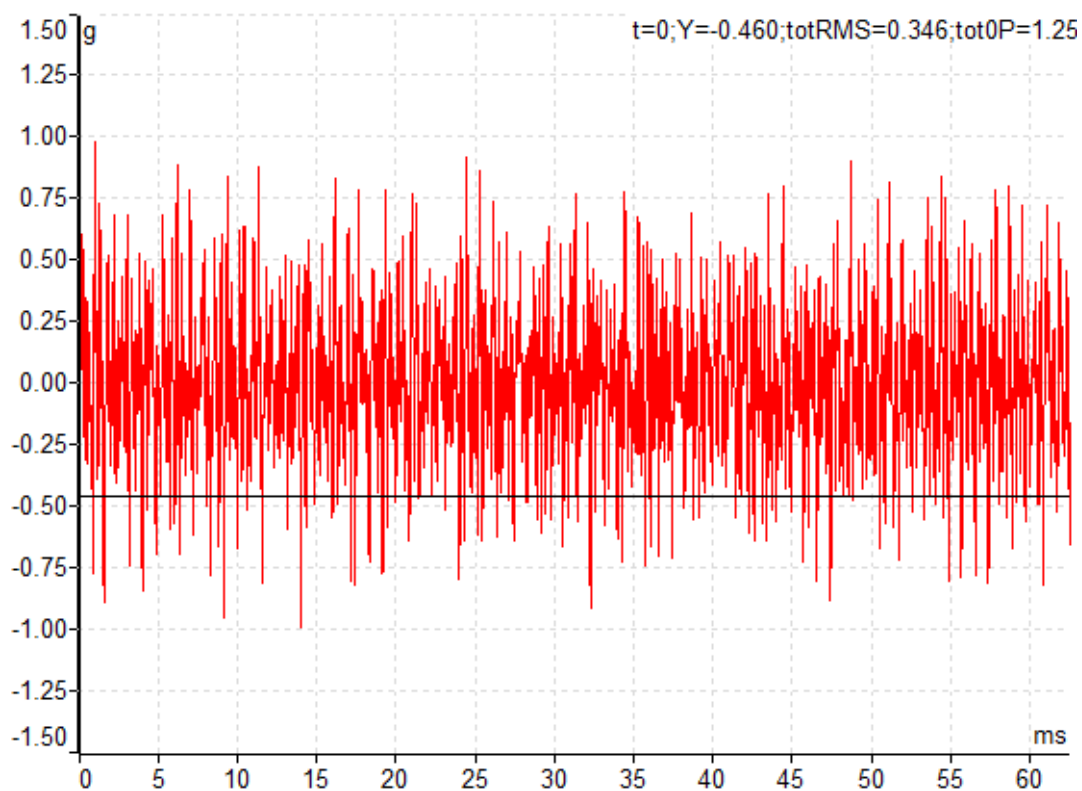
Na stroji Multilathe 3 byly naměřeny největší rychlosti vibrací na vřetenu číslo 3 (měřicí místo L3) ve vertikálním směru. Maximální vibrace zde nabývají hodnoty 1,87 mm/s. Vibrace ve všech měřených místech se pohybují kolem hodnoty 1,5 mm/s. A jsou zobrazeny na první otáčkové frekvenci (300 Hz). Násobky otáčkové frekvence jsou dále zobrazeny na frekvenci 600 Hz a 900 Hz. Jako u předchozích dvou strojů Multilathe se i zde projevuje nevyváženost.



Obr. 22 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 3 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, první měření.



Obr. 23 Měření vibrací na stroji Multilathe 3 v bodě L3. [autor]

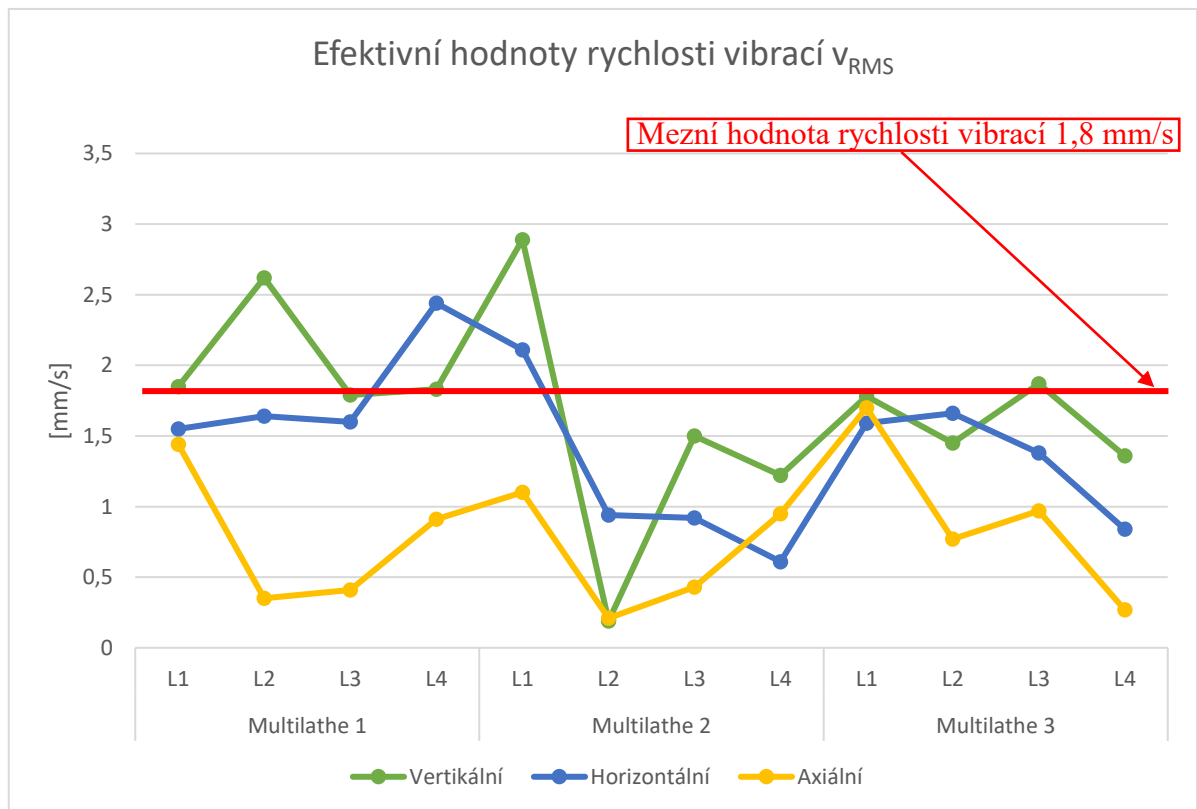


Obr. 24 Časový signál efektivní hodnoty zrychlení vibrací stroje Multilathe 3 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, v bodě L3, první měření.

V časovém signále, kdy doba trvání jedné otáčky je 3,3 ms můžeme vidět velikosti zrychlení vibrací.

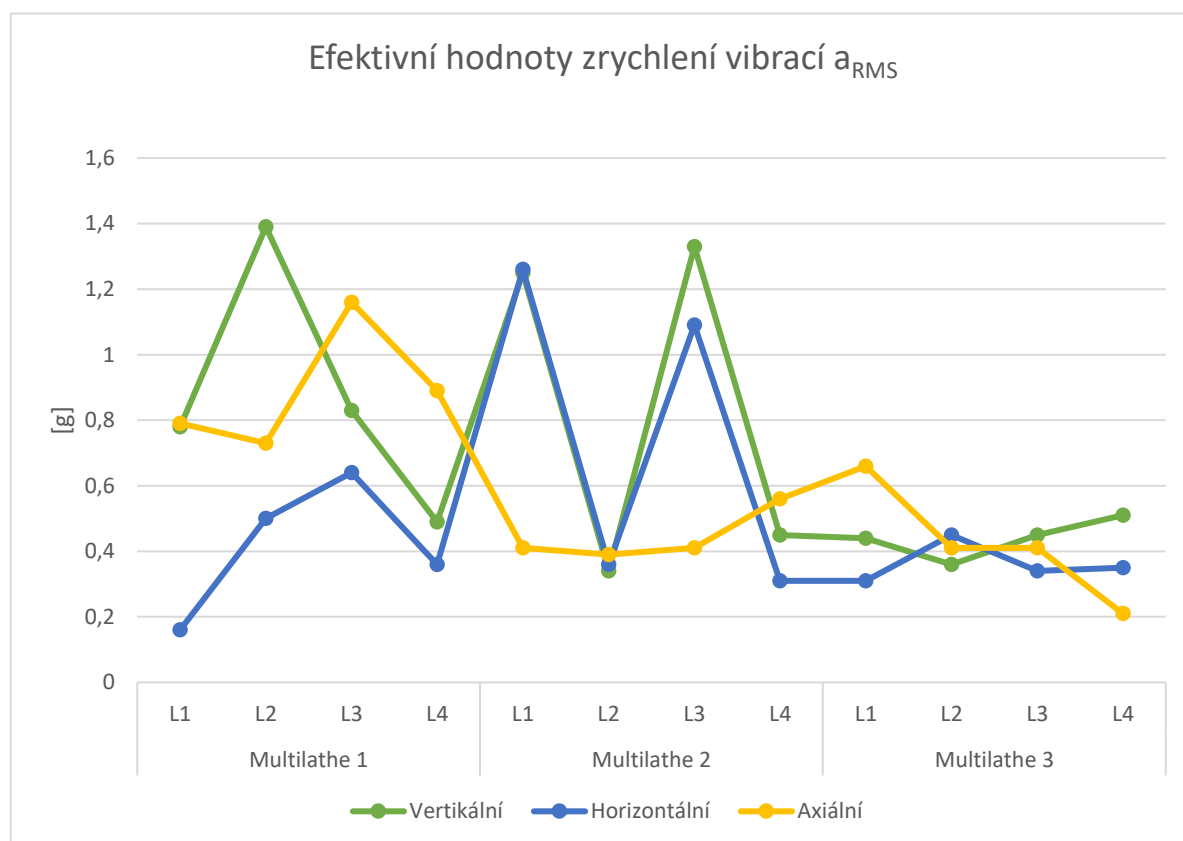
5.4. Porovnání technického stavu strojů po prvním měření

Největší rychlosti vibrací byly naměřeny na stroji Multilathe 2 v měřeném bodě L1 (vřeteno 1) ve vertikálním směru, ostatní jeho měřené body nabývají podobných hodnot jako stroj Multilathe 3. Výrobní zařízení Multilathe 1 má v průměru nejvyšší hodnoty vibrací ve vertikálním směru. Nejlépe naopak z porovnání vychází stroj Multilathe 3 na kterém jsou celkově vibrace nižší oproti ostatním obráběcím centrům.

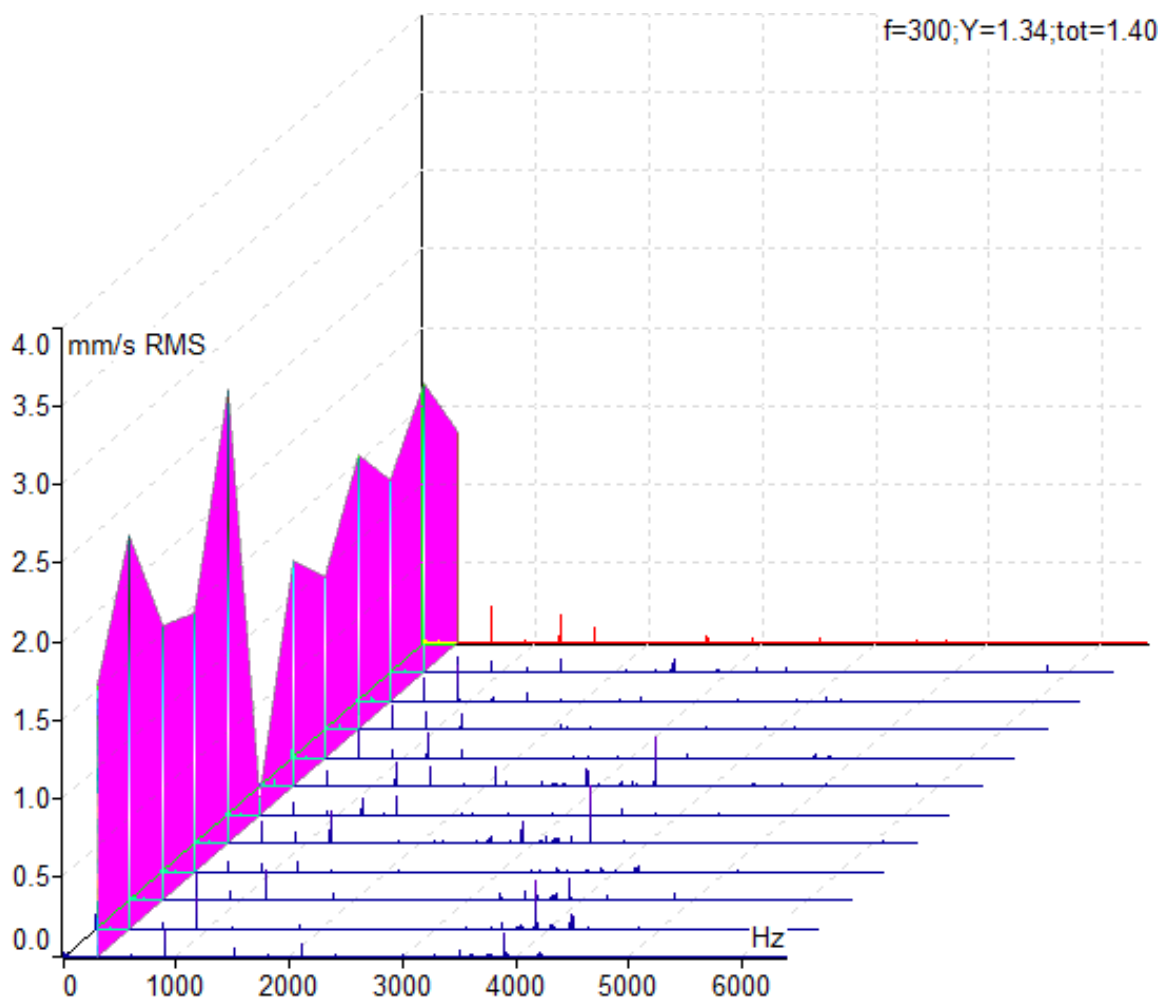


Obr. 25 Porovnání naměřených rychlostí vibrací na obráběcích centrech Multilathe a jejich jednotlivých vřetenech po prvním měření.

Stroj Multilathe 1 má nejvyšší naměření zrychlení vibrací v měřeném bodě L2 (1,39 g) ve vertikálním směru. Další zvýšené vibrace jsou zaznamenány na obráběcím centru Multilathe 2 v měřeném bodě L1 a L3. Na strojním zařízení Multilathe 3 je zrychlení vibrací na velmi nízké úrovni. Všechny naměřené zrychlení vibrací jsou v pásmu doporučených hodnot: A-B.

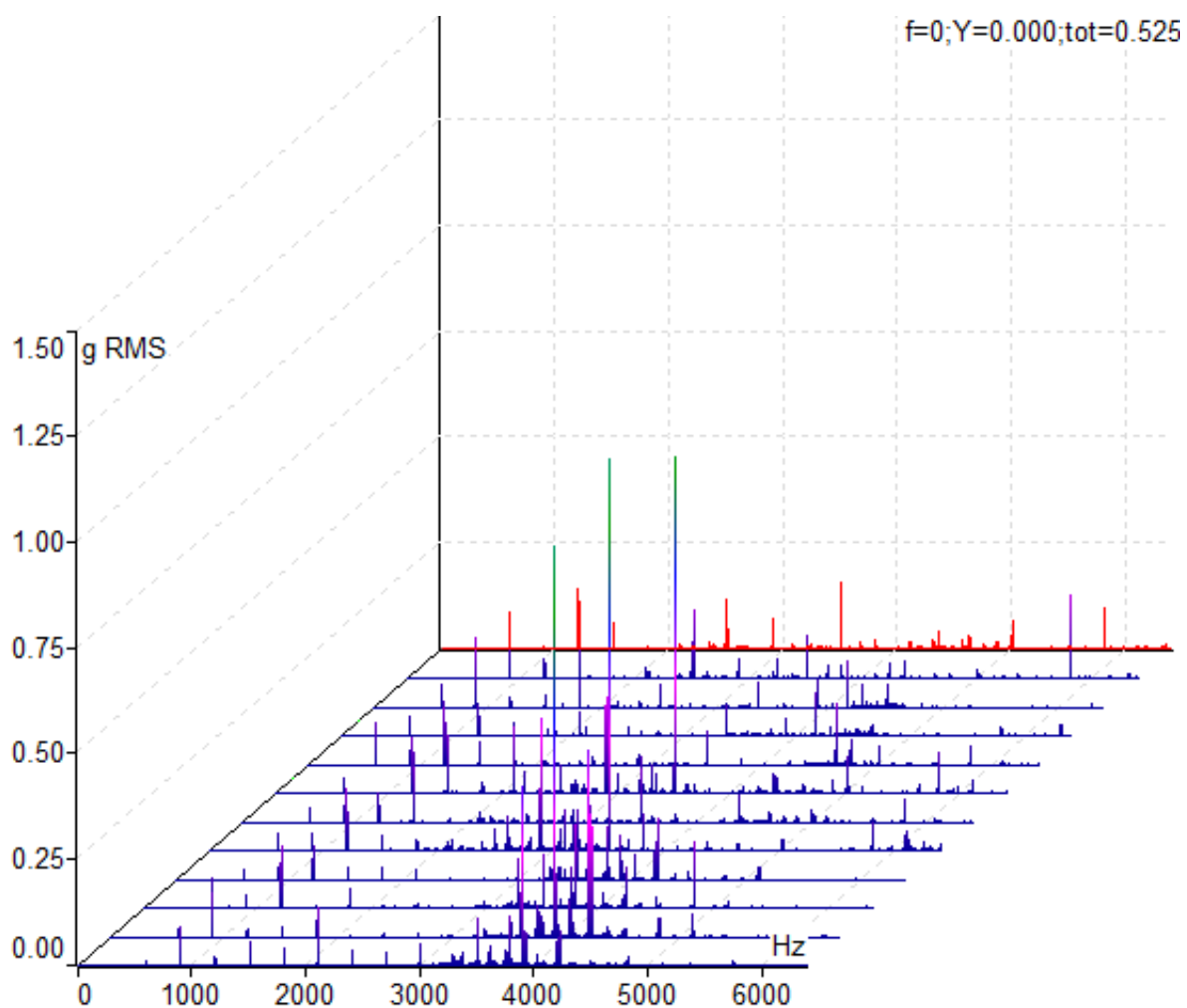


Obr. 26 Porovnání naměřených zrychlení vibrací na obráběcích centrech Multilathe a jejich jednotlivých vřetenech po prvním měření.



Obr. 27 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací všech strojů Multilathe po prvním měření ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu stroj Multilathe 1 měřený bod L1 až L4, dále Multilathe 2 měřený bod L1 až L4 apod.

Z grafu je zjevné, že se na všech strojích a téměř na všech měřených místech vyskytuje špička vibrací na první otáčkové frekvenci, což značí nevyváženost na obráběcích centrech. Výjimkou je výrobní zařízení Multilathe 2 měřené místo L2, kde rychlost vibrací na otáčkové frekvenci ve vertikálním směru dosahuje pouze 0,19 mm/s. Nejvyšší rychlosti vibrací jsou pak také na stroji Multilathe 2 v měřeném bodě L1, kde byla naměřena rychlost vibrací 2,89 mm/s.



Obr. 28 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací všech strojů Multilathe po prvním měření ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu stroj Multilathe 1 měřený bod L1 až L4, dále Multilathe 2 měřený bod L1 až L4 apod.

6. Analýza a výsledky 2. vibrodiagnostického měření

Vyhodnocení rychlosti a zrychlení vibrací naměřených na třech obráběcích centrech Multilathe. Za použití stejných doporučených hodnot vibrací a software jako u vyhodnocení prvního vibrodiagnostického měření.

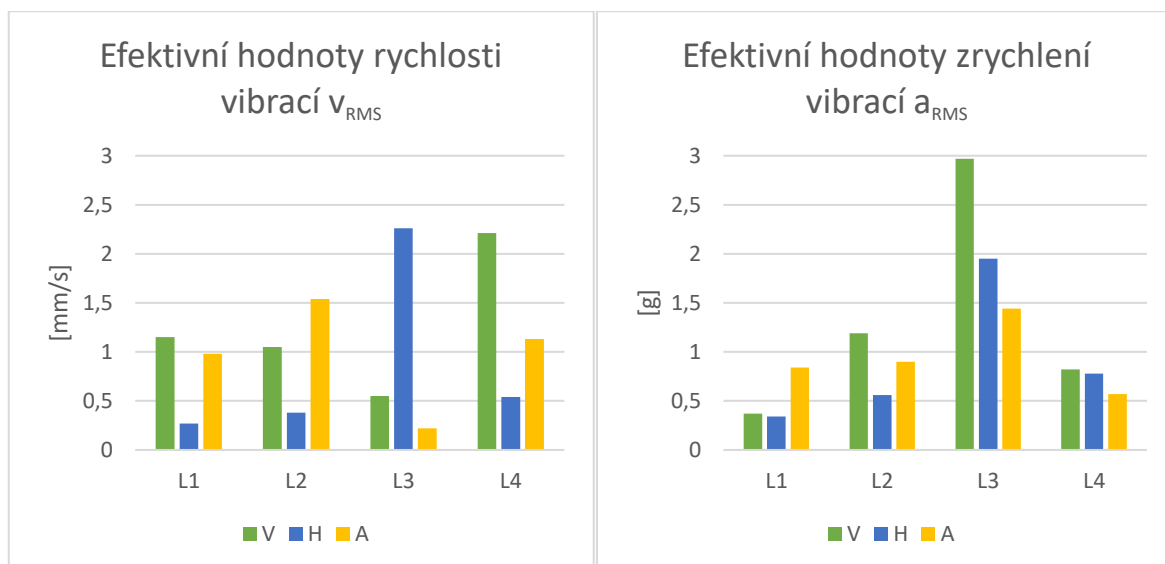
6.1. Vyhodnocení stroje Multilathe 1 po druhém měření

Tab. 8 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 1, druhé měření.

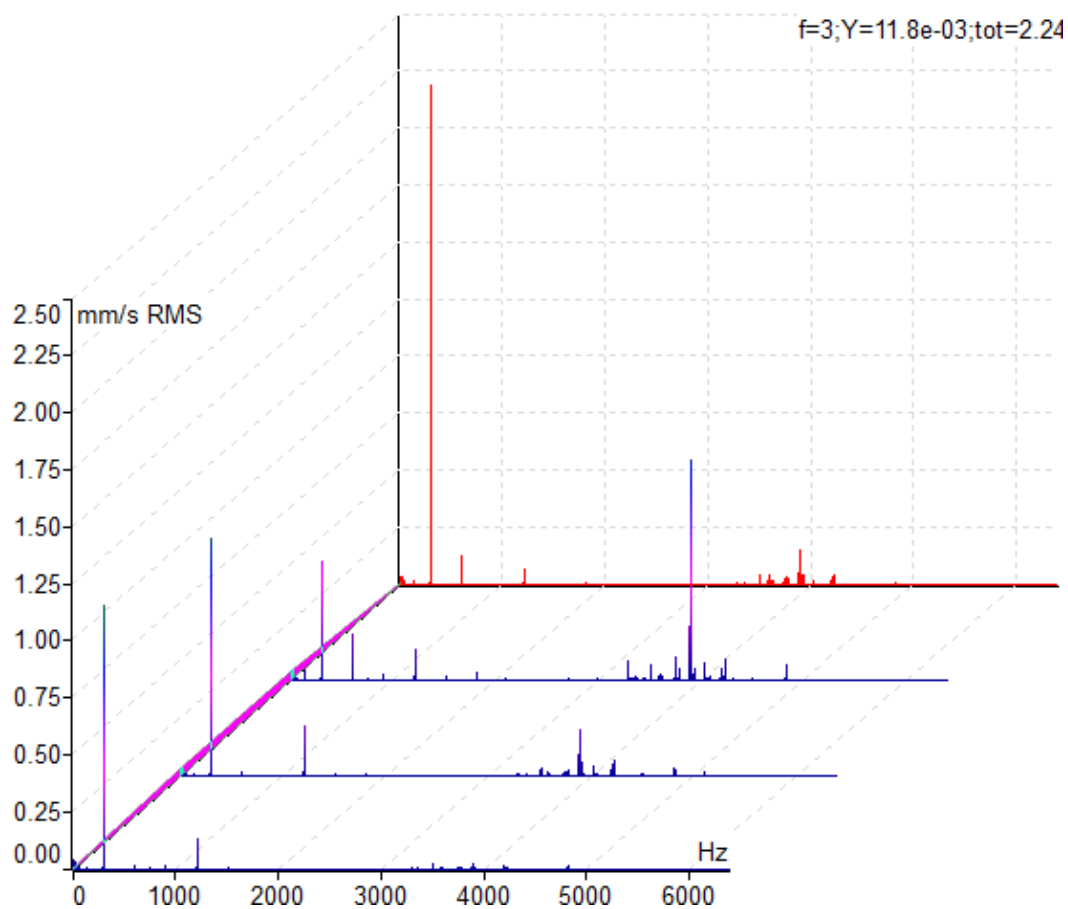
Multilathe 1		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	1,15	1,05	0,55	2,21
	H	0,27	0,38	2,26	0,54
	A	0,98	1,54	0,22	1,13
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	0,37	1,19	2,97	0,82
	H	0,34	0,56	1,95	0,78
	A	0,84	0,9	1,44	0,57
Max. otáčky [ot/min]		18000			

Nejvyšší hodnoty rychlosti vibrací na diagnostikovaném obráběcím centru Multilathe 1 se nacházejí na vřetenu číslo 3 (L3) a 4 (L4). V měřeném bodě L3 je neměřeno i vysoké zrychlení vibrací ve vertikálním směru které nabývá hodnoty 2,97 g. Na ostatních vřetenech je zrychlení vibrací v nižších hodnotách a maximálně ve třídě A-B.

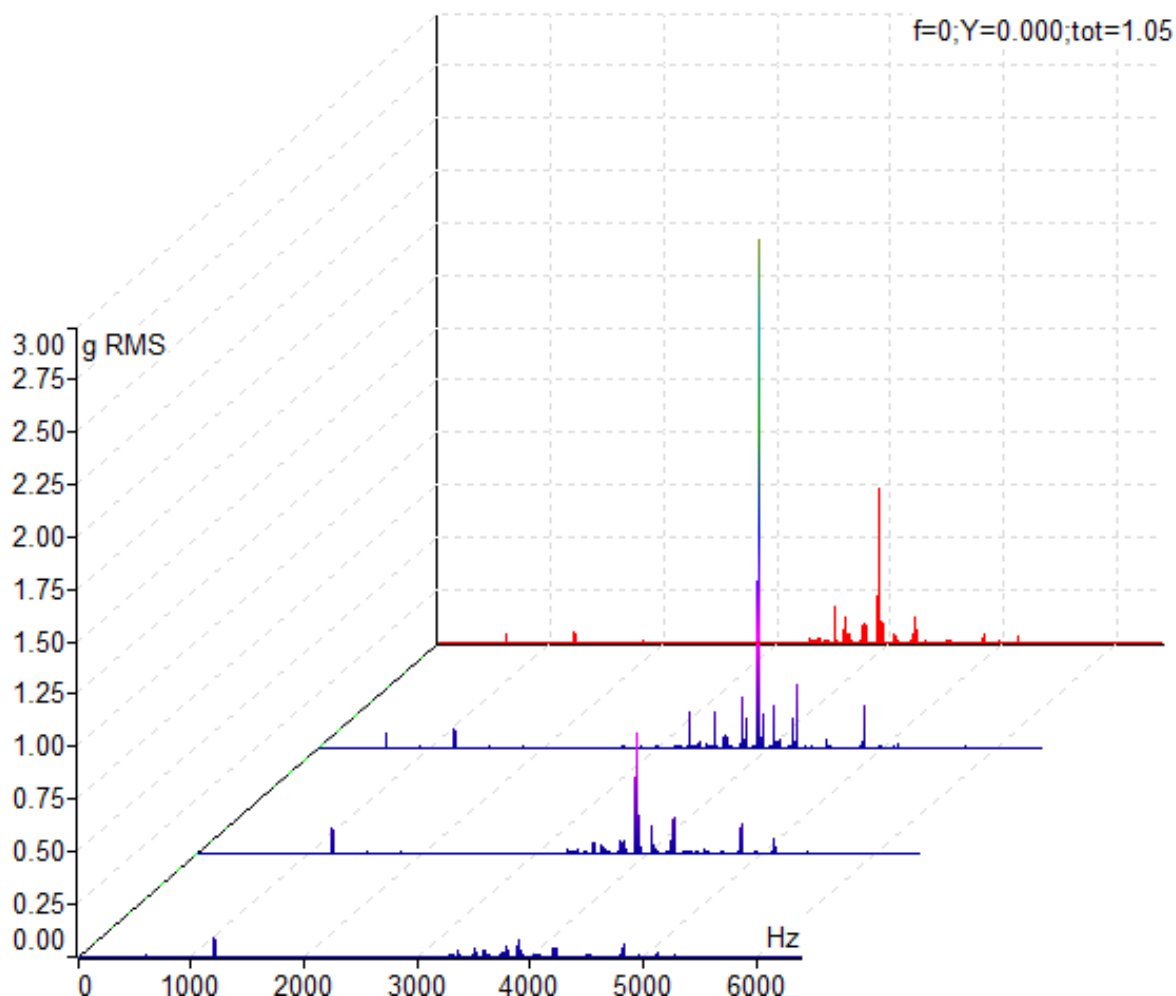
Všechny naměřené maximální hodnoty rychlosti vibrací jsou na první otáčkové frekvenci stroje (300 Hz) s násobky na dalších otáčkových frekvencích. Na stroji je zaznamenána nevývaha.



Obr. 29 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 1 ve všech měřených bodech (L1 – L4), druhé měření.

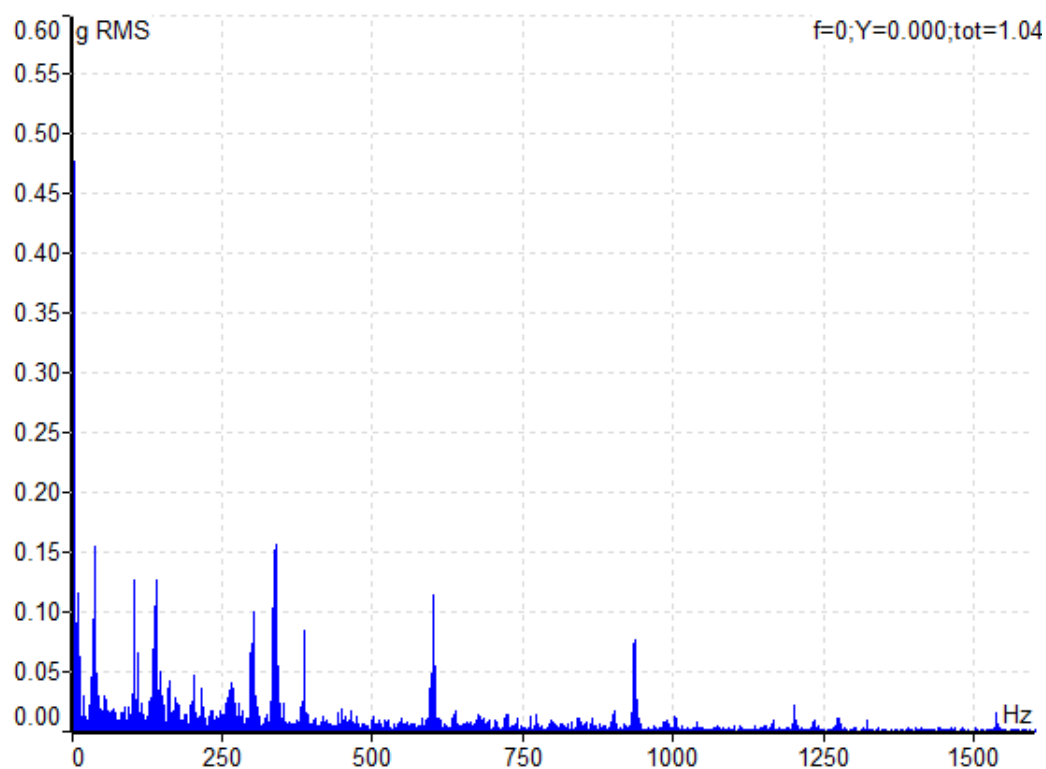


Obr. 30 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.

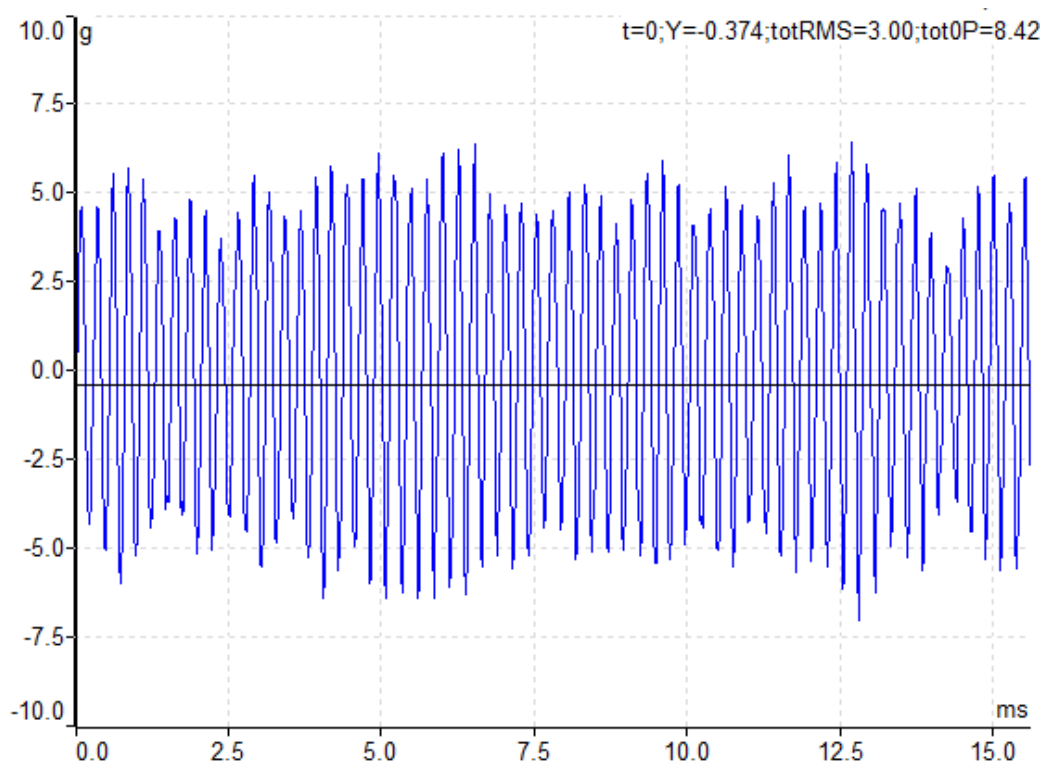


Obr. 31 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.

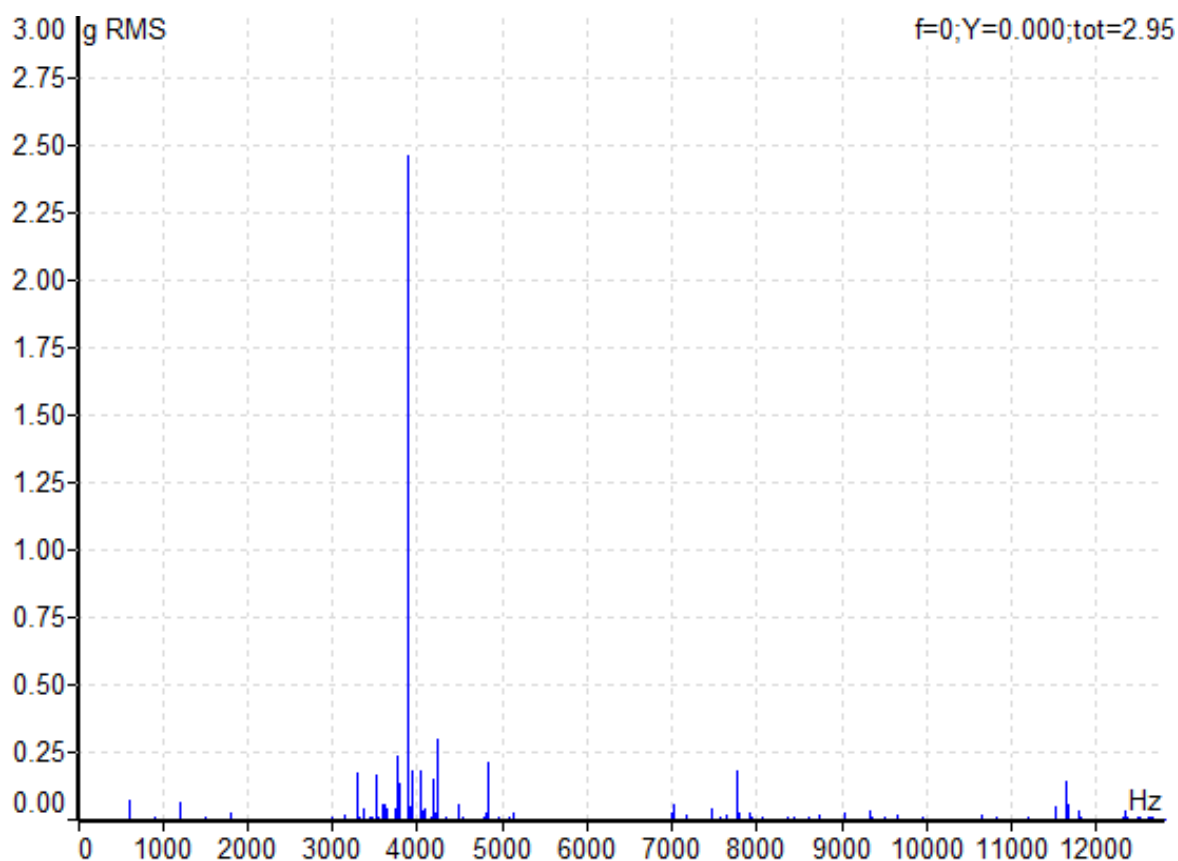
V měřeném místě L3 byly naměřeny největší zrychlení vibrací dosahující hodnot 2,97 g. Zrychlení vibrací se projevují na frekvenci kolem 4000 Hz. Toto zrychlení může způsobovat poškozené ložisko. Na ostatních vřetenech jsou vibrace nižší a vyskytují se na stejných frekvencích jako u měřeného místa L3.



Obr. 32 Obálková metoda stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, v bodě L3 (vřeten 3), druhé měření.



Obr. 33 Časový signál efektivní hodnoty zrychlení vibrací stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min (doba jedné otáčky 3,3 ms), v bodě L3, druhé měření.



Obr. 34 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, měřeno v bodě L3, druhé měření.

Nejvyšší zrychlení vibrací je zobrazeno na frekvenci 3883 Hz (12,9 násobek otáčkové frekvence). Zde se může projevit závada na obráběcím centru ve formě poškození ložiska.

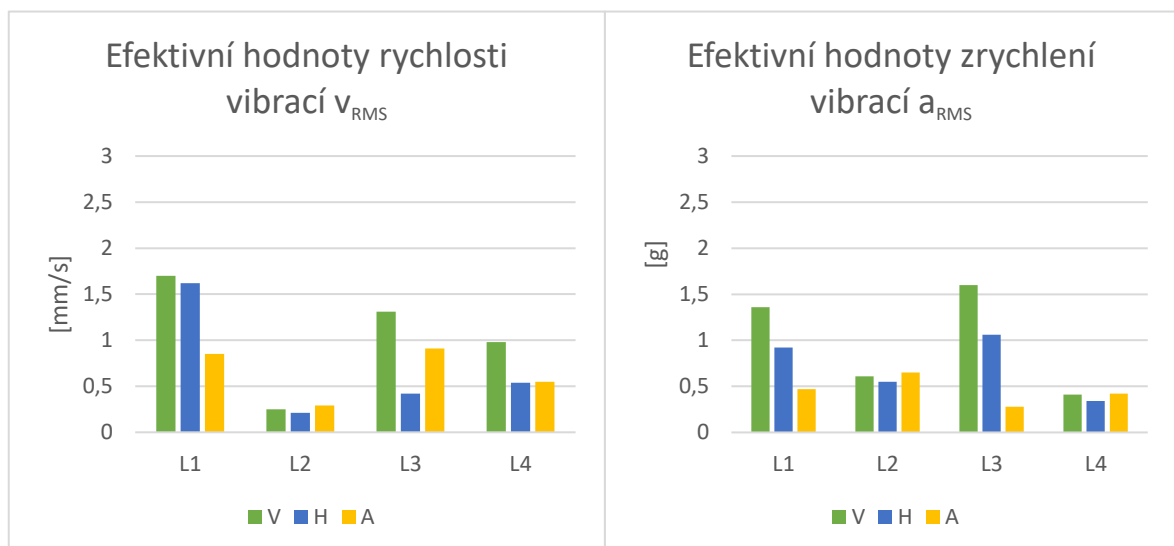
Začínají se objevovat poruchové frekvence ložiska a vznikající piting. Za jednu otáčku, která trvá 3,3 ms, proběhne cca 13 vibračních dějů (obr. 33).

6.2. Vyhodnocení stroje Multilathe 2 po druhém měření

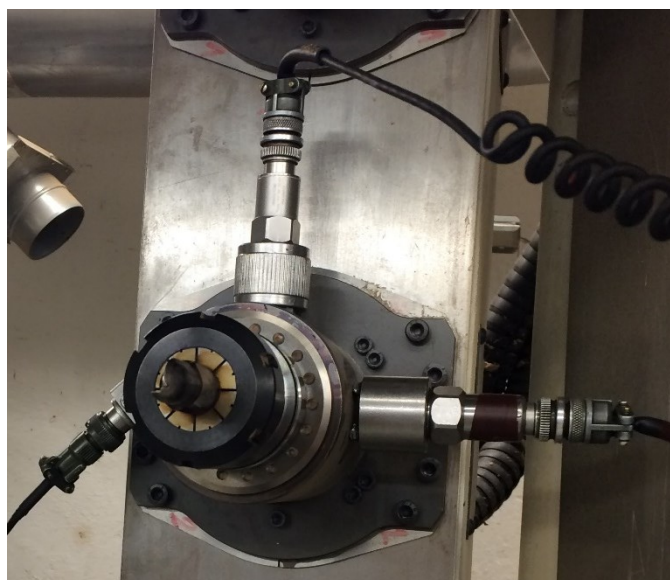
Tab. 9 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 2, druhé měření.

Multilathe 2		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	1,7	0,25	1,31	0,98
	H	1,62	0,21	0,42	0,54
	A	0,85	0,29	0,91	0,55
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	1,36	0,61	1,6	0,41
	H	0,92	0,55	1,06	0,34
	A	0,47	0,65	0,28	0,42
Max. otáčky [ot/min]		18000			

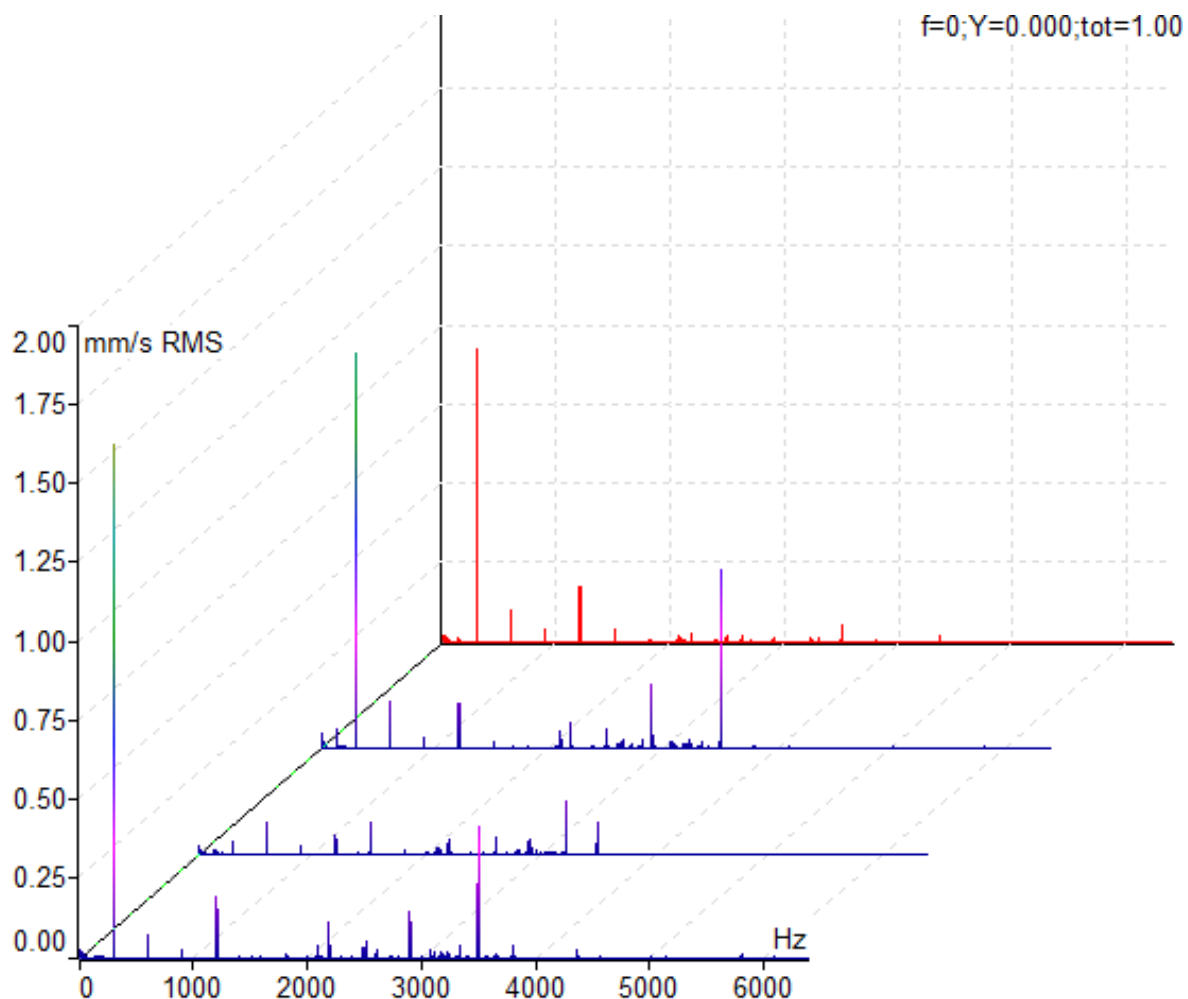
V bodě L1 je naměřena nejvyšší rychlost vibrací strojního zařízení ve vertikálním směru. Nejmenší rychlost vibrací je naopak v bodě L2 ve směru horizontálním. Nejvyšší hodnoty zrychlení vibrací se nacházejí na vřetenu číslo 3 ve vertikálním směru.



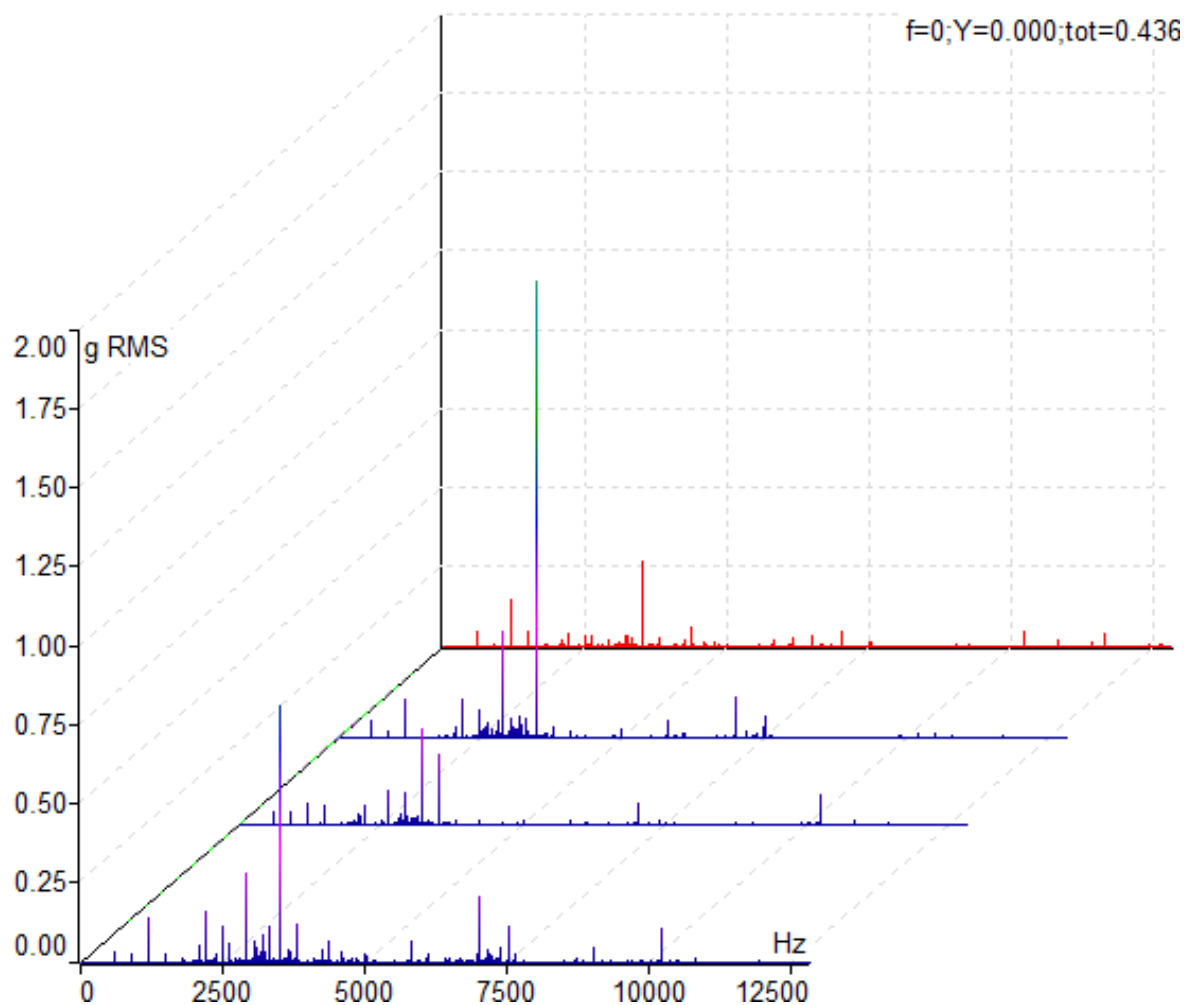
Obr. 35 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 2 ve všech měřených bodech (L1 – L4), druhé měření.



Obr. 36 Měření vibrací na stroji Multilathe 2 v bodě L2. [autor]

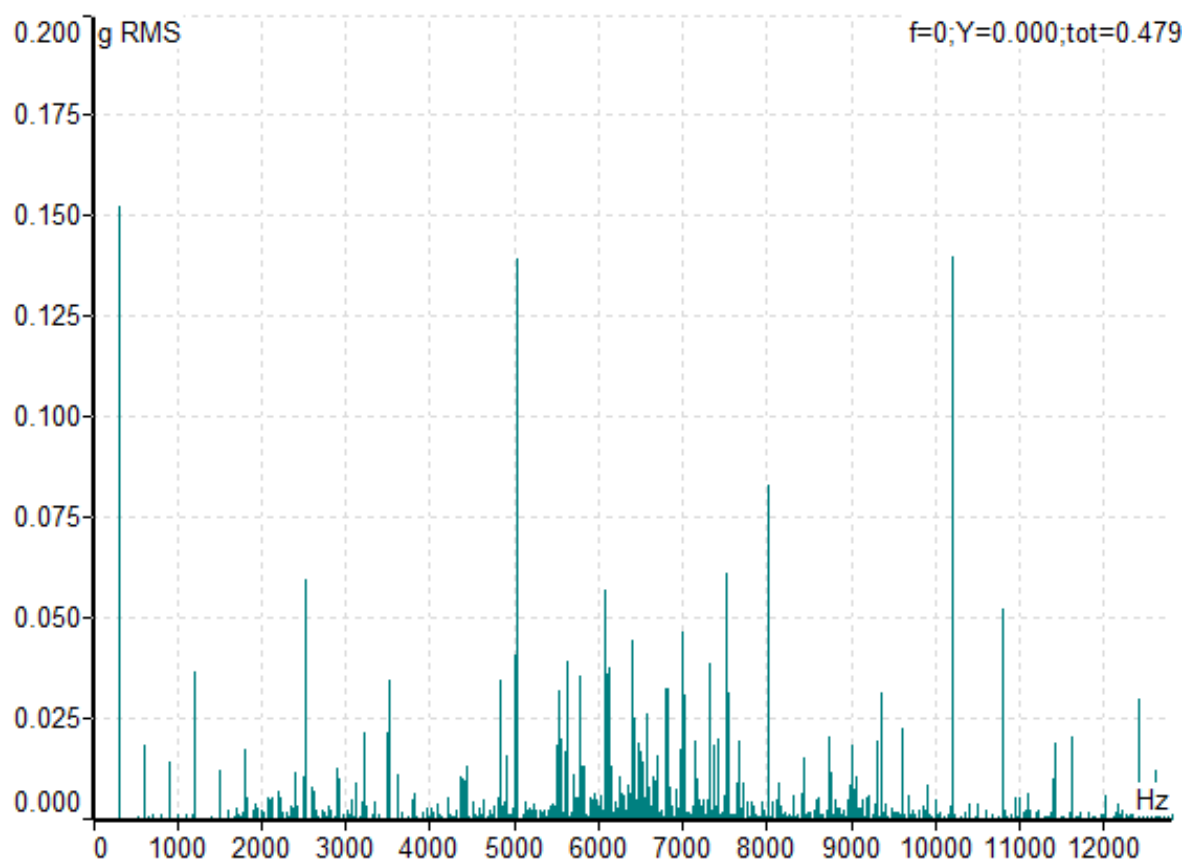


Obr. 37 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.



Obr. 38 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.

Nejvyšší zrychlení vibrací bylo naměřeno na vřetenu číslo 3 (L3) v tomto bodě dosahuje zrychlení hodnoty 1,6 g. Nejnižší zrychlení vibrací se pak vyskytuje v měřeném bodě L4 s hodnotou 0,41 g.



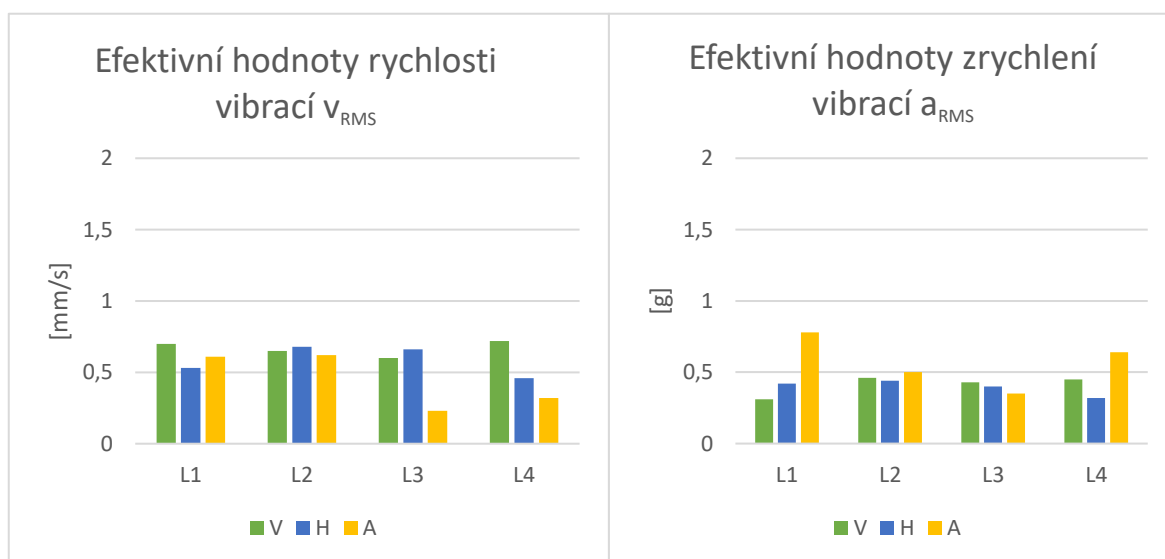
Obr. 39 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací stroje Multilathe 2 v axiálním směru při otáčkách 18000 ot/min, měřeno v bodě L1, druhé měření.

Zrychlení vibrací v měřeném bodě L1 axiálním směrem dosahují nízkých hodnot. Dle doporučených hodnot zrychlení vibrací spadají do třídy A-B.

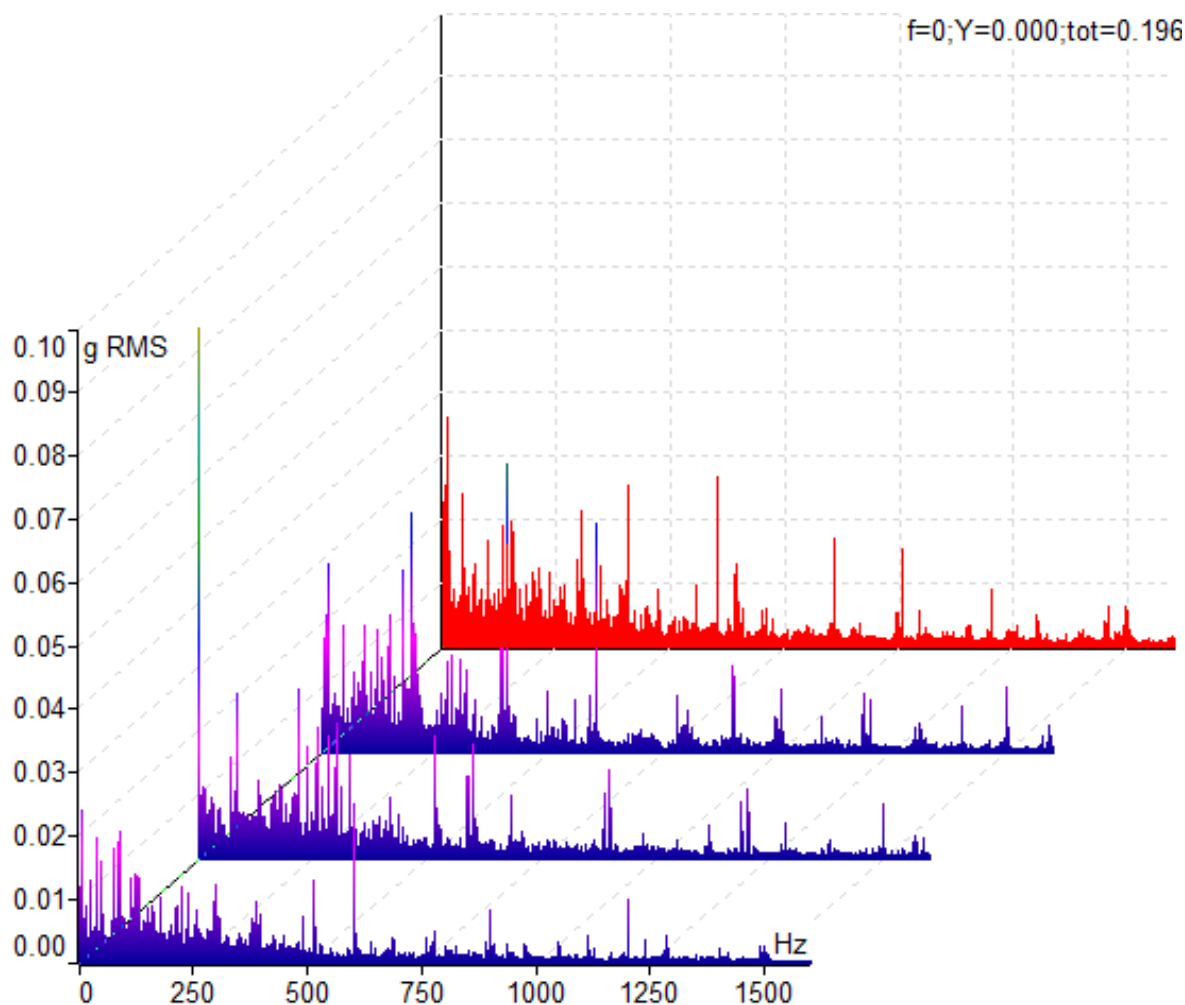
6.3. Vyhodnocení stroje Multilathe 3 po druhém měření

Tab. 10 Tabulka efektivních hodnot rychlostí vibrací v pásmu 10 - 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivních hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500 - 25600 Hz (a_{RMS}) stroje Multilathe 3, druhé měření.

Multilathe 3		Měřené místo			
Měřená veličina	Směr	L1	L2	L3	L4
Rychlost vibrací v_{RMS} [mm/s]	V	0,7	0,65	0,6	0,72
	H	0,53	0,68	0,66	0,46
	A	0,61	0,62	0,23	0,32
Zrychlení vibrací a_{RMS} [g]	V	0,31	0,46	0,43	0,45
	H	0,42	0,44	0,4	0,32
	A	0,78	0,5	0,35	0,64
Max. otáčky [ot/min]		18000			



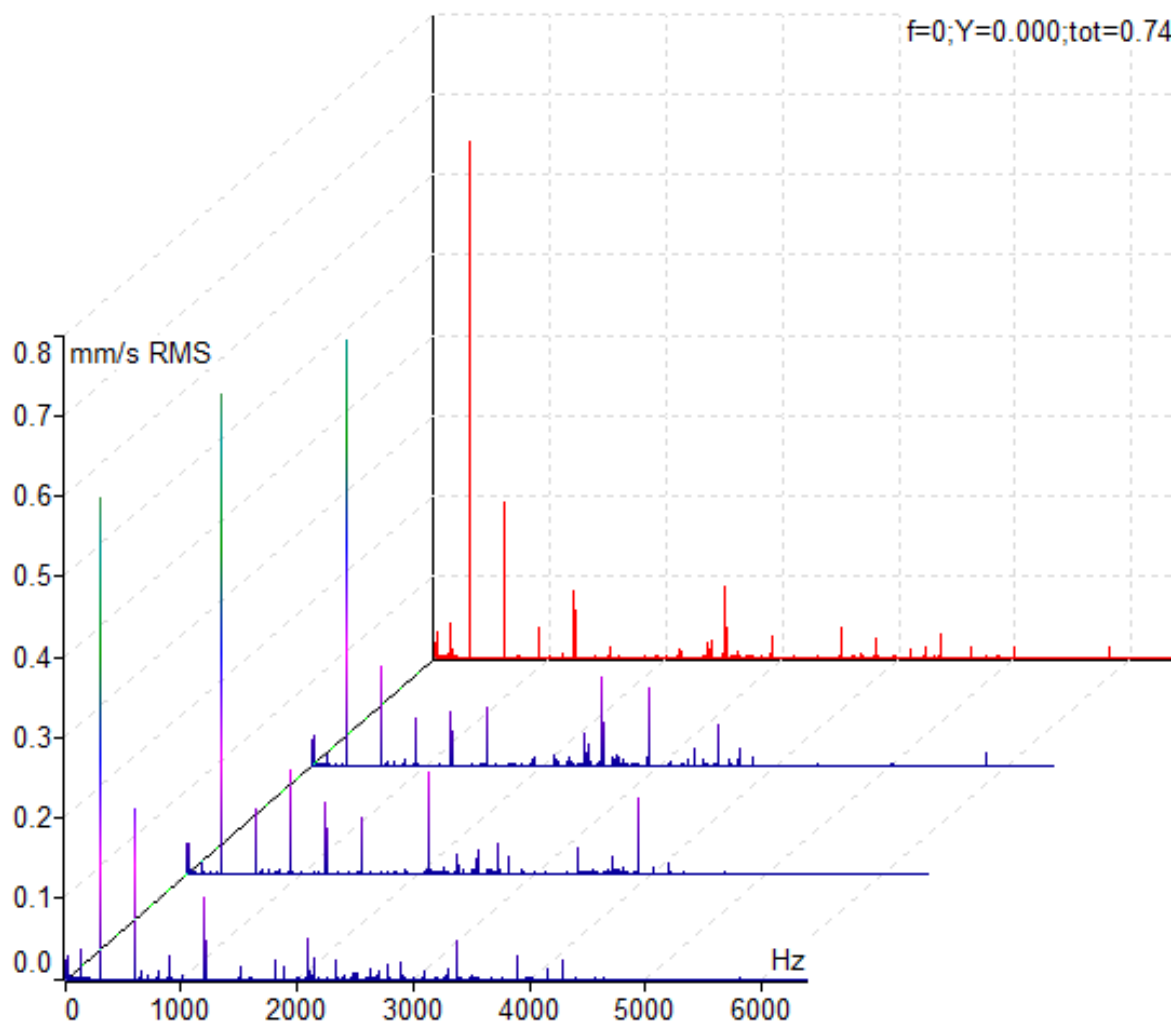
Obr. 40 Naměřené efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} (vlevo) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} (vpravo) stroje Multilathe 3 ve všech měřených bodech (L1 – L4), druhé měření.



Obr. 41 Obálková metoda, porovnání vřeten stroje Multilathe 3 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.

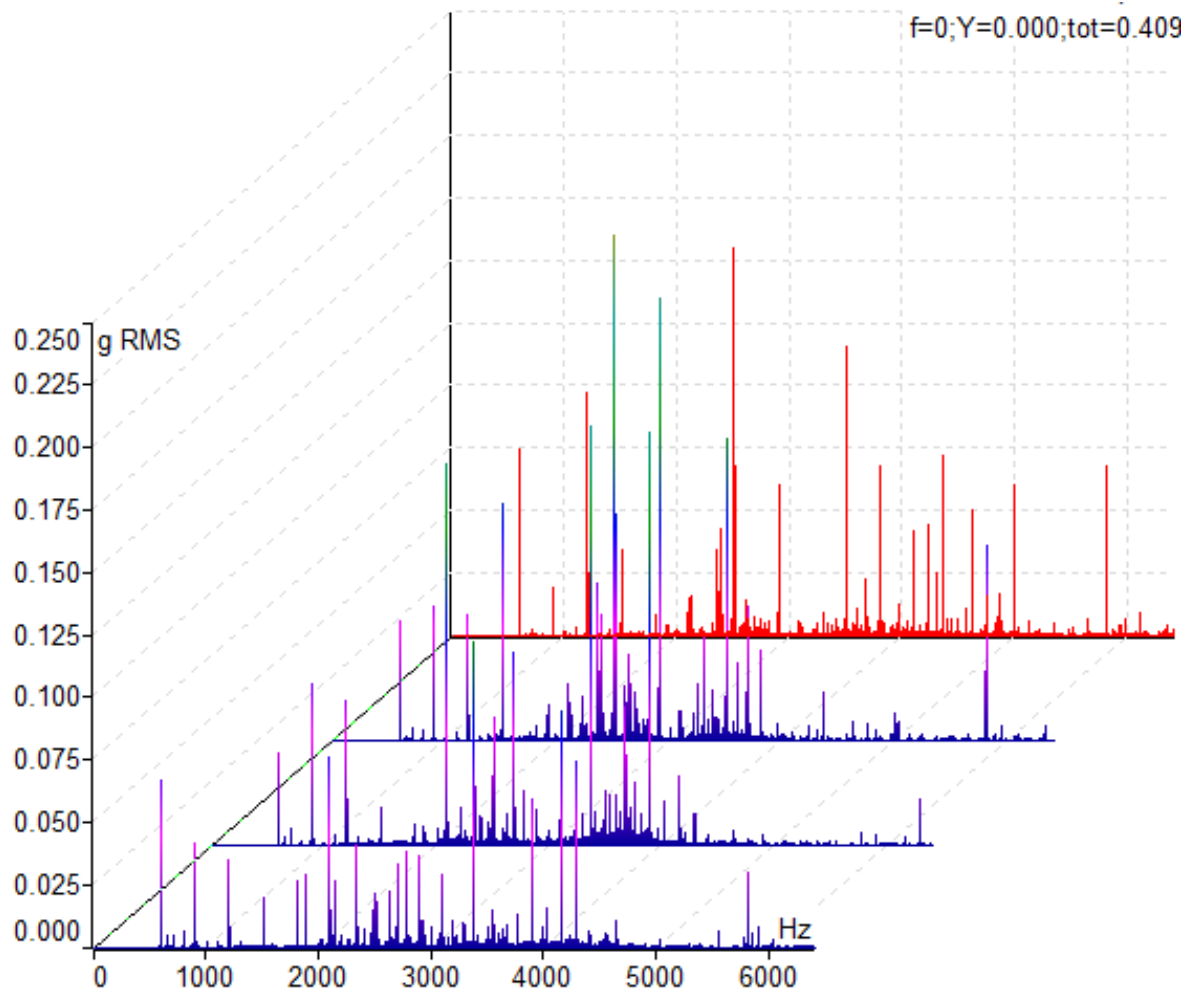
Naměřené vibrace na strojním zařízení Multilathe 3 jsou v nízkých hodnotách. Maximální hodnota rychlosti vibrací 0,72 mm/s je v měřeném bodě L4 ve vertikálním směru. Nejvyšší zrychlení vibrací je pak na vřetenu číslo 1 (L1) v axiálním směru a dosahuje hodnoty 0,78 g.

Graf obálkové metody (obr. 41) zobrazuje porovnání všech čtyř měřících míst stroje Multilathe 3. Vibrace na všech vřetenech jsou v nízkých hodnotách. V grafu můžeme vidět malé opakující se špičky vibrací na otáčkových frekvencích stroje.



Obr. 42 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.

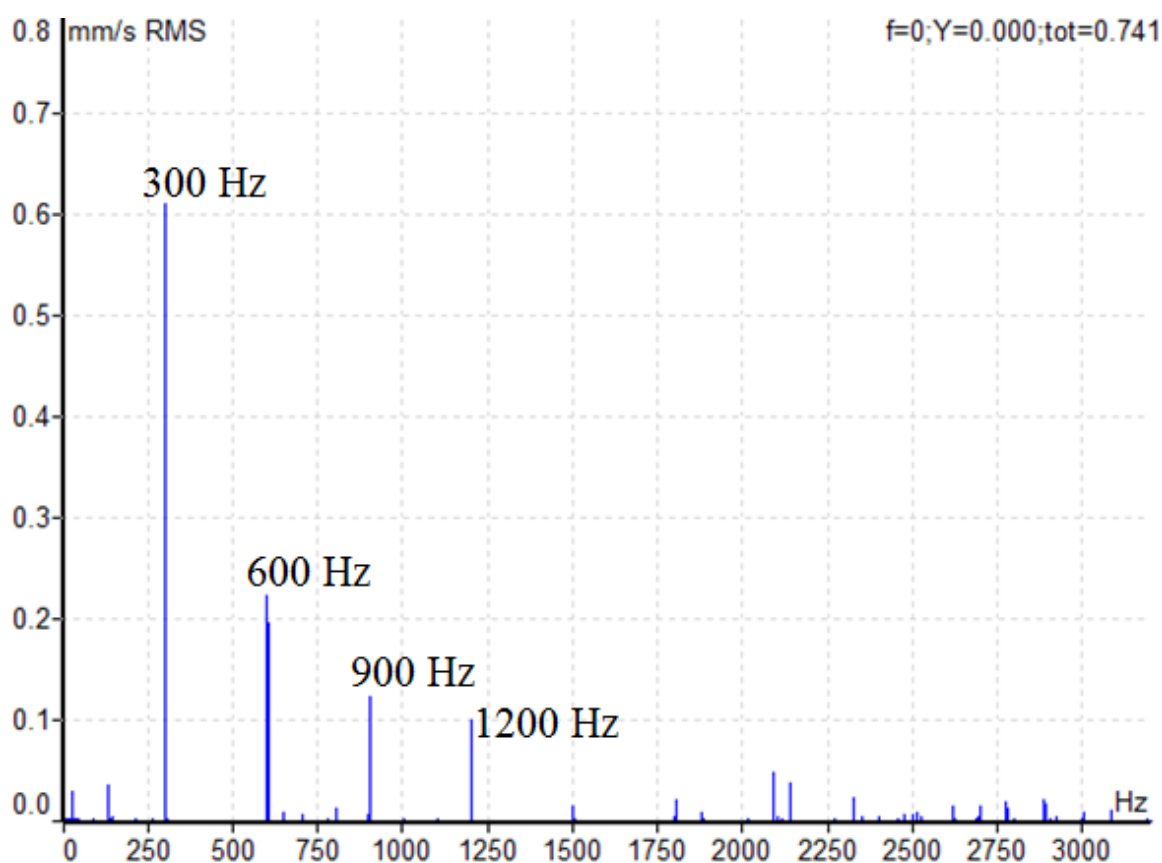
Nejvyšší rychlosti vibrací se vyskytují na 1. otáčkové frekvenci (300 Hz). Na strojích je naměřena nevývaha. Maximální naměřená rychlost vibrací se vyskytuje na vřetenu číslo 4 (L4) a dosahuje hodnot 0,72 mm/s.



Obr. 43 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřeten stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu v bodě L1 až L4, druhé měření.



Obr. 44 Měření vibrací na stroji Multilathe 3 v bodě L3. [autor]



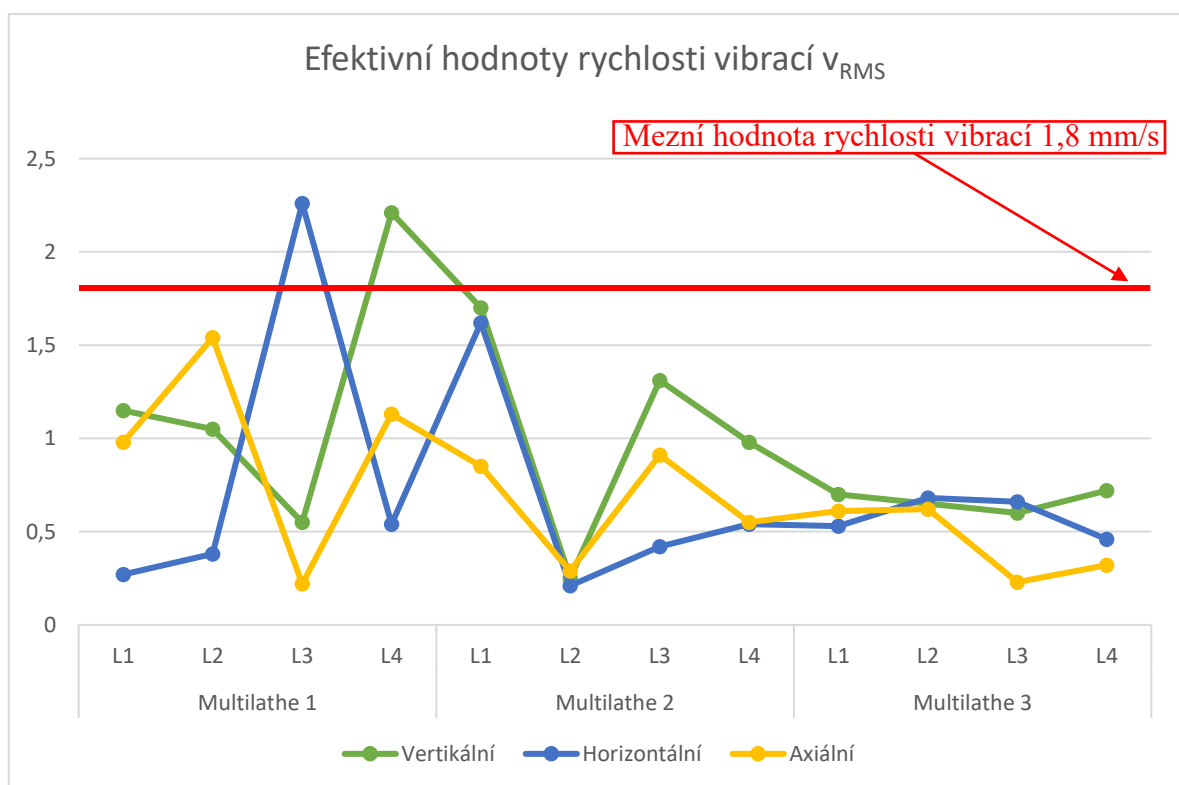
Obr. 45 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací stroje Multilathe 3 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, měřeno v bodě L1, druhé měření.

Na vřetenu číslo 1 (L1) stroje Multilathe 3 je naměřena špička vibrací na frekvenci 300 Hz (otáčková frekvence) a její násobky na dalších otáčkových frekvencích. Maximální naměřená hodnota rychlosti vibrací v tomto místě je 0,7 mm/s. Projevuje se zde nevyváženost strojního zařízení.

6.4. Porovnání technického stavu strojů po druhém měření

Nejvyšší rychlosti vibrací se projevují na stroji Multilathe 1 konkrétně v měřicích místech L3 a L4 ve vertikálním a horizontálním směru. Na obráběcím centru Multilathe 2 jsou zaznamenány nejvyšší rychlosti vibrací na vřetenu číslo 1 (L1), kde se vertikální i horizontální směr pohybuje kolem hodnoty 1,65 mm/s. Výrobní zařízení Multilathe 3 dosahuje nízkých hodnot vibrací, ani v jednom měřicím bodě a místě jejich rychlost nepřekročila hodnotu 1 mm/s. V průměru se hodnoty rychlostí vibrací na tomto stroji pohybují kolem 0,79 mm/s.

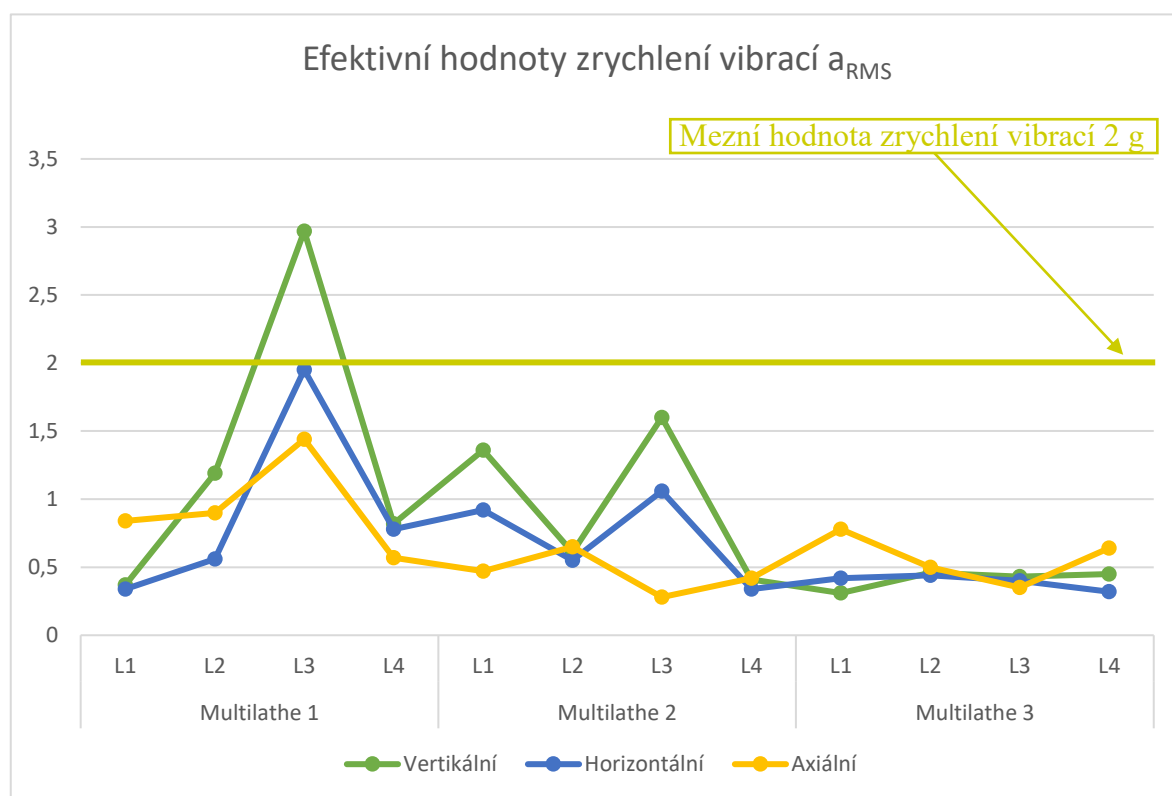
Nejvyšší diagnostikované vibrace nabývají hodnot 2,26 mm/s horizontálním směrem v bodě L3 (Multilathe 1). Nejnižší jsou naopak 0,21 mm/s horizontálním směrem v bodě L2 obráběcího centra Multilathe 2.



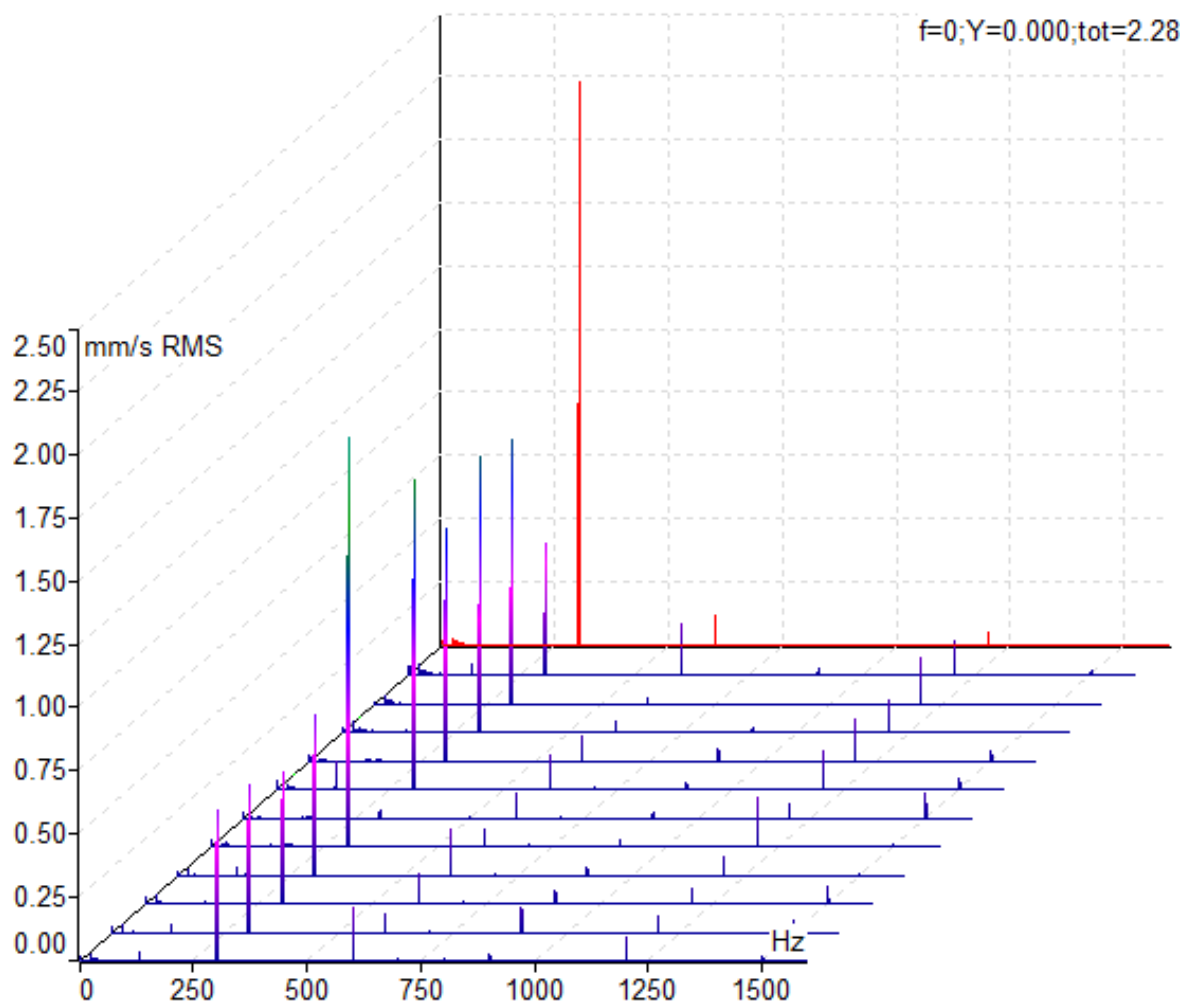
Obr. 46 Porovnání naměřených rychlostí vibrací na obráběcích centrech Multilathe a jejich jednotlivých vřetenech po druhém měření.

Nejvyšší zrychlení vibrací se vyskytuje na výrobním zařízení Multilathe 1 v měřeném bodě L3 ve všech měřených směrech. Na obráběcím centru Multilathe 2 jsou nejvyšší zrychlení vibrací v bodě L3 ve vertikálním směru. Na stroji Multilathe 3 zrychlení vibrací dosahuje nízkých hodnot. Průměr zrychlení vibrací na všech diagnostikovaných místech je 0,74 g.

Ze srovnání nejlépe dopadlo obráběcí centrum Multilathe 3 na kterém nebyla překročena hodnota zrychlení vibrací 0,8 g. Nejvyšší zrychlení bylo naměřeno pak v bodě L3 na stroji Multilathe 1 ve vertikálním směru. Zde hodnota zrychlení vibrací dosahuje 2,97 g.

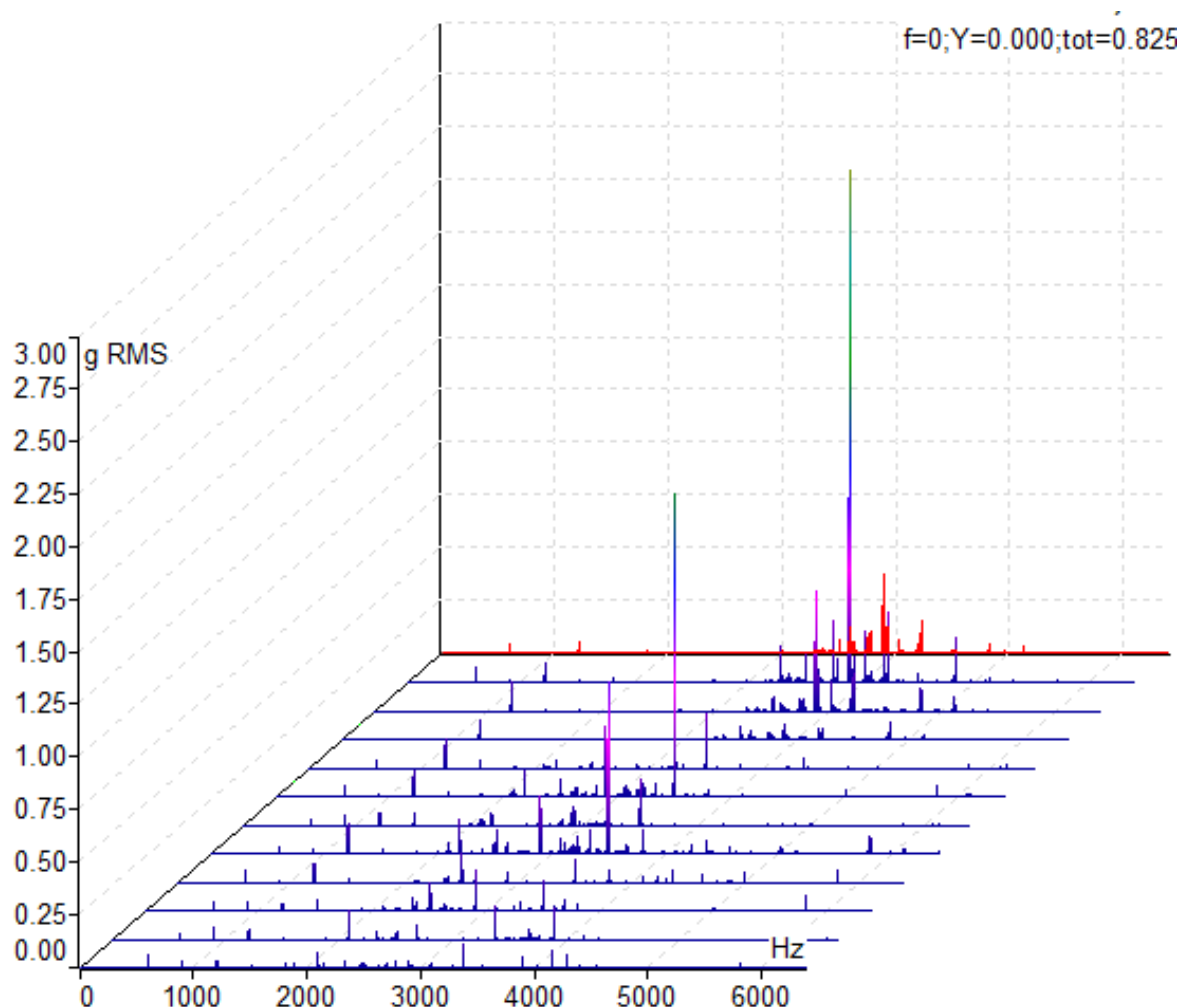


Obr. 47 Porovnání naměřených zrychlení vibrací na obráběcích centrech Multilathe a jejich jednotlivých vřetenech po druhém měření.



Obr. 48 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací všech strojů Multilathe po druhém měření ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu stroj Multilathe 3 měřený bod L1 až L4, dále Multilathe 2 měřený bod L1 až L4, poslední Multilathe 1 měřený bod L1 až L4.

Nejmenší rychlosti vibrací se nacházejí na obráběcím centru Multilathe 3, kde se pohybují od 0,6 mm/s do 0,72 mm/s. Na stroji Multilathe 1 můžeme naopak pozorovat nejvyšší rychlost vibrací v bodě L1 kde je hodnota 2,21 mm/s. Téměř na všech zařízeních je naměřena špička vibrací na první otáčkové frekvenci (300 Hz) s dalšími násobky. Na všech strojích se projevuje nevyváženost. Výjimkou je vřetenové číslo 2 (L2) obráběcího zařízení Multilathe 2, kde není špička vibrací na otáčkové frekvenci vysoká.



Obr. 49 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací všech strojů Multilathe po druhém měření ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, z předu stroj Multilathe 3 měřený bod L1 až L4, dále Multilathe 2 měřený bod L1 až L4, poslední Multilathe 1 měřený bod L1 až L4.

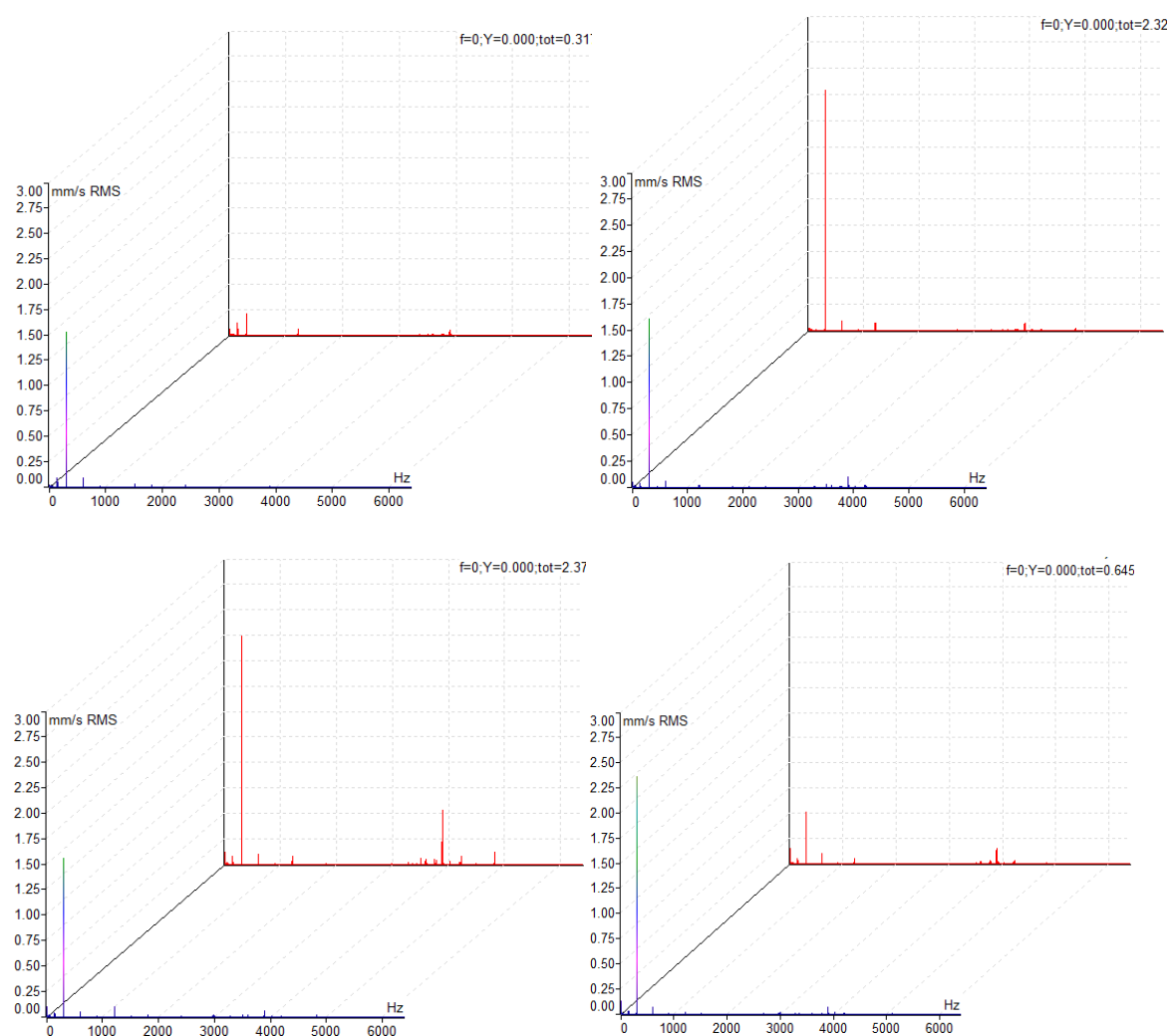
Nejvyšší zrychlení je zaznamenáno na stroji Multilathe 1 konkrétně v měřeném bodě L3. Jeho maximální hodnota dosahuje hodnot 2,97 g. Frekvence maximálních hodnot zrychlení vibrací se pohybuje kolem 4000 Hz. Nejmenší zrychlení jsou na strojním zařízení Multilathe 3.

7. Vývoj technického stavu strojů

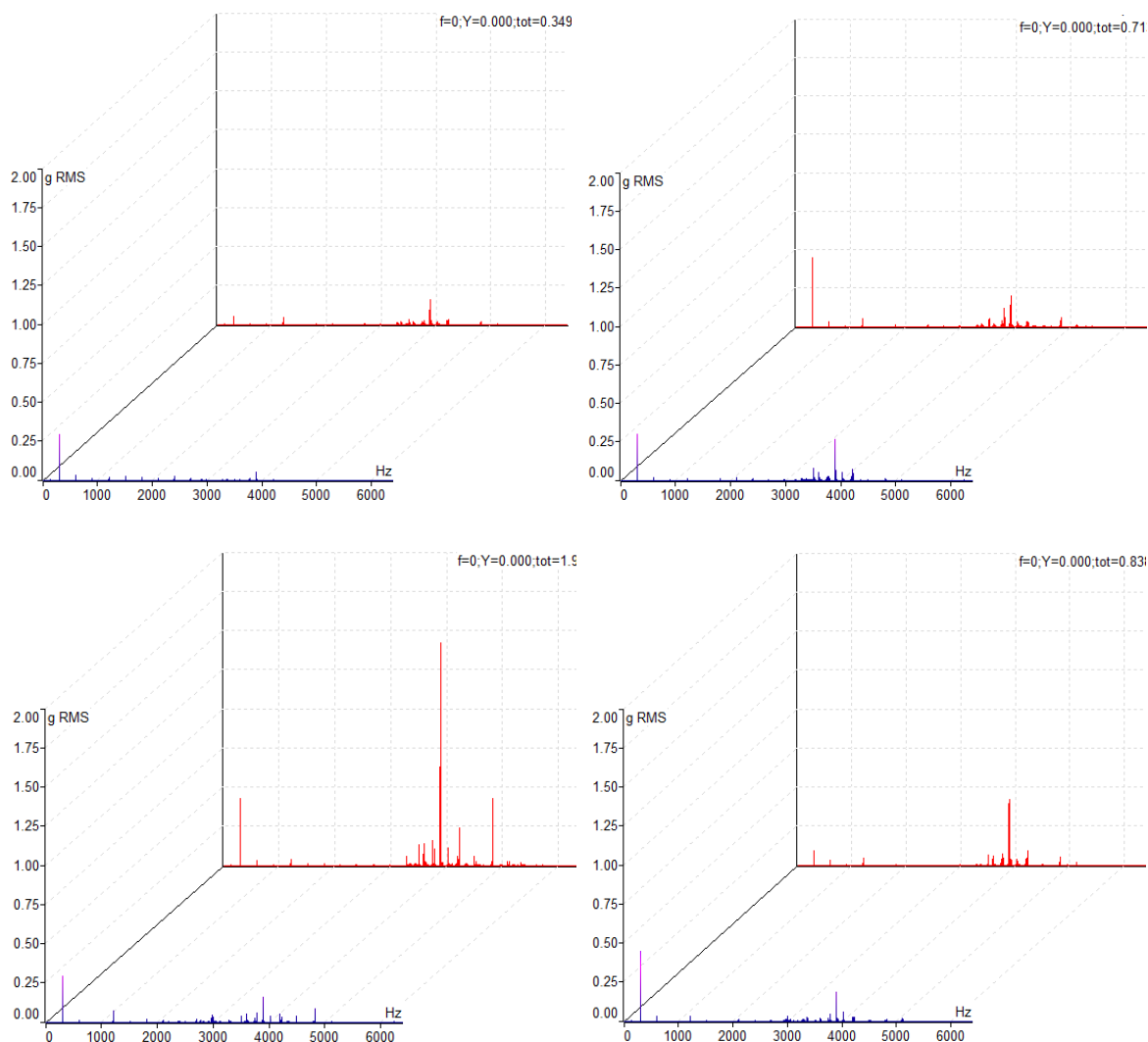
Porovnáním obou vibrodiagnostických měření navzájem můžeme lépe porozumět vývoji technického stavu obráběcích zařízení Multilathe.

7.1. Vývoj technického stavu stroje Multilathe 1

Maximální rychlosti vibrací se při obou měření vyskytly na první otáčkové frekvenci (300 Hz). Na stroji je naměřena nevyváha, její rozdílné hodnoty mohou zapříčínovat rozdílné obráběcí nástroje a jiná poloha vřeten při měření.

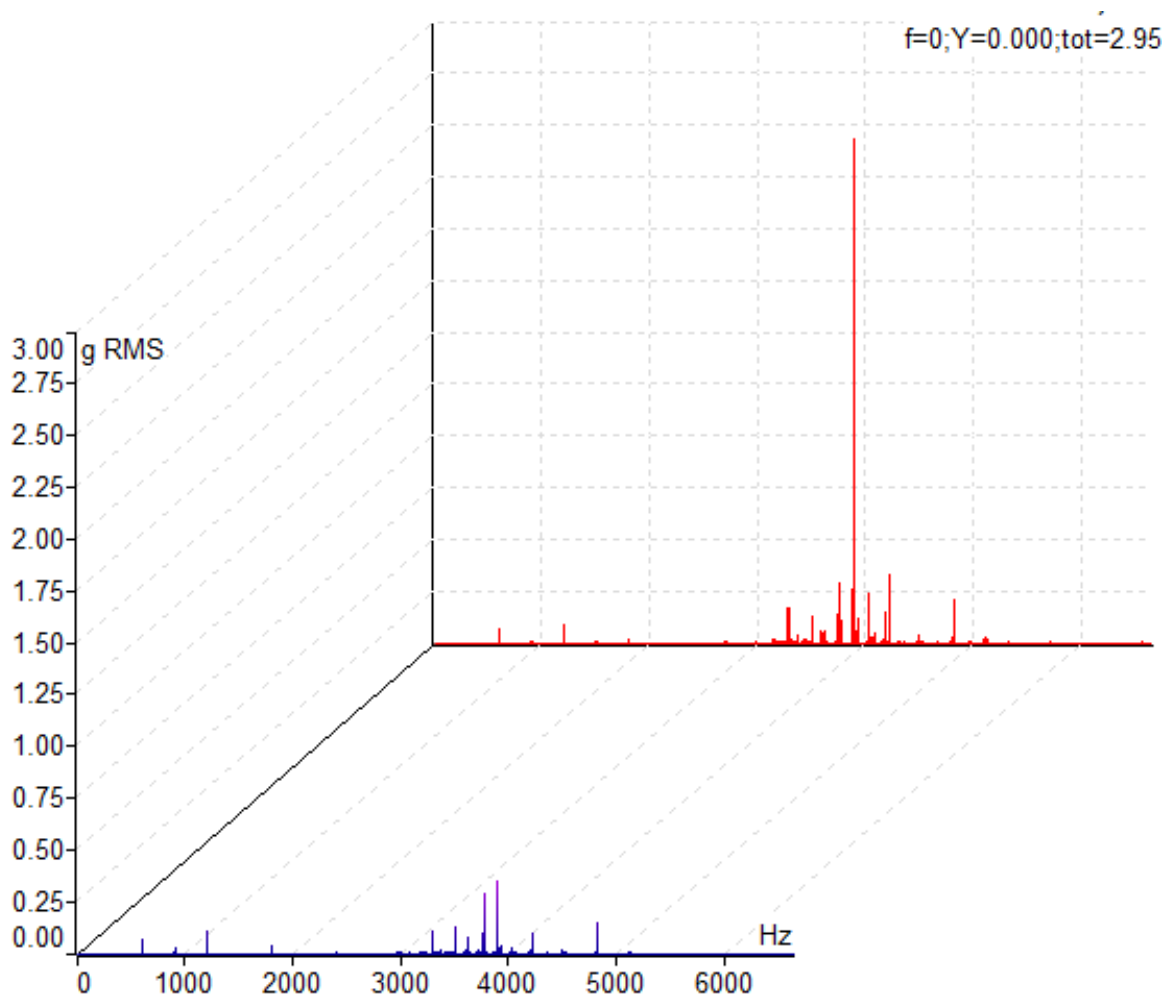


Obr. 50 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 1 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.



Obr. 51 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 1 v horizontálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.

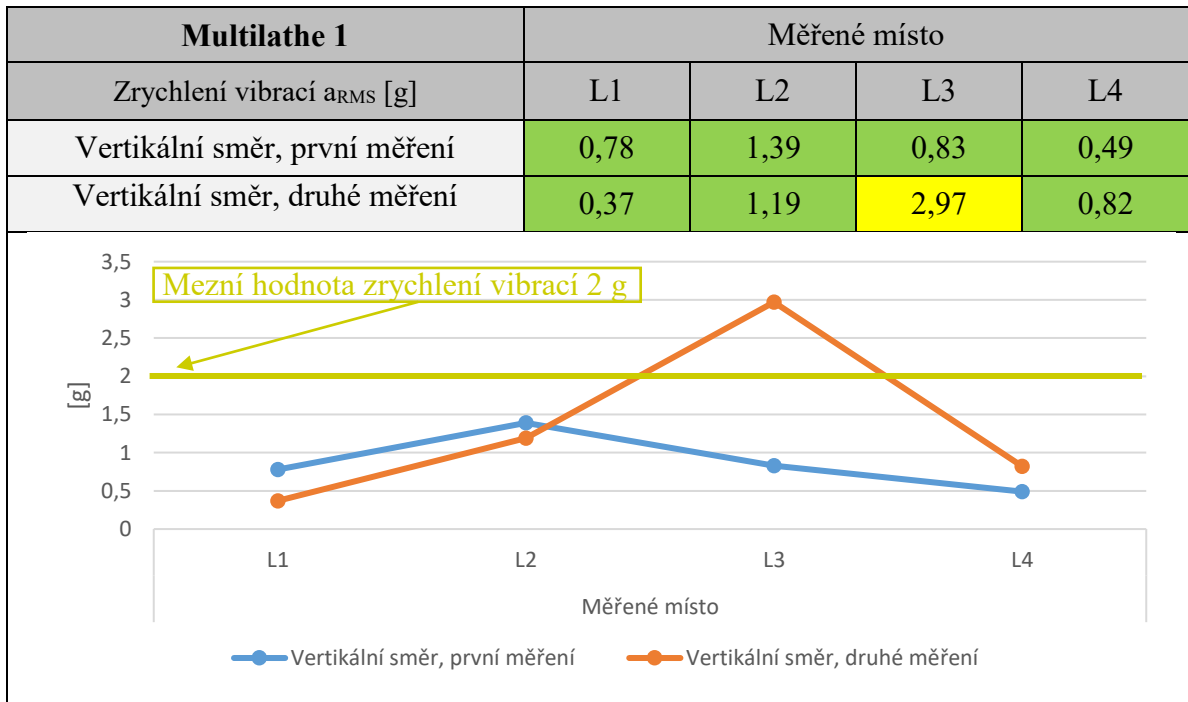
Na grafech zrychlení vibrací je zjevná nevyvaha (na první otáčkové frekvenci) a jejích násobcích. Dále můžeme vidět zvýšení zrychlení vibrací oproti prvnímú měření na frekvenci 4000 Hz a jejím okolí.



Obr. 52 Porovnání obou vibrodiagnostických měření ve frekvenčním spektru efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání vřetene L3 stroje Multilathe 1 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.

Nárůst zrychlení vibrací v místě L3 je poměrně vysoký, při prvním měření bylo naměřeno zrychlení 0,83 g. Po druhé diagnostické kontrole je zrychlení již 2,97 g.

Tab. 11 Srovnání vibrodiagnostických měření a jejich maximálních efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu od 500 – 25600 Hz (a_{RMS}) ve vertikálním směru stroje Multilathe 1 při 18000 ot/min.

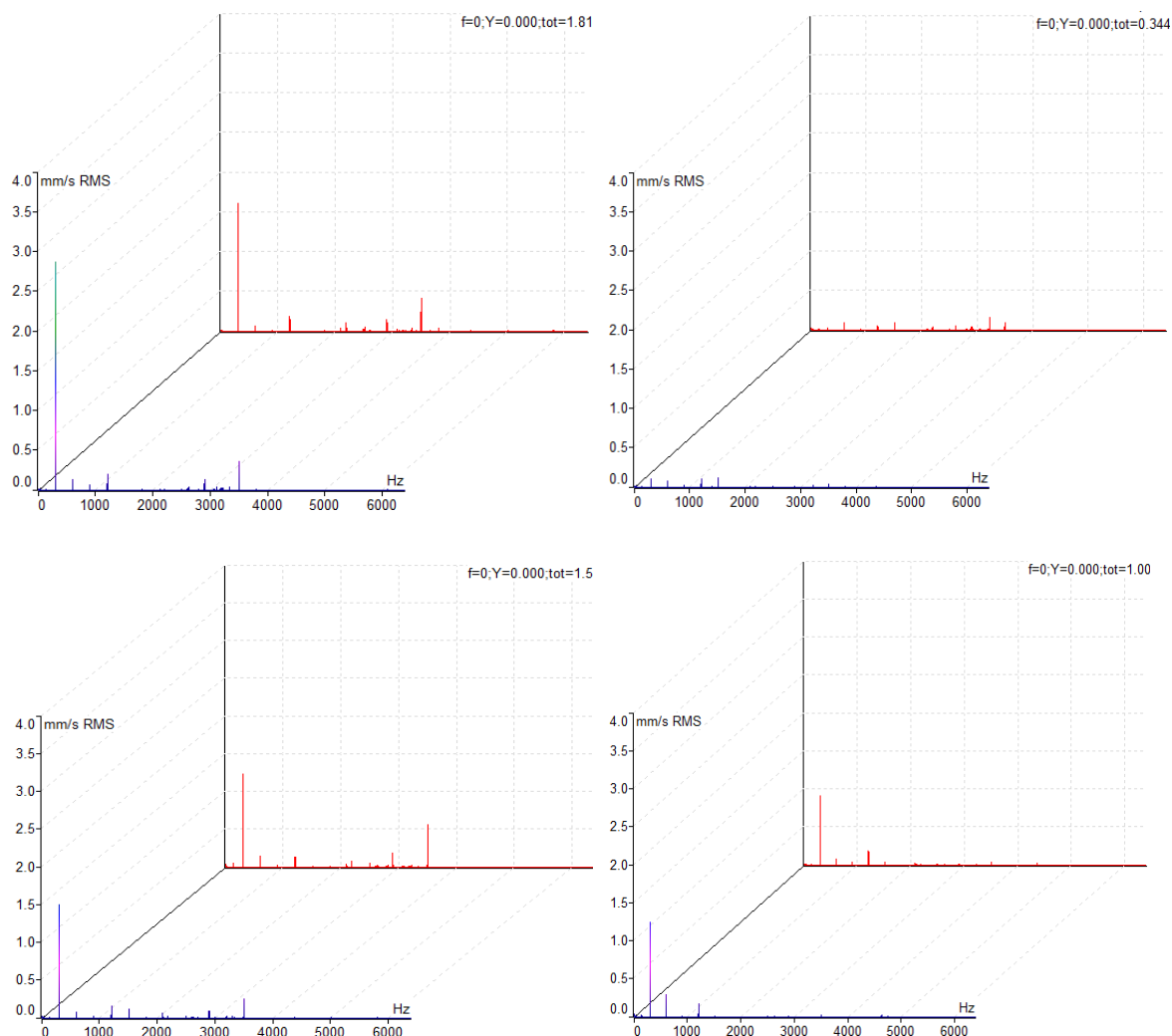


Nejvyšší nárůst zrychlení vibrací obráběcího centra Multilathe 1 můžeme pozorovat na měřeném místě L3. Doporučil bych pro toto místo zvýšit počet pravidelných měření za pomoci vibrodiagnostiky a po překročení kritických hodnot ve vhodnou dobu provést opravu.

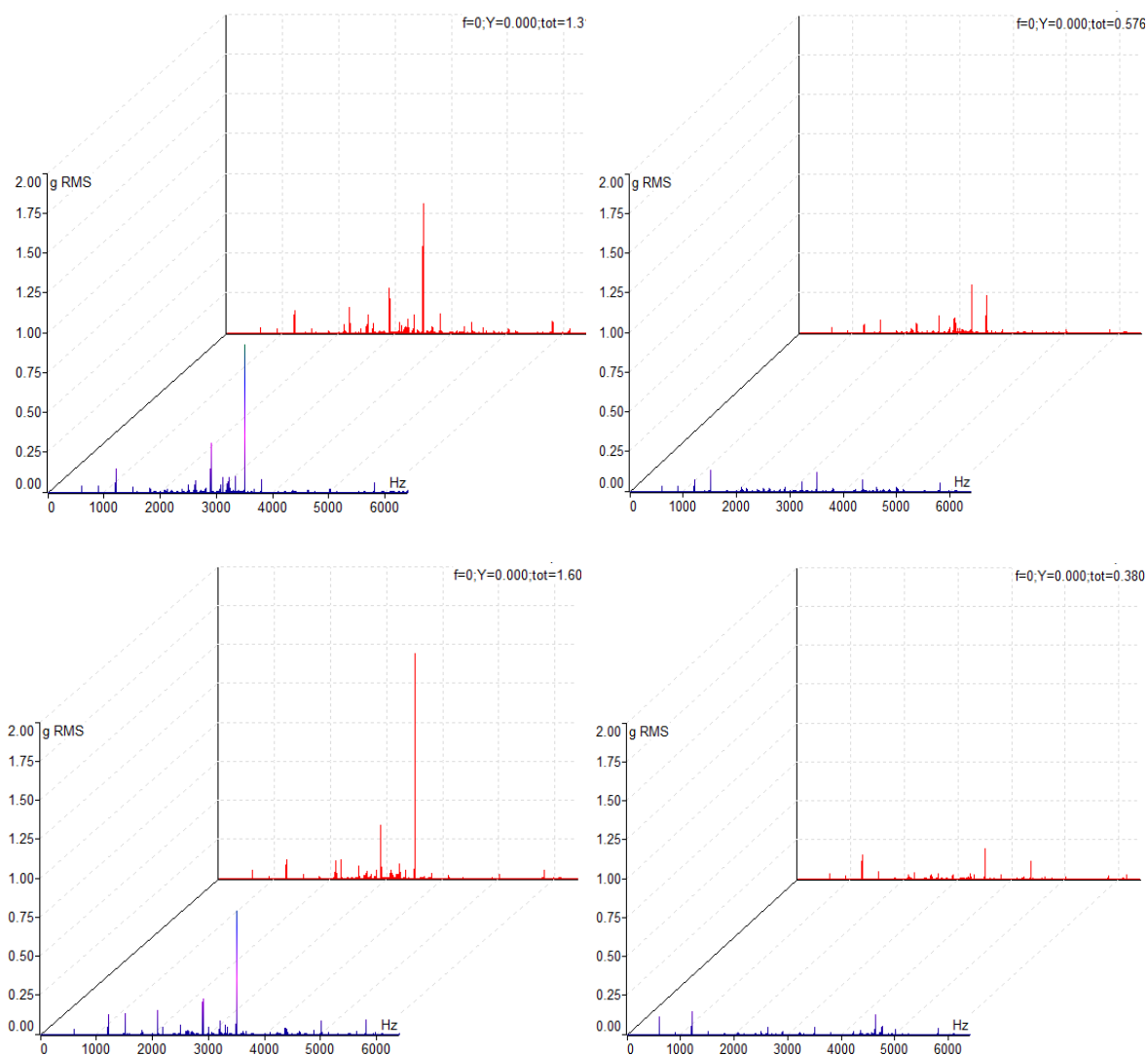
Zrychlení vibrací se mírně zvýšilo i v měřeném místě L4 z 0,49 g na 0,82g. V měřeném místě L1 a L2 jsou rozdíly naměřených hodnot velmi malé.

7.2. Vývoj technického stavu stroje Multilathe 2

Nevývaha na první otáčkové frekvenci a její násobky se pohybují v podobných hodnotách u prvního i druhého diagnostického měření. Nejmenší vibrace jsou i po druhém proměření na vřetenu 2 (L2).



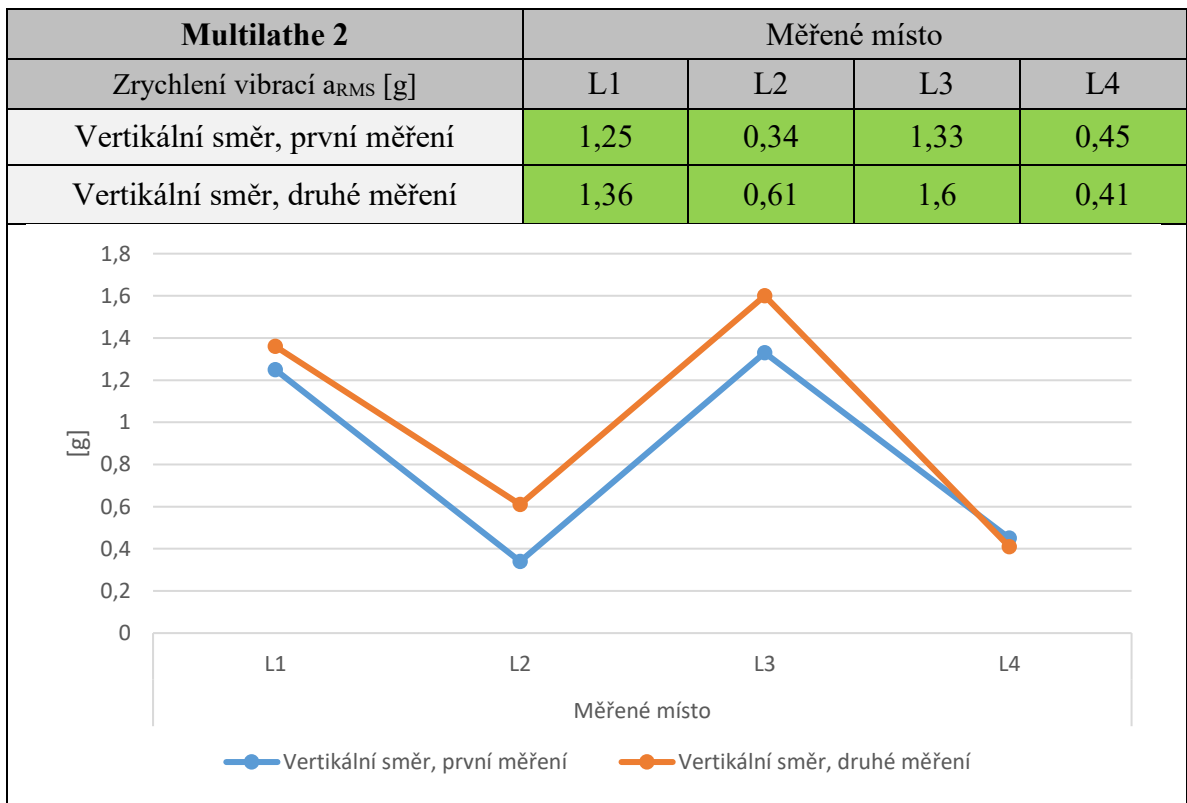
Obr. 53 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.



Obr. 54 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 2 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.

Změny zrychlení vibrací se nejvíce projeví na frekvencích kolem 4000 Hz (frekvence ložisek). Nejedná se však o výrazné zhoršení technického stavu obráběcího centra.

Tab. 12 Srovnání vibrodiagnostických měření a jejich maximálních efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu od 500 – 25600 Hz (a_{RMS}) ve vertikálním směru stroje Multilathe 2 při 18000 ot/min.

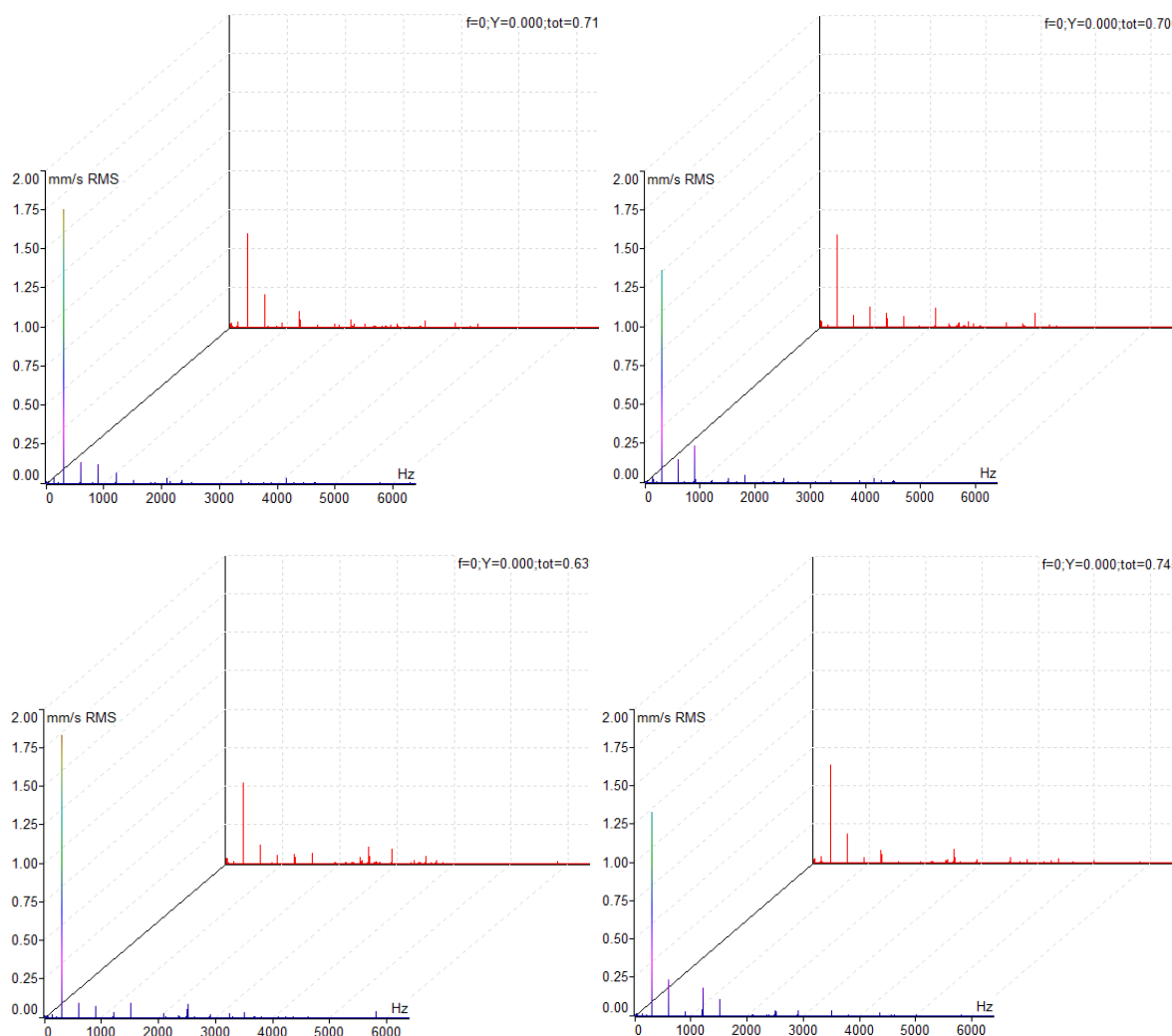


Zrychlení vibrací je po druhém měření mírně zvýšené na měřících místech L1, L2, L3. V měřeném bodě L4 jsou zrychlení vibrací podobná jako při prvním vibrodiagnostickém proměření. Ve všech měřených bodech se však zrychlení vibrací pohybují v nižších hodnotách, které spadají do pásma doporučených hodnot zrychlení A-B.

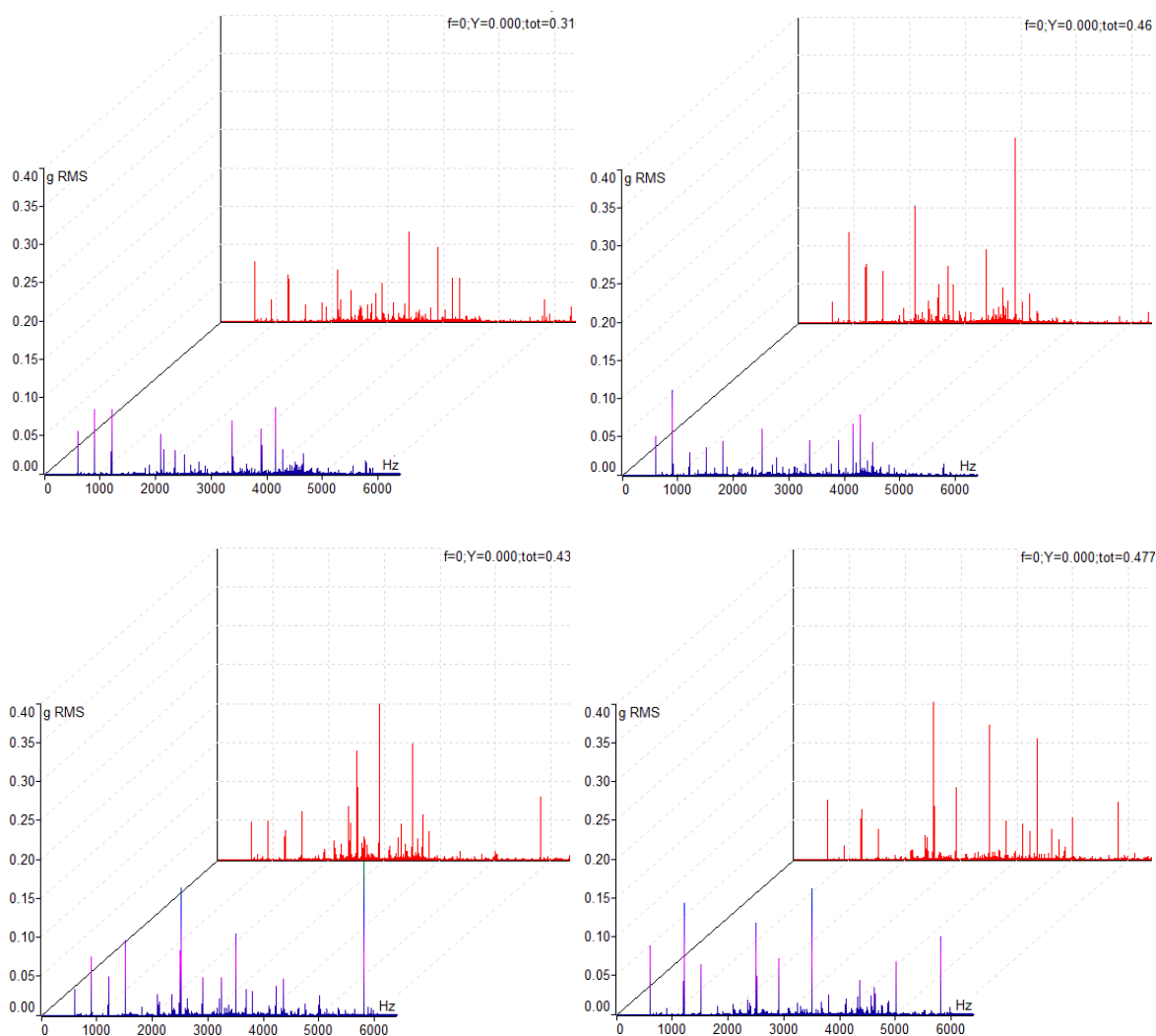
Doporučení pro další bezproblémový chod stroje bych volil následující. Provádět vibrodiagnostické měření na všech čtyřech vřetenech v pravidelných periodách. Vykonávat pravidelnou kontrolu, údržbu a předcházet tak zbytečným poruchám a odstávkám ve výrobě strojního zařízení.

7.3. Vývoj technického stavu stroje Multilathe 3

Na grafu rychlosti vibrací se nejvyšší špičky vyskytují v obou měřeních na první otáčkové frekvenci. Různé hodnoty nevyváženosti jsou zapříčiněny odlišnými nástroji při měření a rozdílnou polohou vřeten.



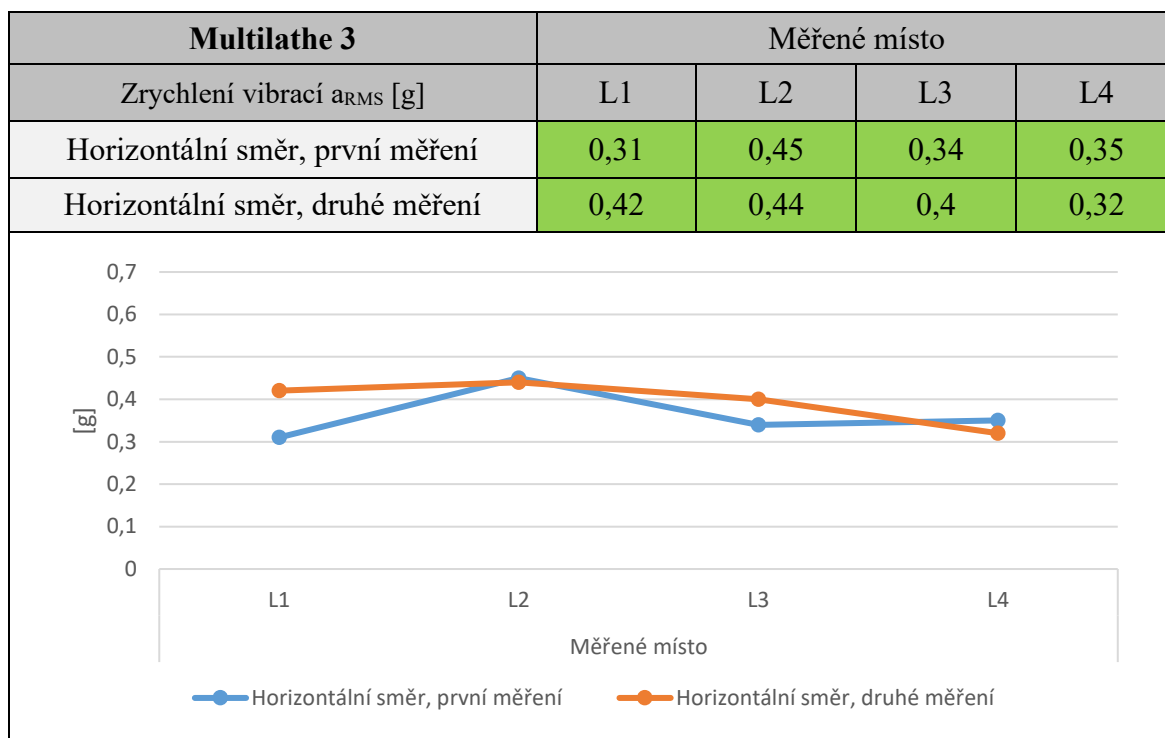
Obr. 55 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 3 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.



Obr. 56 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací, porovnání v měřeném bodě L1 (vlevo nahoře), L2 (vpravo nahoře), L3 (vlevo dole), L4 (vpravo dole) stroje Multilathe 3 ve vertikálním směru při otáčkách 18000 ot/min, modře měření ze dne 11. 11. 2016, červeně měření 7. 4. 2017.

Zrychlení vibrací je v nízkých hodnotách u všech čtyř měřených míst. U druhého měření byly naměřeny mírně vyšší hodnoty zrychlení (oproti prvnímu měření) v okolí pásma 4000 Hz, ale nejedná se o velkou změnu.

Tab. 13 Srovnání vibrodiagnostických měření a jejich maximálních efektivních hodnot zrychlení vibrací v pásmu od 500 – 25600 Hz (a_{RMS}) v horizontálním směru stroje Multilathe 3 při 18000 ot/min.



Obráběcí centrum Multilathe 3 má nejnižší naměřené hodnoty rychlosti i zrychlení vibrací ze všech měřených strojů. Rozdíl v naměřených hodnotách mezi prvním a druhým měřením se příliš nezvýšil.

Výrobní zařízení je v dobrém technickém stavu. Doporučuji provádět další diagnostické měření v pravidelných intervalech. Zjišťovat vývoj technického stavu stroje a plánovat údržbu, opravy na vhodnou dobu.

8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo diagnostikovat technický stav tří obráběcích center Multilathe, které slouží v České zbrojovce a.s. pro výrobu pažeb střelných zbraní z ořechového a bukového dřeva. Zjišťování technického stavu strojů bylo prováděno pomocí dvou vibrodiagnostických měření.

První měření proběhlo na podzim roku 2016. Diagnostikovala se všechna čtyři vřetena strojů. Otáčky stroje byly stanoveny na 18000 ot/min a ve vřetenech byl upnutý obráběcí nástroj. Při tomto měření byla zjištěna nevyváženost na obráběcích centrech. Které bylo zapříčiněno obráběcím nástrojem upnutým ve vřetenu.

Druhá diagnostika strojních zařízení byla naplánována na začátek dubna 2017. Při tomto měření byl ve vřetenech upnutý jiný obráběcí nástroj a nevyváha byla naměřena v nižších hodnotách oproti prvnímu vibrodiagnostickému proměření. Toto měření ukázalo zhoršení technického stavu strojního zařízení Multilathe 1 konkrétně jeho třetího vřetene (L3). Kde se vyskytlo zvýšení zrychlení vibrací v okolí 4000 Hz (poškození ložisek).

Z diagnostiky a analýzy strojů dopadlo nejlépe zařízení Multilathe 3 na kterém se zrychlení i rychlosti vibrací pohybovaly v nízkých hodnotách. Nebyly zde detekovány poruchové frekvence, které by nasvědčovaly poškození obráběcího centra.

Změna velikosti hodnot vibrací mezi prvním a druhým měřením nebyla vysoká. Výjimkou je však vřeteno 3 (L3) stroje Multilathe 1, kde bylo detekováno zvýšení vibrací v oblasti 4000 Hz. Domnívám se, že je to zapříčiněno zhoršením technického stavu ložiska. Model ložiska se bohužel nepodařilo zjistit. Doporučil bych častější vibrodiagnostické kontroly technického stavu strojního zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Výroba nebrojní produkce České Zbrojovky a.s. [online] [cit. 2017-03-12] Dostupné z <http://www.czub.cz/cz/catalog/300-nezbrojni-produkce.aspx>
- [2] Zbrojní výroba České Zbrojovky a.s. [online] [cit. 2017-03-12] Dostupné z: <http://www.czub.cz/cz/catalog/79-pistole-cz.aspx>
- [3] [online] Dostupné z https://media.novinky.cz/437/534376-top_foto1i837a.jpg?1485783002
- [4] [online] Dostupné z http://www.czub.cz/media/catalog/product/cache/1/image/870x410/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/c/z/cz_805_g1_right_sights.jpg
- [5] [online] Dostupné z http://www.czub.cz/media/catalog/product/cache/1/image/870x410/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/c/z/cz_usa_sporter_standard_grade_g2_01.png
- [6] Blata J. *Metody Technické diagnostiky*, 1. vydání, Ostrava, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, 27 stran, ISBN 978-80-248-2735-3
- [7] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 130, 135 s. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [8] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost. Díl II Vibrodiagnostika* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 173 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [9] [online] Dostupné z http://www.cmsna.com/images/categories/WCGUNST-0408IE_P_02_04.jpg
- [10] CMS industries for gunstocks [online] [cit. 2017-03-25] Dostupné z: http://files.hoechsmann.com/lexikon/pdf/original/cms_multilathe_it_en_2012.pdf?lang=en
- [11] Multilathe - Wood [online] [cit. 2017-03-25] Dostupné z: <http://www.cmsna.com/multilathe-wood-p-3071.html>
- [12] A4400 VA4 pro 4-kanálový analyzátor [online] [cit. 2017-03-25] Dostupné z: http://adash.cz/doc/a4400/A4400_VA4_CZ.pdf
- [13] Měřicí zařízení Adash A4400 VA4 [online] [cit. 2017-03-25] Dostupné z: http://www.adash.cz/portable/product_a4400_cz.php
- [14] Návod k obsluze Adash A4400 VA4 pro [online] [cit. 2017-03-25] Dostupné z: http://adash.cz/doc/a4400/A4400_man_cz.pdf