



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Charakterizace vibračního chování CNC obráběcího zařízení v optické výrobě

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Martin Kulháněk**

Vedoucí práce: Ing. Jan Václavík



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Kulháněk**
Osobní číslo: **M14000201**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Charakterizace vibračního chování CNC obráběcího zařízení v optické výrobě**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

1. Provedte rešerši v oblasti měření vibrací na obráběcích strojích.
2. Seznamte se se zařízením VibExpert a na základě provedené rešerše navrhnete vhodnou metodu měření.
3. Metodu aplikujte na vybrané obráběcí zařízení a vhodným způsobem upravujte procesní parametry tak, aby měření komplexně zachycovalo chování stroje.
4. Interpretujte naměřená data a pokuste se nalézt korelaci mezi procesními parametry a získanými poznatky o vibračním chování zařízení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 40–50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] **RAO V. DUKKIPATI, Rao V.J.** Textbook of mechanical vibration. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2005. ISBN 81-203-2593-1.
- [2] **Vibexpert II – Operating instructions.** Ismaning: Prüftechnik, 2010. LIT 53.201.11.2010.0EN
- [3] **KELLER, P.** Programování a řízení CNC strojů. Liberec: Technická universita v Liberci. (2005).

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Václavík**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Matoušek**
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Datum zadání diplomové práce: **10. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16. 5. 2016

Podpis: 

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi při zpracování této diplomové práce pomáhali nebo mě jakkoli podporovali. V první řadě velice děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Václavíkovi za jeho vedení, poskytnutý čas a cenné rady při zpracování této práce. Dále velice děkuji konzultantovi práce Ing. Ondřejovi Matouškovi za jeho odborný dohled, ochotu, trpělivost a získané zkušenosti. Na závěr bych chtěl samozřejmě poděkovat nejbližší rodině a přátelům za jejich podporu.

Abstrakt

Během procesu opracování optických povrchů dochází ke vzniku vibrací jak na obráběcím stroji, tak i na obrobku. Tyto vibrace způsobují nadměrné opotřebení obráběcího stroje a mají negativní vliv i na samotný obrobek, zejména je pak tato problematika rozvíjena u asférických povrchů. Ačkoliv je v dnešní době kvalita výroby asférických povrchů na slušné úrovni, vzniká zde aktuální problém středních prostorových frekvencí, které brání dalšímu posunutí kvality asférických povrchů kupředu bez použití extrémně drahých zařízení, jakými jsou např. Magnetorheologické nebo Iontové leštění. Z tohoto důvodu je žádoucí najít zdroje těchto středních prostorových frekvencí, kdy se přepokládá, že jedním z nich jsou vibrace a odtud plyne motivace provést analýzu vibrací obráběcího procesu, k čemuž je potřebná dostatečně detailní znalost o jejich vlastnostech a způsobech měření. Cílem této diplomové práce tedy byla charakterizace vibračního chování u konkrétního obráběcího CNC stroje typu MCG 100 od firmy Optotech za pomoci měřicího zařízení VibXpert II. Na základě vytvořené rešerše a vlastností měřicího zařízení VibXpert II byl vytvořen a odzkoušen postup, který umožní účinně a jednoduše měřit vibrace a analyzovat jejich chování při obráběcím procesu CNC stroje. Naměřená data jsou následně analyzována se snahou nalézt korelaci mezi defekty na povrchu, vzniklými při procesu broušení, a získanými poznatky o vibračním chování daného zařízení.

Klíčová slova:

Měření vibrací

CNC vibrodiagnostika

Střední prostorové frekvence

VibXpert II

Abstract

There are some things formed during processing of optical surfaces, which cause undesirable properties and limit further use. One of these are vibrations and they cause excessive wear of the machine tool and they have a negative impact on the work piece itself, especially in the field of aspheric optics. Although nowadays production quality of aspheric surfaces is at a good level, there is a current problem with the mid spatial frequencies that prevent further development of aspheric optic without using an extremely expensive equipment, such as Ion polishing or MRF. Therefore it is necessary to find a source of this mid spatial frequencies, where it is assumed, that one of them are vibrations and this is the motivation to analyze vibrations during processing, where sufficiently detailed knowledge of its properties and measurement options is required. The aim of thesis was characterize the vibrational behavior for a specific CNC machine Optotech MCG 100 using measuring equipment VibXpert II. Based on established research and properties of the measuring device VibXpert II there was created and tested a procedure to effectively and easily measure vibrations and analyze their behavior during the processing of CNC machine. There is an attempt to find a correlation between surface defects, formed during the stage of processing and acquired knowledge about the vibration behavior of the CNC machine.

Key words:

Vibration measurement

CNC vibrodiagnostic

Mid spatial frequencies

VibXpert II

Obsah

ÚVOD.....	10
1 BROUŠENÍ	11
1.1 BROUŠENÍ - ROVINNÁ A SFÉRICKÁ OPTIKA.....	11
1.2 BROUŠENÍ - ASFÉRICKÁ OPTIKA	13
1.3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ ROVINNÝCH, SFÉRICKÝ A ASFÉRICKÝCH POVRCHŮ	14
2 VIBRACE	16
2.1 DRUHY VIBRACÍ.....	16
2.1.1 Vlastní vibrace	17
2.1.2 Vynucené vibrace.....	18
2.1.3 Samobuzené vibrace	19
2.1.4 Mechanické rázy.....	20
3 TYPY MECHANICKÝCH SNÍMAČŮ PRO MĚŘENÍ VIBRACÍ	22
3.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY	22
3.2 SNÍMAČE RYCHLOSTI	23
3.3 SNÍMAČE ZRYCHLENÍ	24
3.4 MOŽNOSTI UCHYCENÍ SNÍMAČŮ K MĚŘENÉMU ZAŘÍZENÍ.....	25
4 POUŽITÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ	27
4.1 OBRÁBĚCÍ CNC ZAŘÍZENÍ OPTOTECH MCG 100	27
4.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ VIBXPERT II	28
4.2.1 Snímač VIB 6.142.....	28
5 VLASTNÍ EXPERIMENT	30
5.1 MĚŘENÍ NA NÁSTROJOVÉM VŘETENU	30
5.1.1 Měření bez rotace nástroje.....	32
5.1.2 Měření s rotací nástroje.....	35
5.2 MĚŘENÍ NA OBROBKOVÉM VŘETENU	37
5.2.1 Měření při obráběcím procesu bez obrobku	38
5.2.2 Měření při obráběcím procesu s obrobkem.....	39
5.3 MĚŘENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ	41
6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	44
ZÁVĚR.....	48
CITOVANÁ LITERATURA	50

Seznam obrázků

Obr. 1 - Srovnání nízkých (vlevo), středních (uprostřed) a vysokých (vpravo) prostorových frekvencí.....	15
Obr. 2 - Schéma rozdělení vibrací obráběcích strojů	17
Obr. 3 - Ilustrační znázornění vlastních volných vibrací.....	17
Obr. 4 - Ilustrační znázornění ustálených nucených vibrací.....	19
Obr. 5 - Ilustrační znázornění samobuzených vibrací	20
Obr. 6 - Ilustrační znázornění mechanického rázu	20
Obr. 7 - Snímač vibrací VIB 6.142.....	23
Obr. 8 - Principiální uspořádání absolutního elektrodynamického snímače rychlosti kmitavého pohybu.....	24
Obr. 9 - Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku	26
Obr. 10 - OPTOTECH MC 100 CNC	27
Obr. 11 - Měřicí zařízení VibXpert II.....	28
Obr. 12 - Akcelerometr VIB 6.142 s přišroubovaným magnetickým uchycením..	29
Obr. 13 - Uchycení snímačů na nástrojovém vřetenu.....	31
Obr. 14 - Časový záznam měření na nástrojovém vřetenu - bez rotace nástroje....	32
Obr. 15 - Rychlá Fourierova transformace aplikována na časový záznam měření nástrojového vřetena bez rotace nástroje, 2D zobrazení (nahore), 3D zobrazení v závislosti na pozici vřetena (dole).....	33
Obr. 16 - Pásmová propust – 4 kHz (horní), 12 kHz (uprostřed), porovnání 4kHz - modrá a 12 kHz – oranžová (spodní).....	34
Obr. 17 - Celková efektivní hodnota zrychlení vibrací (Charakter všech frekvenčních složek vibrací bez stejnosměrné složky) - bez rotace nástroje	34
Obr. 18 - Porovnání časového záznamu naměřených dat bez rotace nástroje (oranžová) a s rotací nástroje (modrá)	35
Obr. 19 - Rychlá Fourierova Transformace aplikována na časový záznam měření nástrojového vřetena s rotací nástroje.....	36
Obr. 20 - Porovnání celkové efektivní hodnoty zrychlení vibrací pro data bez rotace nástroje (modrá) a s rotací nástroje (oranžová)	36
Obr. 21 - Umístění snímačů na obrobkovém vřetenu.....	37
Obr. 22 - Časový záznam signálu pro měření obráběcího procesu roviny 100m - bez obrobku	38
Obr. 23 - Rychlá Fourierova transformace aplikována na časový záznam měření obrobkového vřetena bez upnutého obrobku.....	39
Obr. 24 - Časový záznam měření na obrobkovém vřetenu: bez upnutého obrobku (horní), s upnutým obrobkem (uprostřed), porovnání bez obrobku a s obrobkem (spodní)	40

Obr. 25 - Porovnání celkových efektivních hodnot zrychlení vibrací pro měření bez obrobku (modrá) a s obrobkem (oranžová)	40
Obr. 26 - Konkrétní vzorek z materiálu BK7 (vpravo), který byl použit pro obrábění	42
Obr. 27 - Časový záznam měření zrychlení vibrací při obráběcím procesu - úběr: 60 μm (nahore), FFT časového záznamu (uprostřed), celková efektivní hodnota všech frekvencí vibrací (dole).....	43
Obr. 28 - Stav povrchu po broušení (úběr materiálu: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf	44
Obr. 29 - Stav povrchu po prvním cyklu leštění (úběr materiálu při předešlém broušení: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf	45
Obr. 30 - Stav povrchu po druhém cyklu leštění (úběr materiálu při předešlém broušení: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf ..	46
Obr. 31 - Porovnání mapy povrchu z bezkontaktního profilometru LuphoSCAN po druhém cyklu leštění (vlevo) a invertované mapy vibrací, které byly naměřeny při obráběcím procesu (vpravo)	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Obecné parametry snímače VIB 6.142	29
Tabulka 2 - Seznam použitých strojů a zařízení.....	30
Tabulka 3 - Nastavení parametrů obráběcího stroje, obráběcího procesu a měřicího procesu.....	31
Tabulka 4 - Parametry nastavení obráběcího a měřicího procesu při měření na obrobkovém vřetenu	38
Tabulka 5 - Nastavení reálného obráběcího procesu.....	41
Tabulka 6 - Nastavení parametrů lešticího stroje, nástroje a samotného lešticího procesu	45

Úvod

V dnešní době je v oblasti přesné optické výroby kladen velký důraz na kvalitu výsledného produktu, která je závislá na mnoha faktorech během procesu opracování a odtud plyne motivace zabývat se vlastnostmi, které jsou pro tuto věc limitující. Jedním z hlavních předmětů zájmu je povrchový stav obráběného materiálu v jednotlivých fázích opracování, tedy jak po hrubém opracování broušením, tak i po korekci leštěním. Vzniklé poškození v jednotlivých fázích opracování nazýváme povrchové, případně podpovrchové poškození, v závislosti na rozsahu a charakteru poškození. Zde je nutné zmínit střední prostorové frekvence, které jsou v dnešní době největší překážkou k dosažení vyšší přesnosti v oblasti asférické optiky a kde jedním z jejich zdrojů mohou být právě vibrace. Vibrace jsou nedílnou součástí každého obráběcího procesu a navzdory pokročilým technologiím v oblasti tlumení vibrací je zatím není možné kompletně eliminovat. Vzhledem k tomu, že změny vibračního chování obráběcího procesu se přímo přepisují na výsledný povrch a mohou způsobovat defekty v oblasti středních prostorových frekvencí, je velmi žádoucí charakterizovat jejich chování a zdroje.

S ohledem na výše uvedené je cílem této diplomové práce nejprve vytvořit souhrn informací, týkajících se vlivu vibrací na jakost povrchu obrobku. První část práce je věnována rešerši na téma vibrodiagnostika a úvodu do procesu broušení rovinných, sférických i asférických povrchů, resp. získání základních znalostí v oblasti této problematiky a nahlédnutí do úvodu rozdělení prostorových frekvencí. Začátek rešerše popisuje vliv vibrací na proces broušení, rozdíl při broušení rovinných, sférických a asférických povrchů a v neposlední řadě vliv vibrací na strukturu povrchu v oblasti zmíněných středních prostorových frekvencí. Druhá část se věnuje základnímu rozdělení vibrací u obráběcích strojů a následně možnostmi, jak vibrace měřit, resp. základními typy snímačů, které lze k měření vibrací použít.

Praktická část práce popisuje vlastní experiment, který byl prováděn v Regionálním centru speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC v Turnově. Na základě získaných znalostí byla provedena vibrodiagnostika obráběcího CNC stroje značky MCG 100 od firmy Optotech s cílem podrobně popsat vibrační chování uvedeného stroje v několika provozních fázích, včetně reálného obrábění, a naměřená data zrychlení vibrací následně porovnat s defekty vzniklými na povrchu obrobku po obráběcím procesu, resp. zdali se amplitudy ve vibračním chování přímo přepisují na výsledný povrch obráběného vzorku. K samotnému měření bylo použito zařízení VibXpert II od firmy Prüftechnik a data byla zpracována v software MathWorks Matlab.

1 Broušení

Broušení se v optice používá k zarovnání povrchu do požadovaného tvaru, k odstranění určité vrstvy materiálu na povrchu nebo k odstranění škod po řezání. Broušení je nezbytným úvodním krokem v hrubším opracování obrobku, nicméně samotný proces zapříčiňuje vznik vynuceného kmitání vlivem kmitání brousícího nástroje nebo obrobku a takto vzniklé vibrace mají negativní vliv na opotřebení stroje, obráběcího nástroje i kvalitu výsledného produktu. Mimo to je jedním z hlavních zdrojů poškození, povrchového i podpovrchového. Broušení bychom měli proto provádět takovým způsobem, abychom rozsáhlost těchto poškození minimalizovali. Důležitými parametry, které ovlivňují proces broušení je stav povrchu po předchozím opracování, materiál, ze kterého je výrobek vyroben, typ brusiva nebo rychlost a tlak, pod kterým je brusivo aplikováno. Vliv má i prostředí, ve kterém je stroj umístěn a ve kterém je prováděno broušení, protože i nepatrné vibrace způsobené okolními vlivy mají v optické výrobě neblahý vliv na výsledný produkt. V neposlední řadě je nynějším trendem stabilní a tuhá konstrukce obráběcího stroje z důvodu omezení celkových vibrací stroje, které také působí negativně na celý proces.

Během procesu broušení dochází k přímému kontaktu obráběcího nástroje s obrobkem a je proto nutné zvolit vhodné brusivo, případně chladicí směs. Při broušení se z materiálu odštěpují přebytečné části ve formě pilin či šupinek a vzniká nejen povrchové a podpovrchové poškození, ale také již zmíněné vibrace. Asi nejpoužívanějším brusivem je karbid křemíku – sloučenina uhlíku a křemíku s chemickým označením SiC. Díky své tvrdosti a ostrým hranám tvoří ideální brusný materiál. Mezi další brusiva můžeme zařadit například karbid boru, což je velice tvrdá a chemicky odolná látka nebo různé krystalické, monokrystalické nebo polykrystalické (PCD) frakce diamantu. Polykrystalický diamant je většinou popisován průměrnou velikostí krystalů (zrna), které ho tvoří. Zrnitosti se pohybují od nanometrů až do stovek mikrometrů, odkud vzniká označení nanokrystalický nebo mikrokystalický diamant.

1.1 Broušení - Rovinná a sférická optika

Rovinné a sférické prvky jsou stále nejrozšířenějšími elementy v dnešní optice a to především kvůli jejich jednoduché výrobě a kontrole tvaru. K jejich výrobě, je i pro přesnou optiku, možné využít čistě mechanických kyvných a rotačních mechanismů. Při kontrole

tvaru se využívá interference na tenké vrstvě, kdy je na vyráběnou plochu přikládán protikus, tzv. kalibr. Výsledek nám může připomínat princip vrstevnic na geologické mapě.

Příkladem rovinných ploch jsou např. hranoly, klíny či rovinná zrcadla. Sférická optika je naopak výrobek s jednou či více kulovými plochami. Sférické plochy rozdělujeme na konkávní (vyduté) a konvexní (vypouklé). [1][2]

Při optické výrobě je nejprve nutné výrobek, popř. více výrobků, upevnit do sestavy, což můžeme provést několika různými způsoby. Mezi nejpoužívanější patří sádrování, hlavně z důvodu nízké cenové nákladnosti. V takovém případě je obrobek přisádrován do pouzdra. Opakem sádrování, z hlediska ceny, je nasávání, kdy jedna strana optického elementu je doslova přisáta do pouzdra, popř. k podkladové desce. Tato metoda je velice drahá a časově náročná na přípravu. Kompromisem může být nalepovací metoda, kdy je optický element nalepen do pouzdra, popř. k podkladové desce pomocí nahřátého vosku nebo smoly. Materiál podkladových desek je určen dle metody uchycení (sádra, nerez, hliník, sklo nebo litina). [1][2]

Samotné broušení se poté realizuje pomocí tabletových a hrncových nástrojů. V případě kruhových nástrojů mluvíme např. o broušení tzv. hrncovým nástrojem. Hrncový nástroj je používán především ve sférické optice a můžeme ho volně popsat jako válec s dutou strukturou, upevněný na kyvné hlavici a zakončený brusnou částí. Broušení probíhá v několika krocích, kde se s každým následujícím krokem snižuje hrubost brusného nástroje a následně se přechází na tzv. lapování. Výsledný rádius je určen rádiusem nástroje a jeho nakloněním vůči ose otáčení obrobku. Průměr nástroje by měl být přibližně o třetinu větší než poloměr obráběného polotovaru. [1][2][3]

Lapování je poslední krok broušení a provádí se za pomoci aplikace volného brusiva. Slouží k úpravě drsnosti povrchu a je prováděno v několika krocích s postupným zvyšováním jemnosti brusiva a s cílem získat požadovaný tvar a značně minimalizovat nebo úplně odstranit poškození povrchu vzniklé během broušení. Lapování provádíme pomocí lapovacích nástrojů, které se hýbou v nepravidelném směru, čímž i brusivo je aplikováno plošně ve stále měnících se drahách a je možné tak odstranit škody vzniklé při předchozím obrábění. Lapovací nástroje jsou běžně vyráběny z měkkých materiálů, jakými jsou měď, litina či plast. [1][2][3]

1.2 Broušení - Asférická optika

Jak již bylo zmíněno, nejpoužívanějším optickým prvkem jsou v dnešní době sférické čočky. Jejich výhodou je poměrně snadná výroba a opracování, což se následně promítne na konečné ceně, ale naopak nevýhodou je, že způsobují mnohé nedokonalosti ve funkci systému (sférická vada, astigmatická vada, problém kóma,...) a musejí se přidat další sférické čočky, které tyto nedokonalosti korigují. Konečná soustava je pak složena z několika sférických čoček, což má za důsledek nejen nárůst velikosti celé soustavy, ale dodatečné náklady na výrobu dalších elementů. Příkladem takové soustavy může být objektiv fotoaparátu. [1][2]

Za tímto účelem jsou vyráběny čočky asférických tvarů, které jsou díky svému speciálnímu tvaru schopny tyto neduhy klasických sférických čoček eliminovat a vytvořit tak lehčí a menší soustavu se stejnou funkcí.

Stejně jako u rovinné a sférické optiky, prvním krokem ve výrobě asférických čoček je tvarování – broušení. Důležitým rozdílem je přístup k broušenému povrchu. Zatímco u sférické a rovinné optiky je snadný přístup k celému povrchu materiálu, u asférických čoček z důvodu jejich specifického tvaru a zakřivení musíme k povrchu přistupovat pouze bodově. Bodový přístup má vysoké nároky z hlediska přesnosti a pevnosti přístroje. Ten by měl být izolován od okolních vlivů, aby nedošlo k externí manipulaci (chvění a vibrace) s přístrojem a poškození procesu broušení. Ovšem vibrace vznikají i při samotném kontaktu nástroje s obrobkem a ovlivňují tak stav povrchu po broušení. Výjimkou mohou být asférické plochy s malým odchýlením od best fit sféry (cca do 5 μm), kde lze k povrchu přistupovat podobně jako u sférických materiálů, kdy je brousící nástroj spolehlivou kopií tvaru broušeného elementu. Ovšem zatímco u sférických a rovinných materiálů jsme schopni pomocí lapování téměř kompletně odstranit poškození povrchu vzniklé vibracemi a jinými vlivy, u asférických čoček vyvstává řada problémů. [1][2][3]

Hlavním problémem je nemožnost použít lapovací nástroje pro plošný přístup k povrchu a k eliminaci poškozené vrstvy, čímž zůstává v asférické čočce mnohem větší podpovrchové poškození. Důležitým mezikrokem je v první řadě analyzovat příčinu vzniku poškození povrchu, resp. zdroj změn vibračního chování při obráběcím procesu a snažit se ho co nejvíce minimalizovat. [1][2][3]

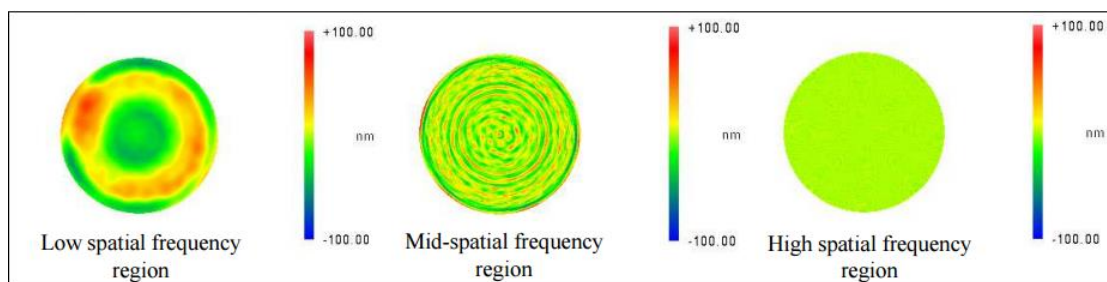
1.3 Technologie obrábění rovinných, sférický a asférických povrchů

V dnešní době existuje mnoho typů a metod broušení, ať už klasické broušení volným brusivem nebo na plně automatických CNC bruskách. Jednou z hlavních odlišností různých metod je například jejich přístup k broušené ploše. Jak již bylo zmíněno, zatímco u rovinných a sférických povrchů lze k broušení přistupovat plošně, u asférických povrchů se pak k broušenému povrchu přistupuje většinou bodově (subaperturně).

Poté u plošného přístupu, potažmo výroby rovinných a sférických ploch můžeme pozorovat poškození povrchu obrobku kontinuálně po celé ploše, nicméně u subaperturního bodového přístupu k obráběné ploše, resp. při obrábění asférických tvarů, vzniká spíše lokální poškození ve formě „kruhů“, které se opakují s určitou periodou. Možnou příčinou by mohly být právě změny vibračního chování v průběhu procesu samotného CNC obráběcího zařízení.

Zmíněné kruhové vady spadají do oblasti takzvaných středních prostorových frekvencí „mid spatial frequencies.“, jejichž perioda se obvykle definuje mezi 1 až 10 mm. Tento pojem balancuje někde mezi tzv. „low spatial frequencies error“, tedy tvarovým poškozením povrchu a „high spatial frequencies error“, kde se jedná o chybu povrchu v důsledku jeho mikrodrsnosti. Srovnání výše zmíněných frekvencí je vidět na Obr. 1. Střední prostorové frekvence (MSF) jsou v moderní literatuře ne příliš objasněny a opomíjený pojem, i když je dnes známo, že spolu s podpovrchovým poškozením výrazně ovlivňují kvalitu optických systémů. Největší problémy vznikají v oblasti leštění, kdy velikost lešticího nástroje se pohybuje v jednotkách milimetrů a samotný nástroj pak není schopen odleštit menší strukturu, než je jeho šířka. Konkrétně k odleštění frekvence poškození s periodou 10 mm je limitující velikost nástroje 5 mm.

Zásadním problémem v definování středních prostorových frekvencí by mohla být poměrně obsírná definice a nemožnost tyto střední frekvence kvantifikovat, jako je tomu u mikrodrsnosti nebo tvarové chyby povrchu. Střední prostorové frekvence se objevují zejména při broušení na subaperturně obráběném povrchu, tedy brousicím kolem, a jejich zdroj zatím není jednoznačně určen, nicméně je přepokládáno, že jedním z významných zdrojů těchto frekvencí jsou právě změny ve vibračním chování, vznikající při procesu obrábění a následně jejich přenos na obráběnou plochu, kdy při lokálním zavibrování nástroj způsobí poškození ve formě kruhu (viz Obr. 1 – Mid spatial frequency region). [4]



Obr. 1 - Srovnání nízkých (vlevo), středních (uprostřed) a vysokých (vpravo) prostorových frekvencí [5]

Na výše uvedeném obrázku lze vidět porovnání jednotlivých regionů prostorových frekvencí, kde na levém obrázku je tzv. „Low spatial frequency region“, který odpovídá tvarovým chybám na povrchu vzorku, vpravo „High spatial frequency region“, jež odpovídá chybě v důsledku mikrodrsnosti povrchu a uprostřed naše oblast zájmu, tedy střední prostorové frekvence „Mid spatial frequency region“, kde jsou vidět nápadné koncentrické struktury vzniklé při opracování povrchu.

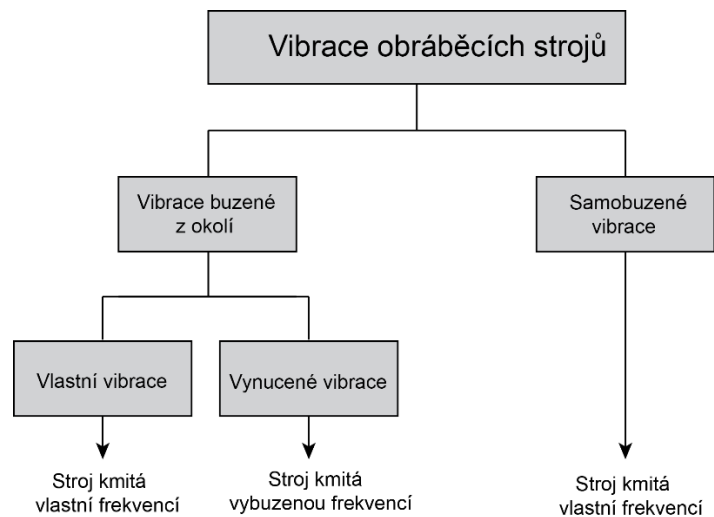
2 Vibrace

Vibracemi můžeme rozumět opakující se, periodickou nebo oscilační odezvu mechanického systému. Opakující se pohyb, který je pravidelný a vyskytuje se na relativně nízkých frekvencích, obecně nazýváme oscilací, zatímco kmitání s nepravidelnou strukturou a nízkou amplitudou spadají do širšího pojmu vibrací.

Vibrace, respektive mechanické kmitání u obráběcích strojů je poměrně složitá a těžko popsatelná fyzikální veličina, jelikož tato obráběcí zařízení jsou tvořena soustavou několika hmotných a pružných těles, která jsou spolu spojena a navzájem se ovlivňují. Působení nějakého zdroje energie na takové pružné těleso říkáme buzení a právě buzení může způsobit vznik mechanického kmitání. Mechanické kmitání je dynamický jev, definován jako oscilace hmotného bodu nebo tuhého tělesa kolem své rovnovážné polohy, tedy polohy, kde je hodnota působících sil na těleso nulová. Vibrace, které se objevují ve většině strojů a zařízeních mají nežádoucí účinky a to nejen z důvodu, že způsobují nežádoucí pohyb zařízení, nadměrné namáhání vedoucí k rychlejšímu opotřebení, ztrátě výkonu aj., ale jsou také výrazným zdrojem hluku, který je sám o sobě nežádoucí veličinou. Trendem je proto vibrace co nejvíce potlačit, k čemuž je potřebná znalost jednotlivých druhů vibrací a schopnost je měřit, analyzovat a charakterizovat [6][7]

2.1 Druhy vibrací

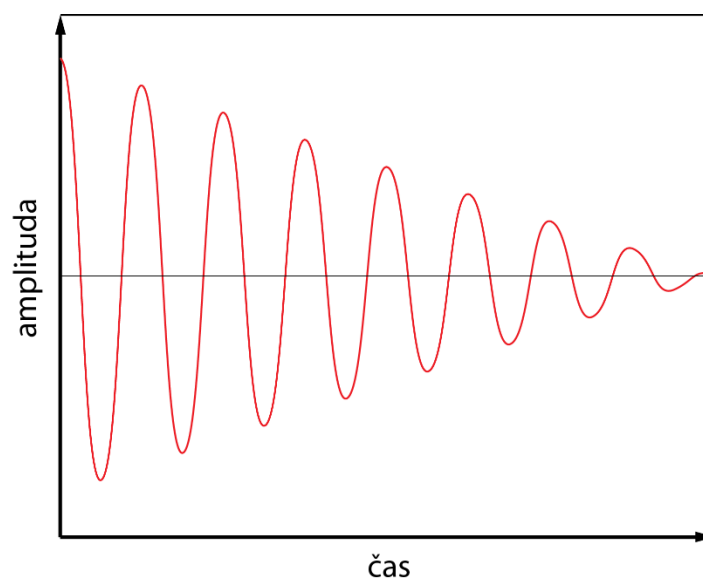
Vibrace obráběcích strojů můžeme rozdělit do několika základních skupin tak, jak to popisuje obrázek níže (Obr. 2), tedy na takzvané vibrace vnější (buzené z okolí stroje) a vibrace vnitřní (samobuzené vibrace). Dalším důležitým a poměrně častým druhem vibrací jsou mechanické rázy. [7]



Obr. 2 - Schéma rozdělení vibrací obráběcích strojů

2.1.1 Vlastní vibrace

Vlastní volné vibrace, někdy také nazývány jako impulzivní vibrace jsou speciálním případem nucených vibrací, kde samotné vynucení je nějaký krátký impuls, působící na celou obráběcí soustavu, který ji vychýlí z rovnovážné polohy. Tento druh vibrací tedy vzniká při absenci nějaké dlouhodobé nebo cyklické budící síly. Jelikož všechny součásti stroje vykazují jisté tlumení, můžeme průběh vlastních vibrací popsat jako postupně se rozkládající kmitání, kde je vidět ztlačitelná ztráta energie v poměrně krátkém časovém intervalu. Vlastní volné kmitání je znázorněno na Obr. 3. [8] [9] [10] [11]



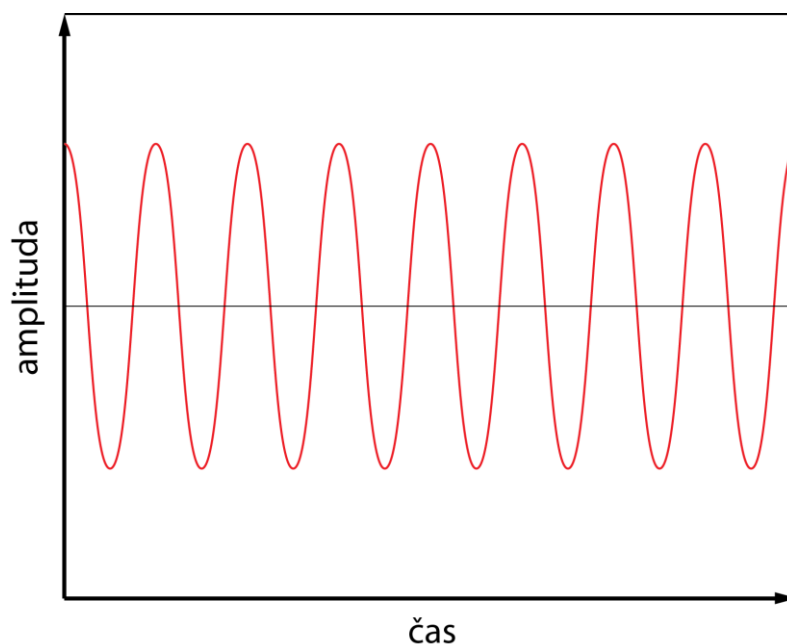
Obr. 3 - Ilustrační znázornění vlastních volných vibrací

Samotný impuls může pocházet z vnějšího okolí sledovaného zařízení, ale také přímo z vnitřku obráběcího stroje. Konkrétní případ vzniku vlastních vibrací je například

náhlé a prudké spuštění či zastavení obráběcího procesu. Dalšími zdroji takovýchto, očividně náhodných vibrací jsou povolené šrouby, ozubená kola, kluzná vedení a obecně všechny součástky, kde je nějaká, byť minimální vůle při pohybu. Všechny zdroje impulzivních vibrací by měly být eliminovány nebo alespoň potlačovány již při konstrukci samotného stroje, kdy spouštění a zastavování obráběcího procesu by mělo být prováděno plynule a součástky konstruovány tak, aby při pohybu vznikala co možná nejmenší vůle. Náhodné vibrace však mohou vzniknout i působením externích zdrojů, například spadnutím mohutné věci na zem v blízkosti obráběcího stroje, přejetím kamionu v okolí nebo při působení sousedního stroje. Pro tyto případy jsou konstruovány speciální uchycení, které by měly tyto vnější zdroje vibrací potlačit a vzniklé vibrace tak minimalizovat. [8] [9] [10] [11]

2.1.2 Vynucené vibrace

Naproti tomu vynucené vibrace, někdy také nucené vibrace vznikají, pokud se v okolí nachází zdroj vibrací, díky kterému dochází k nepřetržitému nebo cyklickému buzení. Napříč tomu, že vlastní volné vibrace jsou ve většině případů popisovány v časové oblasti, vibrace vynucené jsou typicky znázorňovány a analyzovány nejen v oblasti časové, ale i v oblasti frekvenční a právě samotná frekvence vibrací je hlavním vodítkem při zjišťování zdroje těchto vibrací. Frekvence může být identifikována z vlnové délky vln na obrobku po dokončení obrábění a z pracovní rychlosti nastavené při obrábění. Konkrétně pokud je rychlost rotace obráběcího (brousícího) nástroje, resp. brousícího kola přesně 10x větší než rychlost obrobku, lze na povrchu obrobku pak najít 10 vln. Průběh stabilních ustálených nucených vibrací lze vidět na Obr. 4. [8] [9] [10] [11]



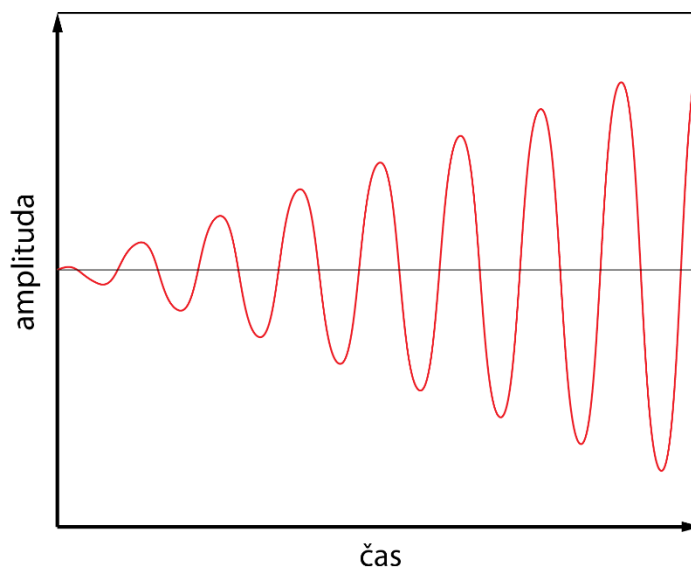
Obr. 4 - Ilustrační znázornění ustálených nucených vibrací

Obvyklým zdrojem nucených vibrací je nevyváženost při rotačních pohybech. Do této kategorie spadá například nevyváženost rotačního kola, nevyváženost motoru, kladkového kola aj. Je tedy důležité dbát na přesné vyvážení všech rotačních prvků před zahájením obráběcího procesu. Pokud se frekvence nucených vibrací blíží vlastní přirozené frekvenci systému, dochází k jevu nazývanému rezonance a ke vzniku rozsáhlých vibrací. Obecný trend je nastavit pracovní proces tak, aby k rezonančnímu jevu nedošlo. [8] [9] [10] [11]

2.1.3 Samobuzené vibrace

Samobuzené kmitání je většinou výsledkem dynamické nestability obráběcího procesu spolu s kontaktem obráběcího nástroje a samotného obrobku a vyskytuje se v menší či větší míře ve většině obráběcích procesů. Je důležité tyto vibrace co nejvíce minimalizovat, zejména pak při procesu broušení, který je velice náročný na výslednou přesnost a kvalitu povrchu. Na rozdíl od vynuceného kmitání nevznikají za konstantního působení vnější budicí síly a vznikají tak bez periodického budicího zdroje. Soustava sledovaného zařízení je prvním impulzem vyvedena mimo svůj rovnovážný stav a dále již vnější budicí vlivy na soustavu nepůsobí a vibrace závisí pouze na vlastnostech konkrétní kmitací soustavy. Charakteristickou vlastností samobuzených vibrací je jejich růst spolu s časem až do maximální hodnoty dané vlastnostmi sledované soustavy. Z tohoto důvodu se jedná o nejhlavnější příčinu vzniku nepřesností při obráběcích procesech. Samobuzené vibrace se rozdělí na dvě základní skupiny. První jsou vibrace vznikající především na povrchu

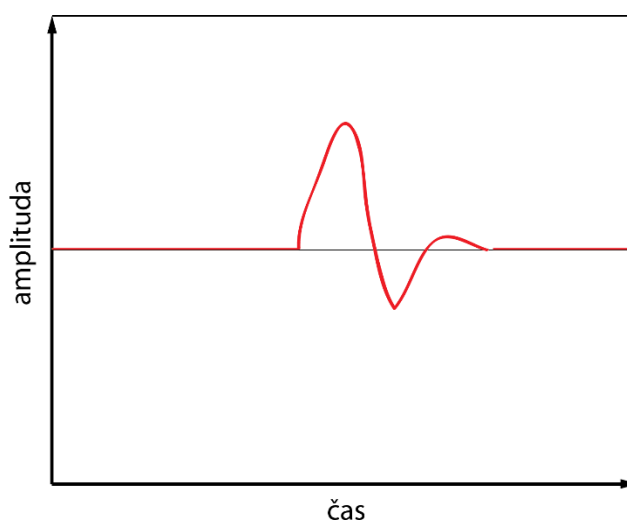
obrobku a druhou skupinu tvoří vibrace vznikající na povrchu obráběcího nástroje (obráběcím kole) a mají přímý vztah na stav povrchu samotného obráběcího nástroje. Samobuzené vibrace můžeme vidět na Obr. 5. [8] [9] [10] [11]



Obr. 5 - Ilustrační znázornění samobuzených vibrací

2.1.4 Mechanické rázy

Mechanické rázy jsou posledním z hlavních druhů vibrací. Jedná se o poměrně častý jev a může se vyskytovat buď samostatně nebo jako součást výše zmíněných druhů vibrací. Průběh mechanického rázu v grafu můžeme vidět na Obr. 6.



Obr. 6 - Ilustrační znázornění mechanického rázu

V podstatě se jedná o impulzní budicí efekt, který má za následek kmit, který je ojedinělý a je v krátkém časovém intervalu utlumen a zmizí. Rychlost útlumu je dána mechanickými vlastnostmi soustavy, resp. konstrukcí obráběcího stroje ale i materiálem, ze kterého je obrobek vyroben. Dále se do obráběcích strojů přidávají umělé konstrukční prvky, resp. tlumiče, které mají za cíl absorbovat energii vzniklou při vibracích a urychlit tak tlumení soustavy a snížit jejich maximální výchylku. U strojních zařízení obecně bývá přítomnost mechanických rázů během obráběcího procesu známkou poškození valivých ložisek, a proto je žádoucí provádět v pravidelných intervalech takzvanou rázovou zkoušku, kdy zjišťujeme maximální amplitudu, rychlost utlumení a porovnáváme s předchozími naměřenými hodnotami. Oproti charakterizaci předešlých druhů vibrací je rázová zkouška podstatně jednodušší. [8] [9] [10] [11]

3 Typy mechanických snímačů pro měření vibrací

Měření vibrací lze provádět, jak již název vypovídá, buď mechanicky, tedy za přímého kontaktu snímače se sledovanou plochou, ale také bezkontaktně. Tato kapitola pojednává o jednotlivých typech mechanických snímačů, které lze použít k měření vibrací různých strojů či zařízení. Při volbě vhodného snímače je nejdříve nutné určit, o jaký druh vibračního kmitání se vlastně jedná. Prvním typem jsou takzvané absolutní vibrace. Ty popisují pohyb námi sledovaného tělesa, stroje vzhledem k Zemi. Naopak druhým typem jsou relativní vibrace, kde uvažujeme pohyb sledovaného tělesa k jistému uměle vytvořenému bodu (základně). Za námi zvolenou základnu můžeme považovat třeba rám stroje. Samotný rám stroje pak ještě může kmitat vzhledem k zemskému souřadnému systému a to je také nutné zohlednit při měření relativních vibrací. [12] [13]

Mechanické kmitání je určeno několika základními veličinami. Těmi jsou frekvence společně s výchylkou, rychlostí a zrychlením kmitavého pohybu. Výchylku, rychlost a zrychlení lze pak navzájem přepočítávat za pomoci matematických operací, jakými jsou derivace a integrace. Při volbě vhodného typu snímače se lze řídit podle rozsahu frekvence prováděného měření. Pro frekvence nižší než 10 Hz se většinou používají snímače výchylky. Pro frekvenční rozsah 5 – 3500 Hz pak snímače rychlosti a pro frekvence až do 40 kHz se používají snímače zrychlení. Správné určení frekvenčního rozsahu je tedy jedno z hlavních kritérií, které by mělo být zohledněno při volbě vhodné veličiny měření. [13] [14]

3.1 Snímače výchylky

Snímače výchylky, resp. posunutí kmitajícího tělesa fungují na několika základních principech. Těmi jsou například principy magnetické, optické, kapacitní, indukční nebo indukčnostní. V dnešní době se mezi nejpoužívanější snímače ve vibrodiagnostice používají snímače na indukčnostním principu. Ty využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Nejčastěji se vyrábí jako integrované, kde se jedná o složení cívky, základní části elektroniky a kovového stínícího krytu v jeden celek. Důvodem pro takovou konstrukci je vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu indukčnostních snímačů vysoká citlivost těchto snímačů na okolní parazitní vlivy. Těmi mohou být například délka kabelu, vnější elektromagnetické pole v okolí snímače apod. Rozsah takových snímačů se pohybuje v rozmezí 10 – 10000 Hz. V poslední době se do popředí dostávají ale i optické snímače, které fungují na principu bezkontaktního měření

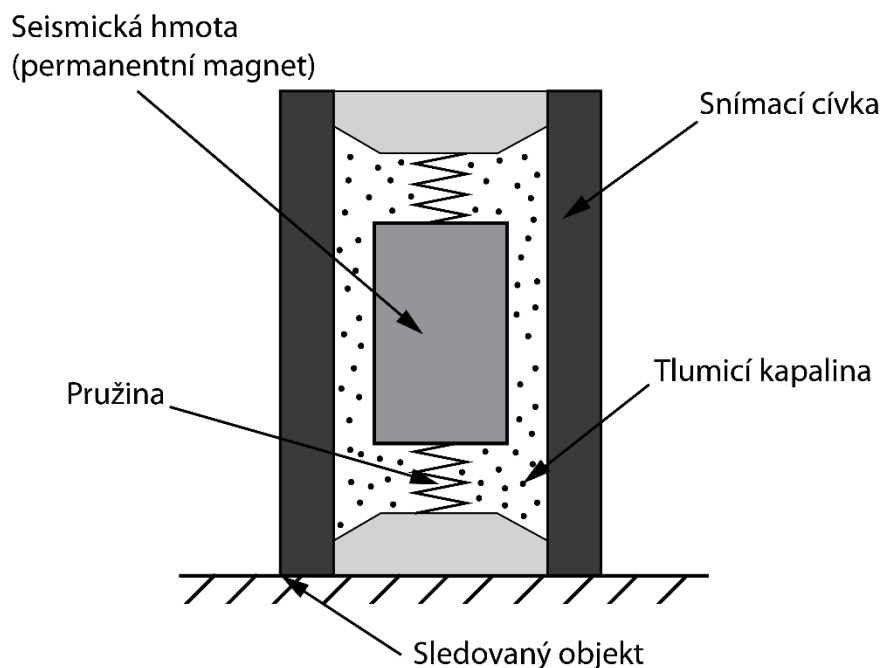
vzdálenosti dvou zařízení, resp. jejich povrchu a kde díky právě bezdotykovému měření nedochází k přímému ovlivnění měřícího subjektu. Na druhou stranu se zde vytváří další případné zdroje nejistot, které je třeba při měření uvažovat. Snímač vibrací můžeme vidět na Obr. 7. [12] [13] [14]



Obr. 7 - Snímač vibrací VIB 6.142

3.2 Snímače rychlosti

Výhodou snímačů rychlosti je poměrně dlouhá tradice a elektrodynamický princip, který je snadno realizovatelný, kde se jedná o měření kmitavého pohybu snímací cívky. Zmíněný princip snímače rychlosti lze vidět na Obr. 8. Snímací cívka je umístěna v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seismickou hmotu snímače. Prostor mezi cívkou a magnetem je vyplněn tlumící kapalinou. Snímač je upevněn na sledovaný objekt a při rezanci vibračního chování se kmitavý pohyb přenáší na permanentní magnet a v cívce je indukována elektromotorická síla, která je úměrná rychlosti vibrací. [12] [13] [14]



Obr. 8 - Principiální uspořádání absolutního elektrodynamického snímače rychlosti kmitavého pohybu

Takto vyobrazený snímač lze při vhodném nastavení tlumení použít pro měření při frekvenčním rozsahu od 5-10Hz do cca 3,5 kHz. Elektrodynamické snímače mají řadu výhod, nicméně jsou zastíněny převahou nevýhod, které způsobují řadu nejistot při měření. Mezi hlavní patří omezení frekvence zmíněnými 3,5 kHz nebo citlivost na okolní magnetická pole v blízkosti snímače. Hlavně z těchto důvodů se tento typ snímačů dnes téměř nepoužívá a je nahrazen akcelerometry, tedy snímači zrychlení, které se integrací převádí na rychlost. [12] [13] [14]

3.3 Snímače zrychlení

Se snímači zrychlení se lze setkat nejen ve vibrodiagnostice, ale i v běžném životě, především pod pojmem akcelerometry. Především z hlediska jejich konstrukce a tím i danému zpracování signálu se dnes jedná o nejčastěji používané snímače vibrací ve vibrodiagnostice. Většinou je ke snímání pohybu seismické hmoty využíváno piezoelektrického jevu, kde pak mluvíme o absolutním snímači kmitání, a to piezoelektrickém, popř. piezorezistivním akcelometru.

Piezoelektrické akcelerometry jsou dnes nejčastěji používanými absolutními snímači vibrací. Zjednodušeně ke své funkci využívají principu piezoelektrického jevu, kde

při deformaci samotného piezokrystalu vznikne elektrický signál, který je úměrný zrychlení. Takové akcelerometry se vyznačují svojí malou hmotností, malými rozměry, vysokou citlivostí a vysokou vlastní frekvencí až do cca 40 kHz.

Druhou možností je využití piezorezistivního snímače. Takové snímače jsou založeny na piezorezistivním jevu, tedy změně rezistivity piezorezistivního elementu uvnitř snímače při namáhání ohybem, a většinou slouží jako dlouhodobé snímače amplitudy zrychlení. Mají široký frekvenční a dynamický rozsah. Na rozdíl od piezoelektrických snímačů jsou však teplotně závislé.

V praxi se můžeme ale často setkat i s kapacitními akcelerometry. Ty jsou založeny na principu měření kmitání soustavy pomocí změny kapacit pohyblivých elektrod vůči pevným elektrodám. V praxi to funguje tak, že při prezenci vibrací se kapacita jednoho kondenzátoru zvyšuje a zároveň se kapacita druhého kondenzátoru snižuje. Následně je vyhodnocován právě rozdíl těchto dvou kapacit. Kapacitní snímače se vyznačují vysokou citlivostí, přesností a malými rozměry. Nevýhodou zůstává teplotní závislost a v neposlední řadě, v porovnání s piezoelektrickými snímači, především cena. [12] [13]

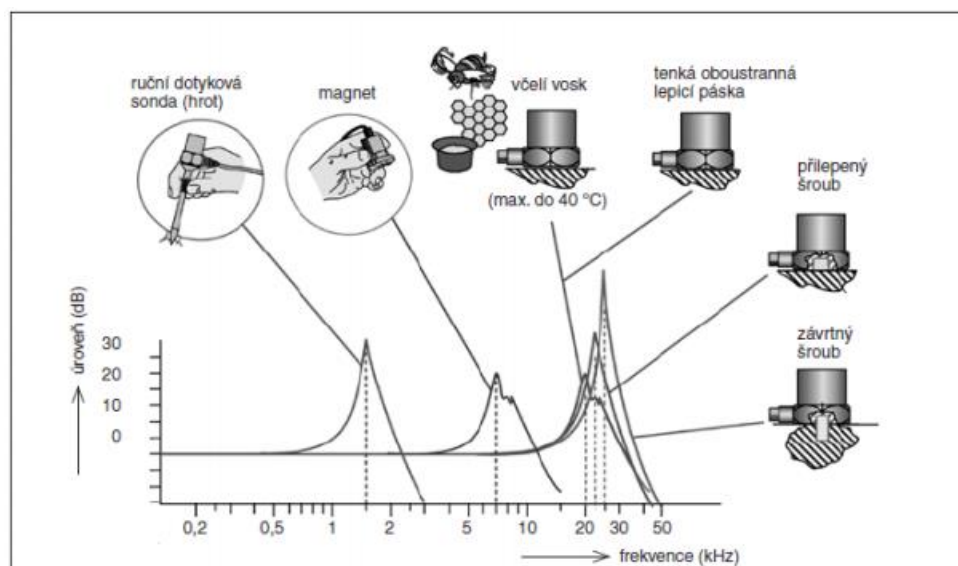
3.4 Možnosti uchycení snímačů k měřenému zařízení

Mimo volby správného typu snímače je také důležité vyřešit uchycení samotného snímače ke sledovanému objektu. Uchycení snímače k měřenému zařízení je jednou z významnějších problémových oblastí, protože může ovlivnit vlastnosti snímače, zejména frekvenční rozsah, ve kterém je možné vibrace měřit. Špatně zvolený způsob uchycení snímače pak může způsobit další nejistoty při měření. Vliv zvoleného způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou-frekvenční charakteristiku popisuje Obr. 9.

Možností samotného uchycení je několik. Asi nejlepším řešením, kde dochází k minimálnímu ovlivnění frekvenční charakteristiky a maximálnímu využití měřitelného frekvenčního rozsahu je upevnění snímačů na zařízení skrze závrtné šrouby, ideálně s pomocí tenké vrstvy vazelíny v místě kontaktu. Dobrých vlastností lze dosáhnout také při použití speciálních lepidel nebo včelího vosku, ale je nutné najít ideální poměr adheze, kdy je snímač spolehlivě a pevně přichycen ke sledovanému objektu, ale zároveň je možné ho odejmout bez utrpění nevratného poškození na samotném snímači či měřeném povrchu.

Mezi méně vhodná řešení z hlediska ovlivnění frekvenční charakteristiky a frekvenčního rozsahu patří uchycení pomocí magnetu nebo ruční snímač s hrotem. Ovšem i

tyto způsoby uchycení mají své uplatnění. Ruční sonda s akcelerometrem na jejím konci je poměrně rychlá metoda změření vibrací a to i na těžce dostupných místech, nicméně je třeba brát ohled na větší pravděpodobnost výskytu nejistot během měření. Magnetické uchycení snímače je vhodné zejména při hledání vhodného měřicího místa, díky své snadné montáži, resp. demontáži, popř. pokud je žádoucí provést více měření v krátkém časovém intervalu.



Obr. 9 - Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku (cítováno: zdroj [15])

4 Použité stroje a zařízení

Následující 2 kapitoly obsahují základní popis strojů a zařízení, které byly nezbytné pro uskutečnění vlastního experimentu měření vibrací. Kompletní výčet všech použitých strojů a zařízení pro praktickou část práce je pak obsažen v Tabulce 2 (str. 30).

4.1 Obráběcí CNC zařízení Optotech MCG 100

Všechna měření vibrací probíhala na obráběcím stroji MCG 100 CNC od firmy OPTOTECH. Značení CNC je zkratkou pro „Computer Numeric Control“, v překladu se jedná o stroj plně řízený počítačem. Obdobný stroj, na kterém probíhala měření, můžeme vidět na Obr. 10. Jeho základna je vyrobena z litiny, zajišťující vysokou stabilitu celého stroje. Díky multifunkčnímu konceptu hřídele je tento stroj vhodný nejen k broušení sférických a asférických ploch, ale také k broušení hranolů a jiných složitých tvarů. Další výhodou je vysoká flexibilita, zajištěná možností pohybu až v 5 CNC osách a inovativním konceptem samotného nástroje. Stroj zvládne opracovat výrobky s průměrem 10 – 200 mm a rádiusem od 5 mm, nicméně reálně se hodnota pohybuje okolo 13 mm. Maximální otáčky nástroje jsou $6\,000\text{ min}^{-1}$ [16]



Obr. 10 - OPTOTECH MC 100 CNC [16]

4.2 Měřicí zařízení VibXpert II

VibXpert II je měřicí zařízení od firmy Prüftechnik. Jedná se o takzvané „all in one“ měřicí zařízení, které disponuje mnoha funkcemi z oblasti sběru dat, jejich analýzy a následné interpretace. Pro naše potřeby měření byla nejdůležitější podpora dvoukanálového měření a dále funkce dlouhého časového záznamu měření zrychlení vibrací, jehož délka byla v závislosti na nastavení vzorkovací frekvence omezena pouze velikostí paměťové karty. V neposlední řadě je nutná možnost exportu dat, kde lze použít oficiální software pro práci s daty Omnitrend, ale pro naše účely byla zvolena méně komfortní, nicméně bezplatná utilita VibXpert Utility. Výhodou popisovaného měřicího zařízení jsou také jeho rozměry, snadné ovládání a dlouhá výdrž baterie, která dle osobní zkušenosti vydrží zhruba 5 hodin nepřetržitého dvoukanálového záznamu dat. Jednokanálově pak lze měřit i za stálého nabíjení. Je tak možné provést poměrně různorodá měření v krátkém časovém intervalu po sobě. VibXpert II můžeme vidět na Obr. 11.



Obr. 11 - Měřicí zařízení VibXpert II [17]

4.2.1 Snímač VIB 6.142

K vlastnímu měření byla použita sada dvou snímačů vibrací typu VIB 6.142 od výrobce Prüftechnik. Jedná se o piezoelektrické akcelerometry s frekvenčním rozsahem až 20 kHz a s integrovaným zesilovačem. Namontovány na zkoumané zařízení byly pomocí magnetů. Zmíněný snímač lze vidět na Obr. 12, jeho specifikace pak v Tabulce 1.



Obr. 12 - Akcelerometr VIB 6.142 s přišroubovaným magnetickým uchycením

Tabulka 1 - Obecné parametry snímače VIB 6.142

Obecné parametry snímače	
Snímač:	Akcelerometr VIB 6.142
Parametry snímače	
Typ snímače:	Piezelektrický akcelerometr
Maximálně rozsah:	$< 961 \text{ m/s}^2$ (98g)
Rezonanční frekvence:	36 kHz
Teplotní rozsah:	-30°C ... +100°C
"Transverse" citlivost	$< 5\%$ při 10 kHz
Materiál:	Nerezová ocel
Ochrana:	IP65 (s připnutým kabelem)
Váha:	cca 40g

5 Vlastní experiment

Vlastní experiment probíhal v Regionálním centru optiky a optoelektronických systémů v Turnově [18] s cílem charakterizovat vibrace obráběcího CNC stroje MCG 100 od firmy Optotech a finálně porovnat vzájemnou korelaci naměřených vibrací s poškozením vzniklým na povrchu obrobku po procesu obrábění. Experiment sestával z několika dílčích úkonů, které zahrnovaly zprovoznění měřicího zařízení VibXpert II a ovládnutí jeho základních funkcí a principů. Dále navazovala testovací měření z důvodu synchronizace snímačů s měřicím zařízením a otestování jejich funkčnosti a v neposlední řadě jednotlivá dvoukanálová měření na konkrétním CNC stroji Optotech MCG100, dále popsána níže. Jako typ měření zrychlení vibrací bylo vybráno dlouhodobé měření časového signálu se vzorkovací frekvencí 32 768 Hz ve dvou kanálech, resp. osách X a Y, nicméně samotné rozdíly v obou osách byly minimální. Výčet použitých strojů a zařízení k praktické části popisuje Tabulka 2.

Tabulka 2 - Seznam použitých strojů a zařízení

Výrobce	Označení	Funkce
Optotech	MCG 100 CNC	Broušení
Optotech	SPO 80	Leštění
Luphos	LUPHOScan	Profilometr
Zygo	NewView 7200	WLI + zpracování dat
Prüftechnik	VibXpert II	Měření vibrací

5.1 Měření na nástrojovém vřetenu

Úvodním krokem do praktické části bylo měření zrychlení vibrací se snímači uchycenými na nástrojovém vřetenu tak, jak to zachycuje Obr. 13. Parametry nastavení CNC stroje při měření pak popisuje Tabulka 3. Vibrace, konkrétně zrychlení vibrací, bylo pak měřeno ve třech stejných cyklech po sobě, kdy každý cyklus zahrnoval pohyb nástrojového vřetena v ose Y z jeho mezní souřadnice -125 mm do středu 0 mm a zpět do mezní pozice -125 mm.



Obr. 13 - Uchycení snímačů na nástrojovém vřetenu

Nejdříve bylo realizováno měření bez rotace nástroje a dále identické měření s rotací nástroje. Souhrn parametrů nastavení stroje a nastavení použitých měřicích zařízení popisuje Tabulka 3.

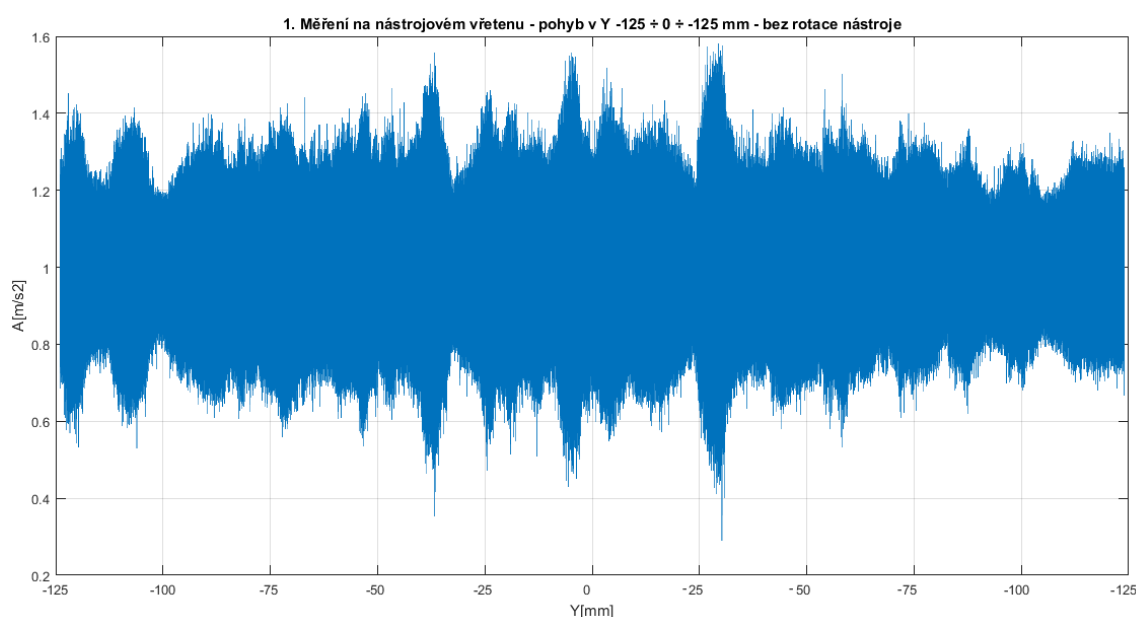
Tabulka 3 - Nastavení parametrů obráběcího stroje, obráběcího procesu a měřicího procesu

	BEZ ROTACE NÁSTROJE	S ROTACÍ NÁSTROJE
Obráběcí stroj:	OPTOTECH MCG 100 CNC	OPTOTECH MCG 100 CNC
Nástroj:	Obráběcí kolo	Obráběcí kolo
Nastavení nástroje		
Průměr nástroje:	100 mm	100 mm
Šířka nástroje:	12 mm	12 mm
Hrubost diamantu:	D10	D10
Koncentrace:	C50	C50
Nastavení procesu		
Souřadnice X	0 mm	0 mm
Souřadnice Y	-125 ÷ 0 ÷ -125 mm	-125 ÷ 0 ÷ -125 mm
Souřadnice Z	414,5 mm	414,5 mm
Rotace nástroje	0 ot./min	4000 ot./min
Nastavení měření		
Počet měření	3	3
Měřicí zařízení	VibXpert II	VibXpert II
Snímače	2x akcelerometr VIB 6.142	2x akcelerometr VIB 6.142
Vzorkovací frekvence	32 768 Hz	32 768 Hz

5.1.1 Měření bez rotace nástroje

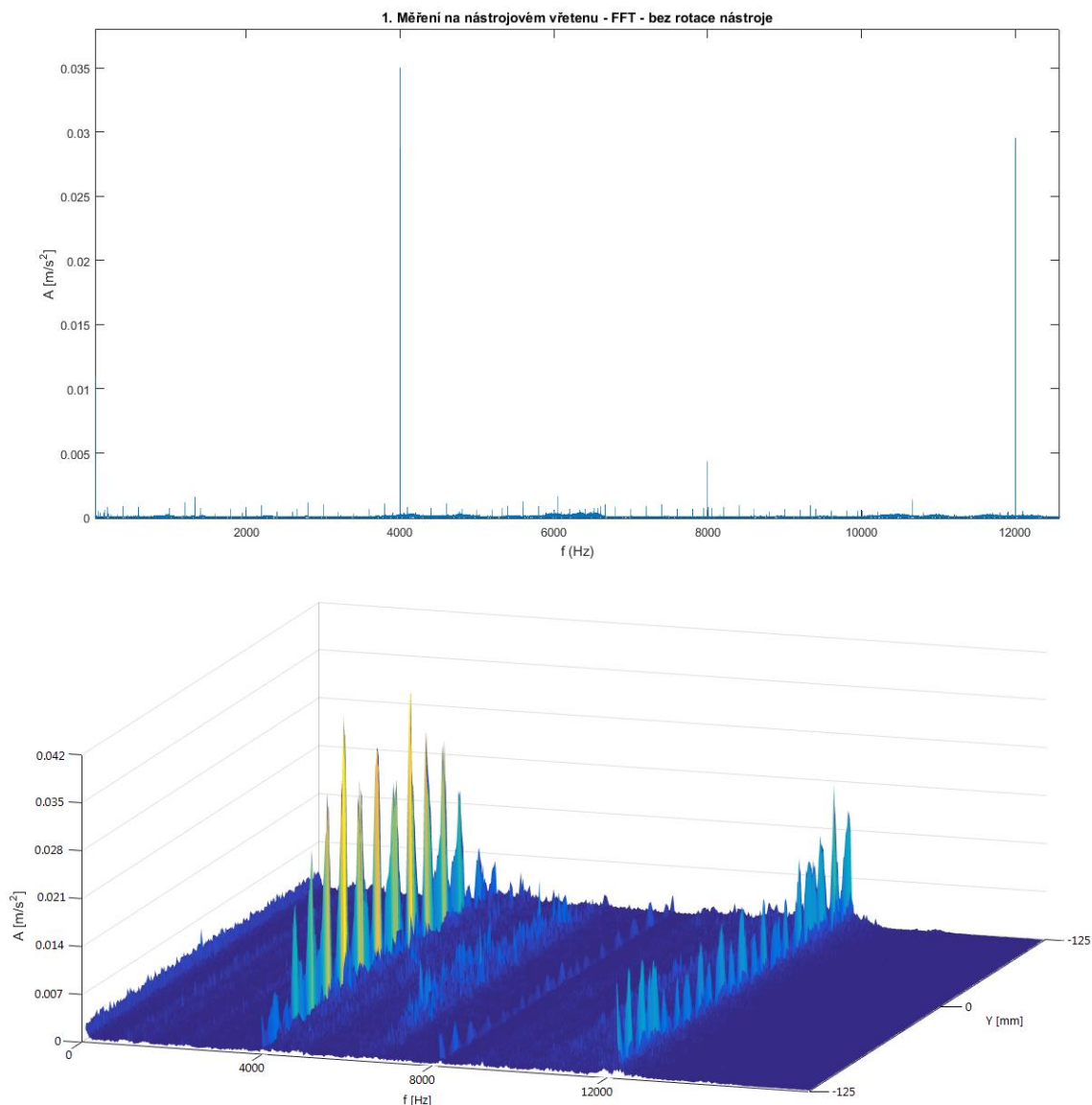
Úvodním krokem do měření bylo měření posuvu v ose Y bez rotace nástroje. Při porovnání naměřených dat s upnutým nástrojem bez jeho rotace a s naměřenými daty bez upnutého nástroje nedošlo k žádné viditelné divergenci dat a můžeme tak prohlásit, že se systém chová stejně a samotné připnutí nástroje má na chování stroje v rámci změny vibračního chování minimální či dokonce žádný vliv.

Dále bylo nutné vyřešit referencování dat, tedy synchronizaci časové osy signálu s pozicí nástrojového vřetena. Jinými slovy je žádoucí vědět, v jaké konkrétní pozici bylo nástrojové vřeteno při nějakém konkrétním čase. Tento problém byl vyřešen pomocí přidání jednotlivých časových mezičasu vždy při startu měření, v obou krajních hodnotách intervalu osy Y a při ukončení měření. Výsledek měření, resp. závislost amplitudy zrychlení vibrací na pozici nástrojového vřetena popisuje Obr. 14.



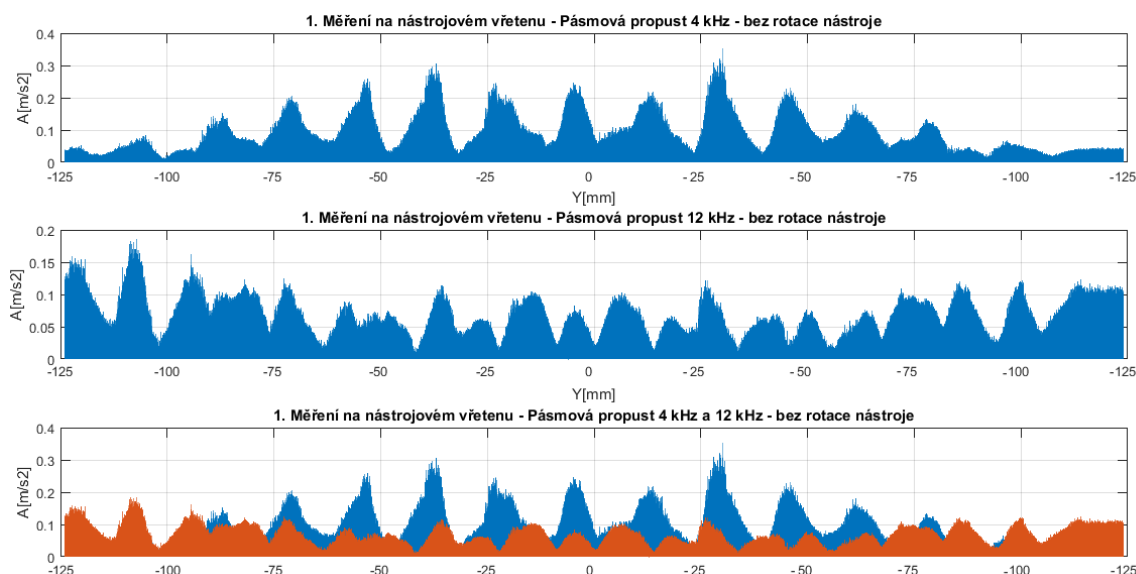
Obr. 14 - Časový záznam měření na nástrojovém vřetenu - bez rotace nástroje

Na výše uvedeném obrázku můžeme vidět záznam časového signálu měření zrychlení vibrací o délce téměř 6 minut, kde čas byl již přepočten na polohu nástrojového vřetena v ose Y. Na takto naměřená data byla dále aplikována Rychlá Fourierova transformace (FFT). Výsledek lze vidět na Obr. 15, kde vrchní obrázek reprezentuje Fourierovu transformaci a spodní obrázek pak vývoj frekvenčního spektra vzhledem k pozici nástrojového vřetena v ose Y.



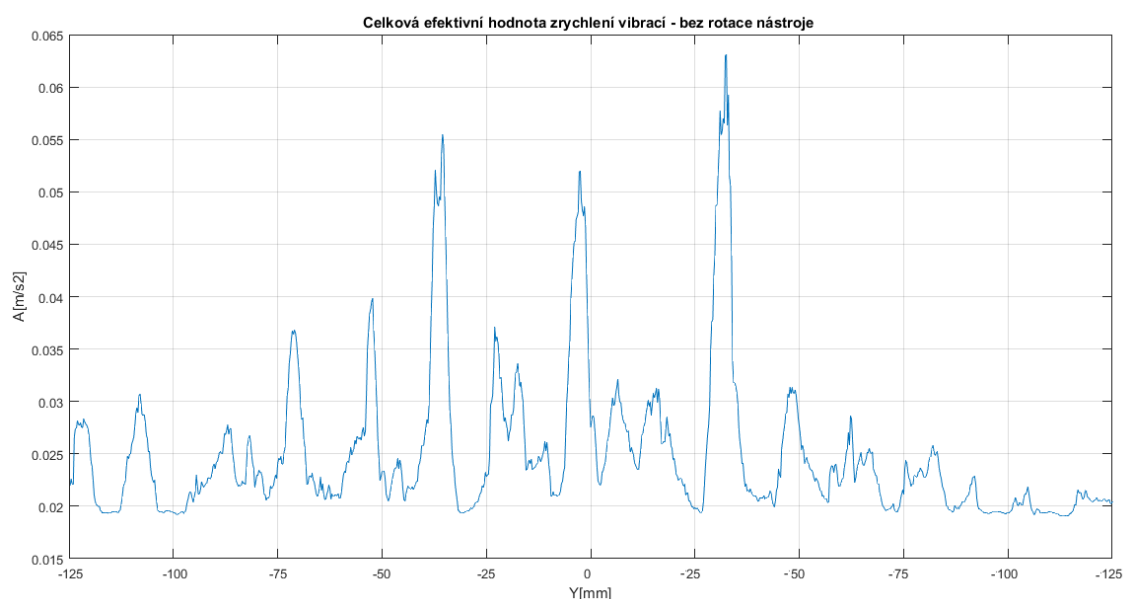
Obr. 15 - Rychlá Fourierova transformace aplikována na časový záznam měření nástrojového vřetena bez rotace nástroje, 2D zobrazení (nahore), 3D zobrazení v závislosti na pozici vřetena (dole)

Z aplikace Rychlé Fourierovy Transformace lze vcelku jasně usoudit dominující frekvence vibrací, konkrétně tedy 4 kHz a 12 kHz. Tyto frekvence jsou dominantní ve smyslu změny jejich amplitudy v závislosti na pozici nástrojového vřetena (Obr. 15 - dole) a zřejmě odpovídají jmenovité spínací frekvenci měniče nástrojového vřetena. Pokud na naměřená data aplikujeme filtr, resp. pásmovou propust v těsném okolí 4 kHz a 12 kHz, získáme charakteristiku chování vibrací ve frekvencích, které jsou z celého měření nejvíce dominantní. Výsledky obou pásmových propustí zobrazuje Obr. 16.



Obr. 16 - Pásmová propust – 4 kHz (horní), 12 kHz (uprostřed), porovnání 4kHz - modrá a 12 kHz – oranžová (spodní)

Dále bylo třeba zjistit celkovou efektivní hodnotu zrychlení vibrací, resp. charakter všech frekvencí zrychlení vibrací po odečtení stejnosměrné složky. Výsledek pro měření bez rotace nástroje zachycuje Obr. 17.

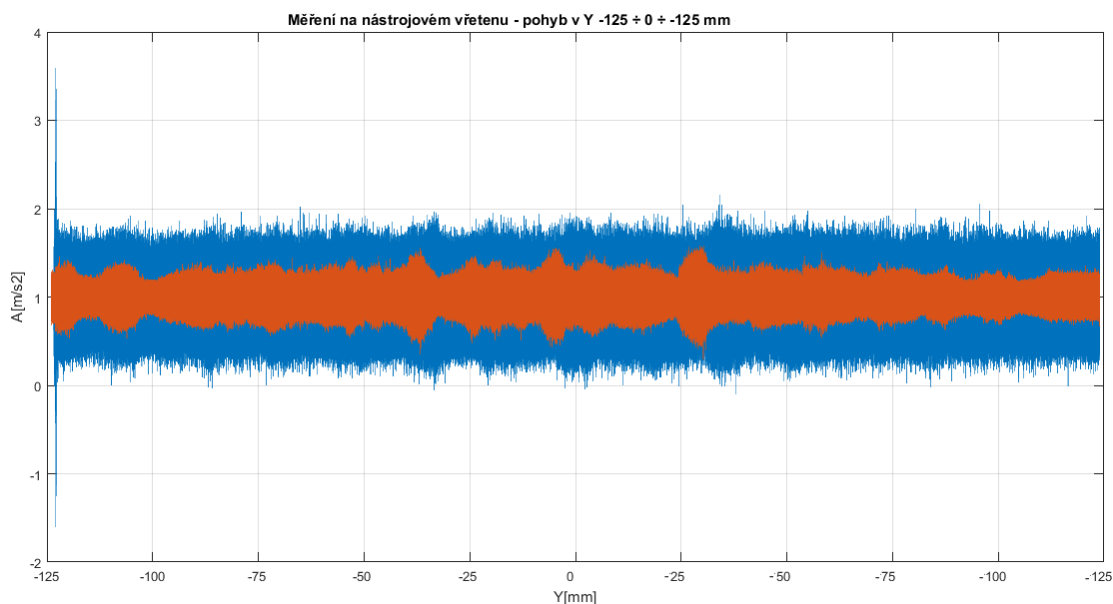


Obr. 17 - Celková efektivní hodnota zrychlení vibrací (Charakter všech frekvenčních složek vibrací bez stejnosměrné složky) - bez rotace nástroje

Z výše uvedeného zpracování dat je jasné patrné, že vibrace v rámci celého procesu nejsou konstantní a mění svoji amplitudu v závislosti na čase procesu, respektive na pozici nástrojového větenu v ose Y. Frekvence, ve kterých je toto chování jednoznačně patrné (viz Obr. 15), jsou pak 4 kHz a 12 kHz.

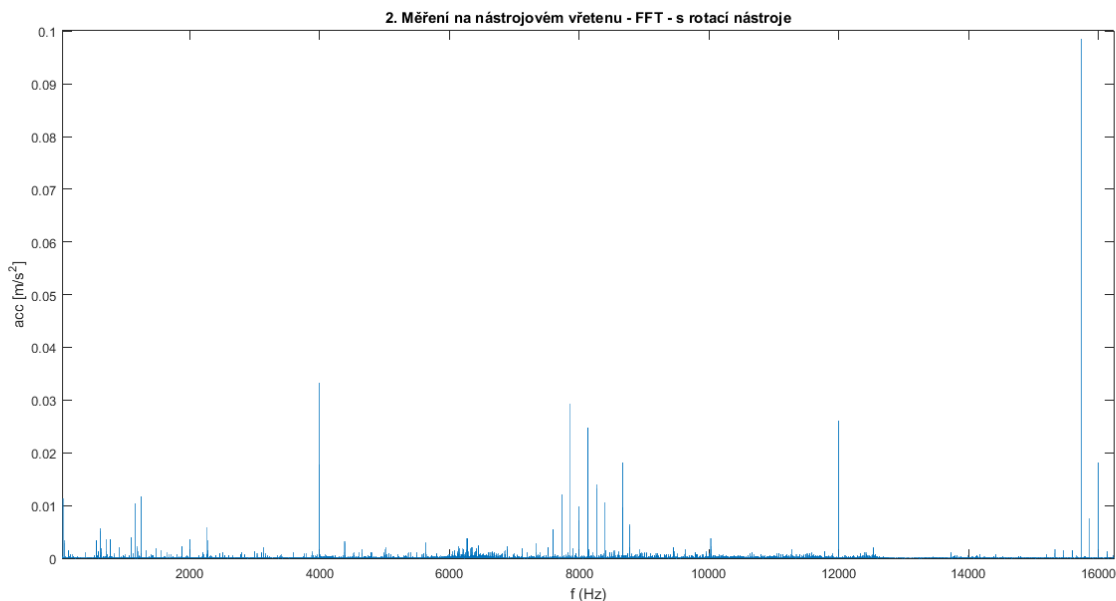
5.1.2 Měření s rotací nástroje

Druhým krokem bylo téměř identické měření jako v předchozím bodě, nicméně nyní již s rotací upnutého nástroje. Rychlost rotace nástroje byla nastavena na 4000 ot./min, ostatní parametry procesu jsou popsány výše, v Tabulce 3. Na následujícím Obr. 18 lze vidět porovnání časového záznamu z měření amplitudy zrychlení vibrací při měření bez rotace nástroje a při měření s rotací nástroje.



Obr. 18 - Porovnání časového záznamu naměřených dat bez rotace nástroje (oranžová) a s rotací nástroje (modrá)

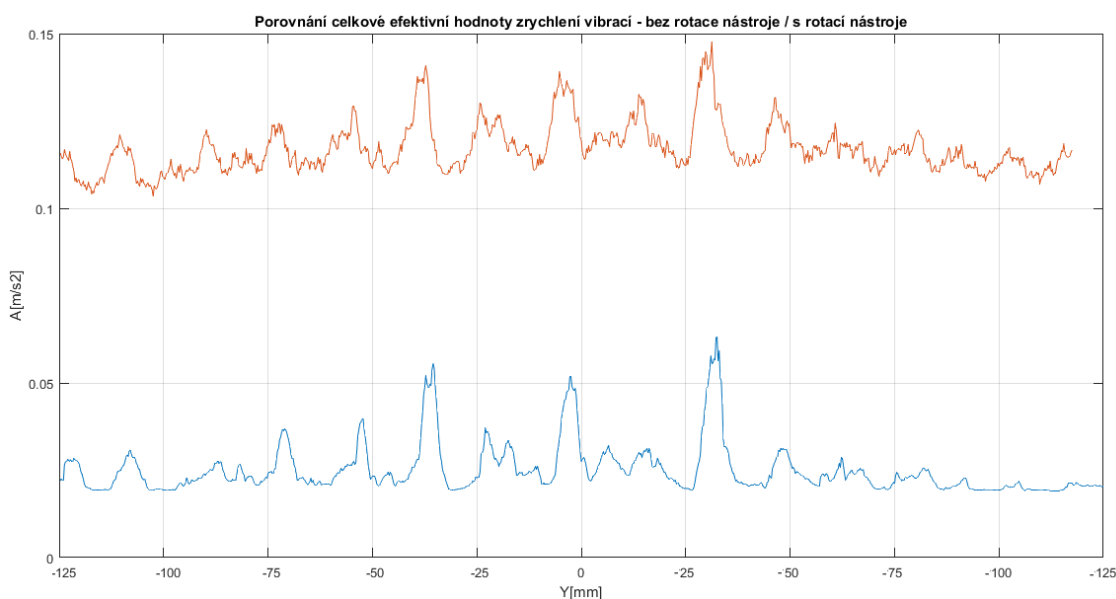
Jak již popis ek obrázku napovídá, modrá barva zachycuje měření s rotací nástroje, kde na úplném začátku je jasně zřetelný pulsní nárůst amplitudy, což je důsledek přechodu nástroje z klidové polohy do polohy otáčení. Taktéž lze odhadnout, že amplituda naměřených vibrací s rotací nástroje je přibližně dvakrát vyšší, než je tomu u měření bez rotace nástroje. Pro zjištění dominantních frekvencí byla na nově prezentovaná data (s rotací nástroje) opět aplikována Rychlá Fourierova Transformace (FFT) (Obr. 19).



Obr. 19 - Rychlá Fourierova Transformace aplikována na časový záznam měření nástrojového vřetena s rotací nástroje

Na výše zobrazeném FFT signálu je patrné, že se zde jako dominantní frekvence opět promítají násobky 4 kHz, tedy 4 kHz, 12 kHz a s jistými zákmity i zhruba 1 kHz, 8 kHz a 15,7 kHz. Nejvíce zde však amplitudu v závislosti na pozici nástrojového vřetena mění opět frekvence 4 kHz a 12 kHz stejně, jako v případě bez rotace nástroje.

Dále, obdobně jako pro měření bez rotace nástroje, je třeba zjistit celkovou efektivní hodnotu naměřených vibrací. Výsledné porovnání pro měření bez rotace a s rotací je znázorněno na Obr. 20.

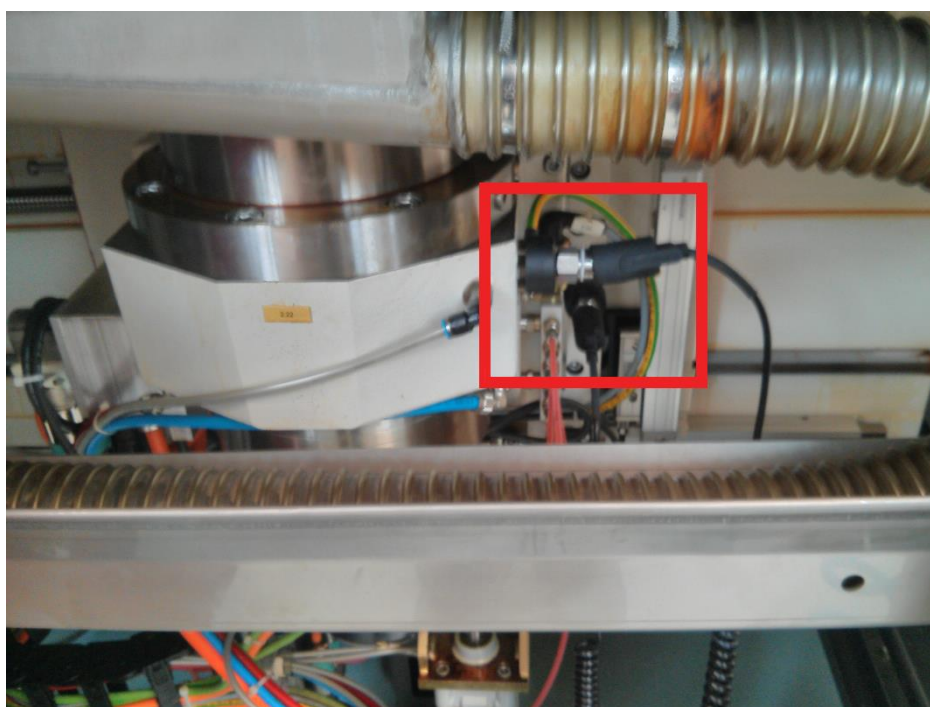


Obr. 20 - Porovnání celkové efektivní hodnoty zrychlení vibrací pro data bez rotace nástroje (modrá) a s rotací nástroje (oranžová)

Z porovnání celkových efektivních hodnot lze usoudit, že naměřené hodnoty pro měření s rotací nástroje a bez jeho rotace nejsou konstantní a dochází zde k určitým výkyvům v amplitudě vibrací během celého procesu. Také mají velmi podobný charakter, přičemž amplituda vibrací pro měření s rotací nástroje dosahuje dvakrát až třikrát větších hodnot než hodnoty naměřené bez rotace nástroje. Ve zkratce lze říci, že rotace nástroje má znatelný vliv na amplitudu vibrací, ale naopak nijak významně neovlivňuje samotný charakter vibrací, resp. jejich výkyvy.

5.2 Měření na obrobkovém vřetenu

Dalším krokem bylo měření zrychlení vibrací, nyní již na obrobkovém vřetenu, při procesu obrábění rovinného vzorku kruhového tvaru o průměru 100 mm, ovšem bez kontaktu s plochou obrobku. Měření opět probíhalo ve třech stejných cyklech, kdy každý cyklus zahrnoval kompletní obráběcí proces roviny o délce přibližně 16 minut. Samotné měření bylo také realizováno dvoukanálově a umístění snímačů lze vidět vyznačené na Obr. 21.



Obr. 21 - Umístění snímačů na obrobkovém vřetenu

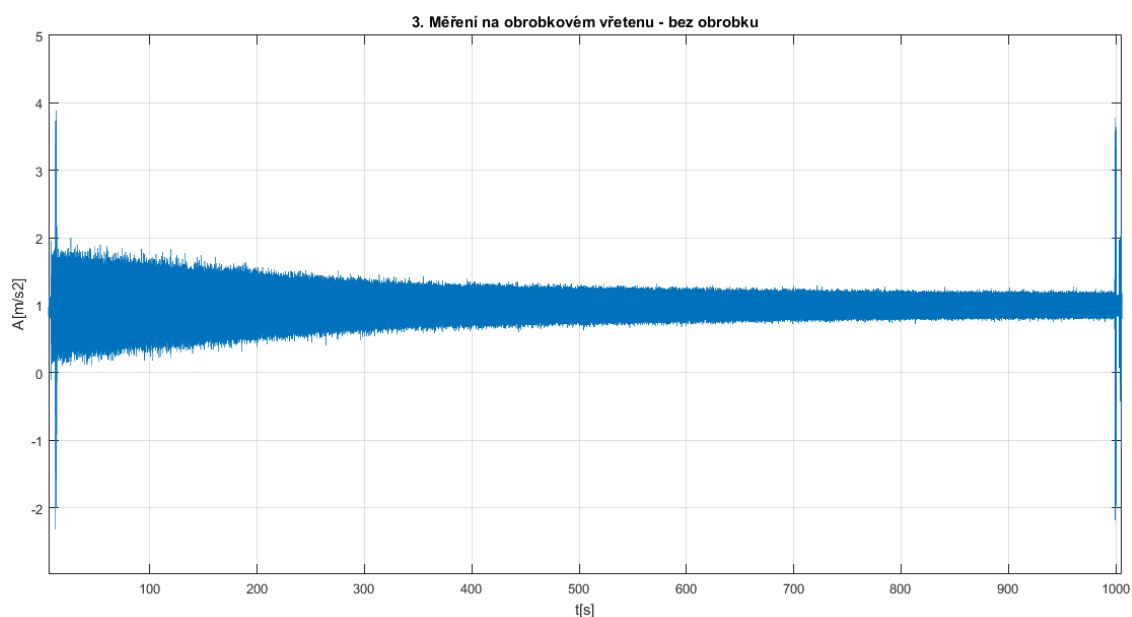
Měření probíhalo nejdříve bez upnutého obrobku do obrobkového vřetena a následně již s upnutým obrobkem do vřetena, nicméně stále bez kontaktu nástroje s povrchem obrobku. Parametry nastavení obráběcího a měřicího procesu pak zachycuje Tabulka 4.

Tabulka 4 - Parametry nastavení obráběcího a měřicího procesu při měření na obrobkovém vřetenu

	BEZ UPNUTÉHO OBROBKU	S UPNUTÝM OBROBKEM
Obráběcí stroj:	OPTOTECH MCG 100 CNC	OPTOTECH MCG 100 CNC
Nástroj:	Obráběcí kolo	Obráběcí kolo
Nastavení nástroje		
Průměr nástroje:	100 mm	100 mm
Šířka nástroje:	12 mm	12 mm
Hrúbost diamantu:	D10	D10
Koncentrace:	C50	C50
Nastavení procesu		
Proces:	Obrábění rovinného vzorku	Obrábění rovinného vzorku
Průměr vzorku:	100 mm	100 mm
Otáčky vřetena:	450 ÷ 50 ot./min	450 ÷ 50 ot./min
Upnutý obrobek:	NE	ANO
Nastavení měření		
Počet měření	3	3
Měřicí zařízení	VibXpert II	VibXpert II
Snímače	2x akcelerometr VIB 6.142	2x akcelerometr VIB 6.142
Vzorkovací frekvence	32 768 Hz	32 768 Hz

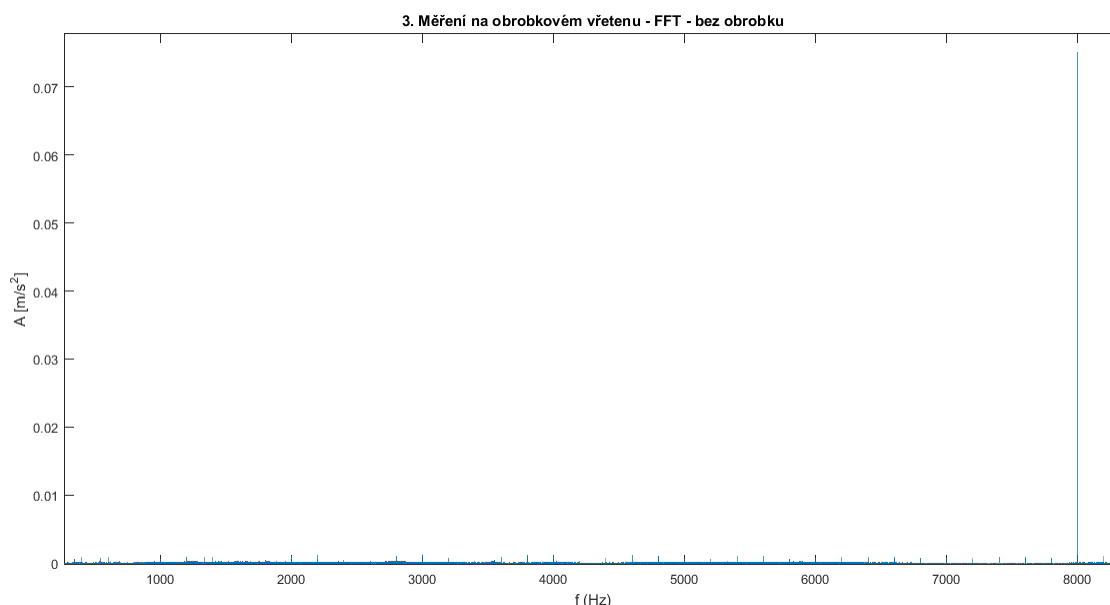
5.2.1 Měření při obráběcím procesu bez obrobku

Jak již bylo zmíněno, měření nejprve probíhalo bez upnutého obrobku v obrobkovém vřetenu a to ve třech, přibližně 16-ti minutových cyklech. Naměřená data zrychlení vibrací v časové oblasti během obráběcího procesu zobrazuje Obr. 22.



Obr. 22 - Časový záznam signálu pro měření obráběcího procesu roviny 100mm - bez obrobku

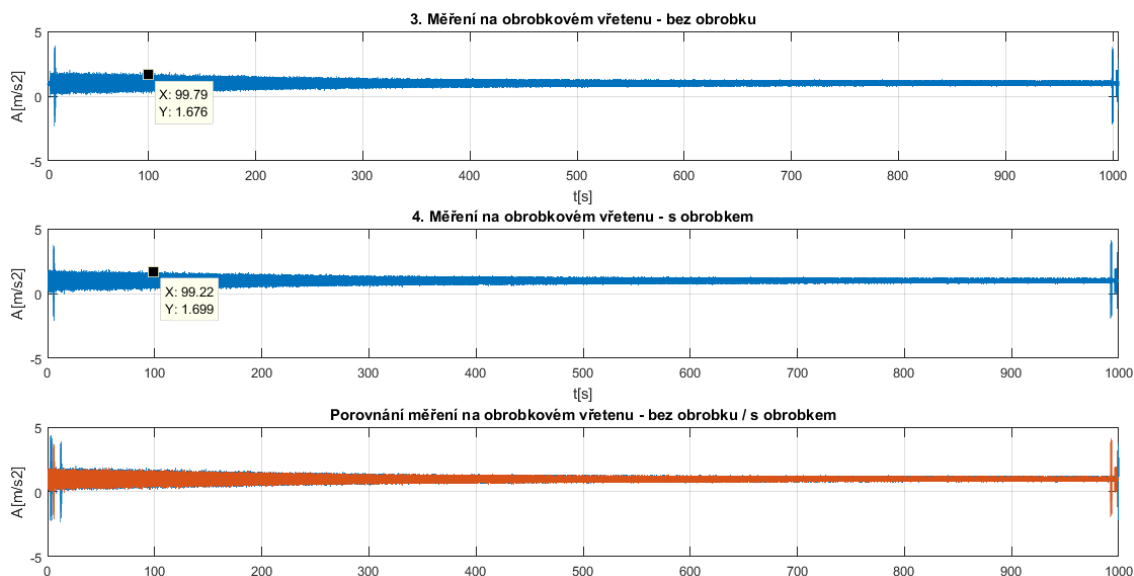
Na výše uvedeném obrázku je zřetelně vidět pulsní nárůst amplitudy na začátku signálu, což přímo odpovídá začátku procesu, potažmo startu otáčení vřetena a analogicky i na úplném konci signálu pulsní nárůst amplitudy značí konec obráběcího procesu, resp. uvedení vřetena z otáčivé do klidové polohy. Dle popisu obráběcího procesu, uvedeného výše, v Tabulce 4, kdy otáčky obrobkového vřetena byly nastaveny tak, aby s postupem času nelineárně klesaly z maximální hodnoty 450 ot./min na minimální hodnotu 50 ot./min lze také jednoznačně pozorovat vztah mezi velikostí otáček obrobkového vřetena a amplitudou zrychlení vibrací. Konkrétně lze říci, že s klesajícími otáčkami klesá také amplituda vibrací. Na data byla následně opět aplikována Rychlá Fourierova Transformace (FFT), jež lze vidět na následujícím Obr. 23. Dominující frekvence je zde 8 kHz.



Obr. 23 - Rychlá Fourierova transformace aplikována na časový záznam měření obrobkového vřetena bez upnutého obrobku

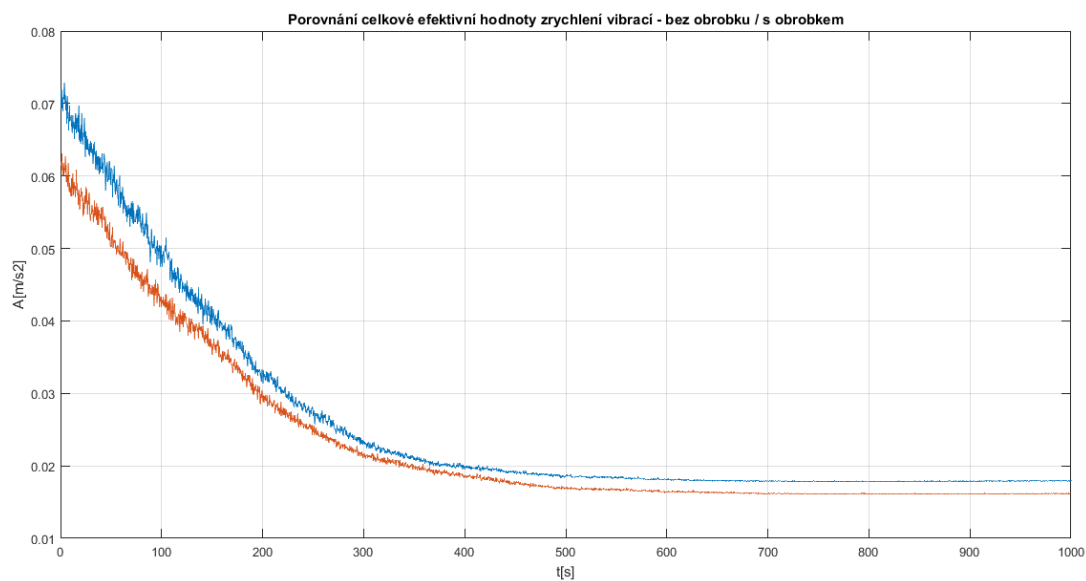
5.2.2 Měření při obráběcím procesu s obrobkem

Následovala druhá část měření na obrobkovém vřetenu, nyní již s upnutým obrobkem ve vřetenu. Proces byl nastaven identicky jako bez upnutého obrobku a z následujícího Obr. 24 lze usuzovat, že připnutí obrobku nemá na samotný proces nijak znatelný vliv.



Obr. 24 - Časový záznam měření na obrobkovém vřetenu: bez upnutého obrobku (horní), s upnutým obrobkem (uprostřed), porovnání bez obrobku a s obrobkem (spodní)

Porovnání celkových efektivních hodnot zrychlení vibrací pro měření bez upevněného obrobku a s upevněným obrobkem lze pak vidět níže, na Obr. 25.



Obr. 25 - Porovnání celkových efektivních hodnot zrychlení vibrací pro měření bez obrobku (modrá) a s obrobkem (oranžová)

Na předchozím obrázku (Obr. 25) je vidět nepatrný rozdíl mezi naměřenými hodnotami bez upevněného obrobku, které reprezentuje modrá barva a mezi naměřenými hodnotami s upevněným obrobkem, které reprezentuje barva oranžová, kdy s upevněním zátěže do obrobkového vřetena dochází k mírnému poklesu amplitudy vibrací. Také se zde potvrzuje fakt závislost růstu otáček na růst amplitudy vibrací. Pokud navíc tato data

porovnáme s měřením na nástrojovém vřetenu, je zde patrná absence výkyvů amplitudy vibrací, které v tomto případě vcelku plynule klesají.

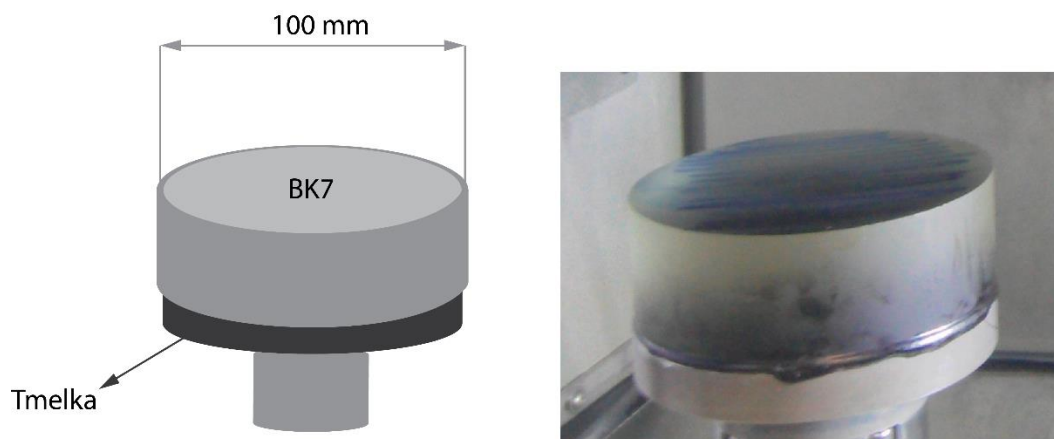
5.3 Měření při obrábění

Finálním a nejdůležitějším krokem celé praktické části bylo měření při reálném obrábění. Jako proces bylo zvoleno taktéž obrábění roviny směrem odzadu do jejího středu v několika základních krocích. Nastavení obráběcího procesu popisuje Tabulka 5.

Tabulka 5 - Nastavení reálného obráběcího procesu

Obráběcí stroj:	OPTOTECH MCG 100 CNC
Nástroj:	Obráběcí kolo
Nastavení nástroje	
Průměr nástroje:	100 mm
Šířka nástroje:	12 mm
Hrubost diamantu:	D10
Koncentrace:	C50
Nastavení procesu	
Rychlost pohybu kola po povrchu	25 m/min
Maximální rychlost nástroje	450 min ⁻¹
Minimální rychlost nástroje	50 min ⁻¹
Posunutí ke středu v 1 kroku	0,02 min/rev.
Obvodová rychlost nástroje	20 m/s
Výška odstraněného materiálu:	0,01 mm/krok

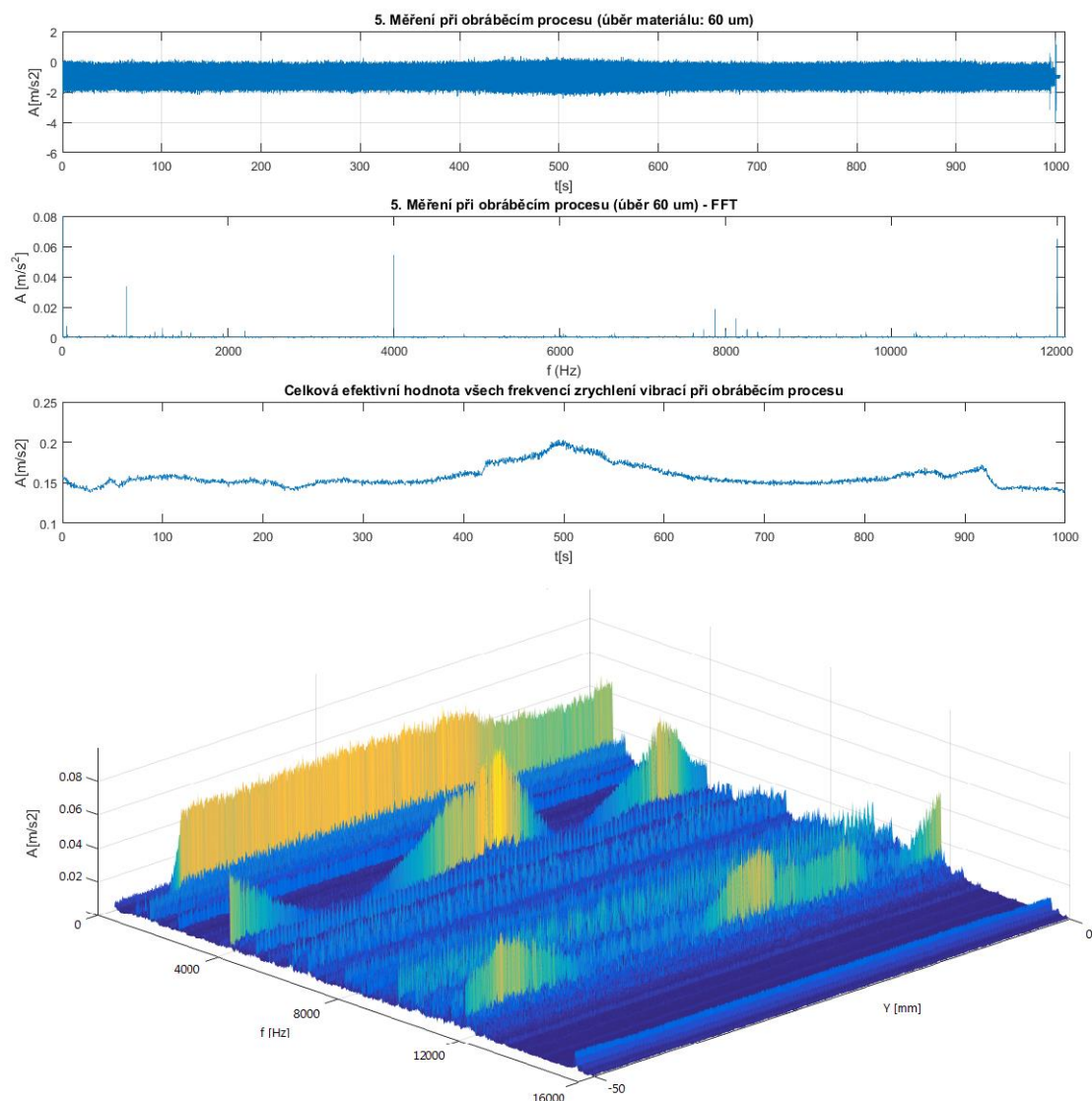
Prvním nezbytným krokem byla příprava vzorku pro samotný experiment. Tím byla rovina o průměru 100 mm z materiálu BK7. Materiál BK7 je borosilikátové sklo, které neobsahuje žádné bubliny ani příměsi a dosahuje tak dobrých optických vlastností [19]. Aby mohl být obrobek použit k obrábění, musel být dále připevněn na plochou tmelku, v našem případě byl nalepen na plochou ocelovou tmelku. Zmíněný vzorek je vyobrazen na Obr. 26.



Obr. 26 - Konkrétní vzorek z materiálu BK7 (vpravo), který byl použit pro obrábění

Dále celý proces pokračoval několika obráběcími cykly, kdy bylo nutné obráběcí nástroj nejdříve zdresovat – vyvážit a následně provést celý jeden obráběcí cyklus, který nebyl měřen a to zejména z důvodu zajištění konstantního úběru hmoty v dalším kroku. Samotná měření vibrací pak probíhala ve výšce odstraněného materiálu 30 μm a 60 μm , což při konstantním úběru materiálu 10 μm / krok vychází na třetí a šestý obráběcí cyklus.

Pokud se vrátíme k samotnému měření vibrací při procesu obrábění, tak časový záznam měření při šestém cyklu obrábění (množství odebraného materiálu 60 μm) lze vidět na vrchní části Obr. 27. Střední část prezentuje opět Rychlou Fourierovu Transformaci (FFT) a spodní část pak reprezentuje celkovou efektivní hodnotu naměřeného zrychlení vibrací (charakter všech frekvencí vibrací, bez stejnosměrné složky), nicméně již bez pulsního výkyvu vibrací na konci procesu, které by zde způsobilo zkreslení dat. Spodní 3D graf prezentuje trojrozměrný vývoj frekvenčního spektra v závislosti na pozici nástrojového vřetena.

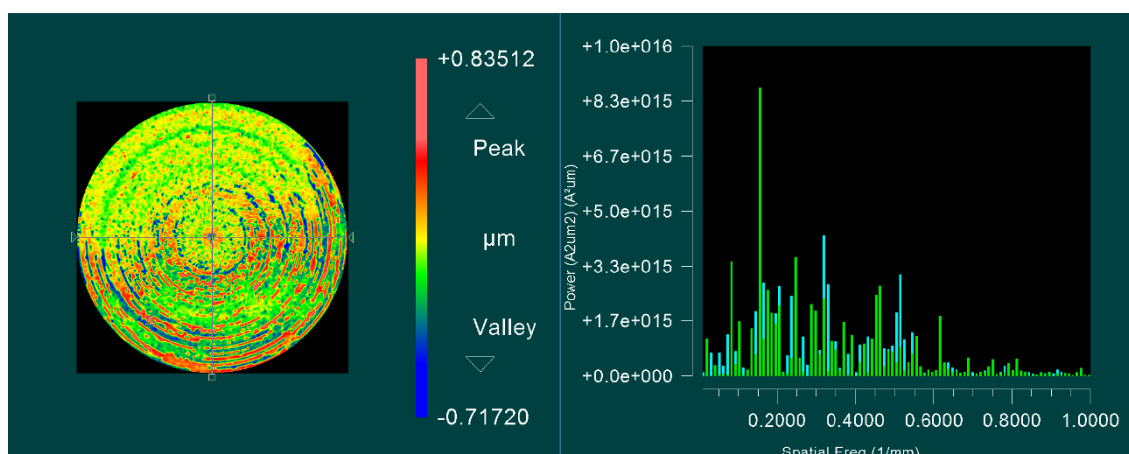


Obr. 27 - Časový záznam měření zrychlení vibrací při obráběcím procesu - úběr: 60 μm (nahore), FFT časového záznamu (uprostřed), celková efektivní hodnota všech frekvencí vibrací (dole), 3D spektrum (nejníže)

Na výše uvedeném obrázku (Obr. 27 – nahore) lze z časového signálu podle pulsního nárůstu amplitudy vibrací jednoznačně určit konec obráběcího procesu, přibližně kolem hodnoty 1000s. Poměrně zajímavý je fakt, že zde není nijak výrazně promítnut prvotní kontakt obráběcího nástroje s povrchem obrobku. Na prostředním grafu (Obr. 27) je na naměřená data (úběr: 60 μm) provedena FFT analýza, kde se kromě dominantních frekvencí 4 kHz a 12 kHz objevuje i frekvence 775 Hz, jejíž amplituda je však během procesu poměrně konstantní (viz Obr. 27 – 3D spektrum). Předposlední graf na Obr. 27 zobrazuje celkovou efektivní hodnotu všech vibrací s dominantním výkyvem kolem 500 s. Charakter proměnlivosti amplitudy během procesu pak zachycuje poslední obrázek, na kterém je názorně vidět zmíněný fakt, že frekvence s nejvyšší mírou změn v amplitudě během procesu jsou 4 kHz a 12 kHz.

6 Vyhodnocení experimentu

Po každém měřeném brousicím cyklu bylo nutné obrobek očistit a sledovat struktury vzniklé na povrchu po obráběcím cyklu. Nejprve se tedy vzorek vhodně zvoleným způsobem očistil a dále byl vizuálně sledován pod mikroskopem, kde již bylo vidět lehce patrné poškození ve formě kruhů se středem uprostřed obráběné plochy vzorku. Nutno dodat, že hodnocená plocha nebyla celých 100 mm, nýbrž cca 5 – 95 mm z důvodu odstranění problémových oblastí, jakými jsou nedoleštěný kraj vzorku a jeho středová oblast. Následovalo měření obráběné plochy na profilometru LuphoSCAN od firmy Luphos s výstupem do software MetroPro. Naměřená data z profilometru LuphoSCAN po 6. brousicím cyklu (úběr 60 μm) zachycuje následující obrázek (Obr. 28), kde levá část vyobrazuje reálný stav povrchu ve smyslu „Peak – to – Valley“ (rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem povrchu) a pravá část pak „Power spectrum“ graf.



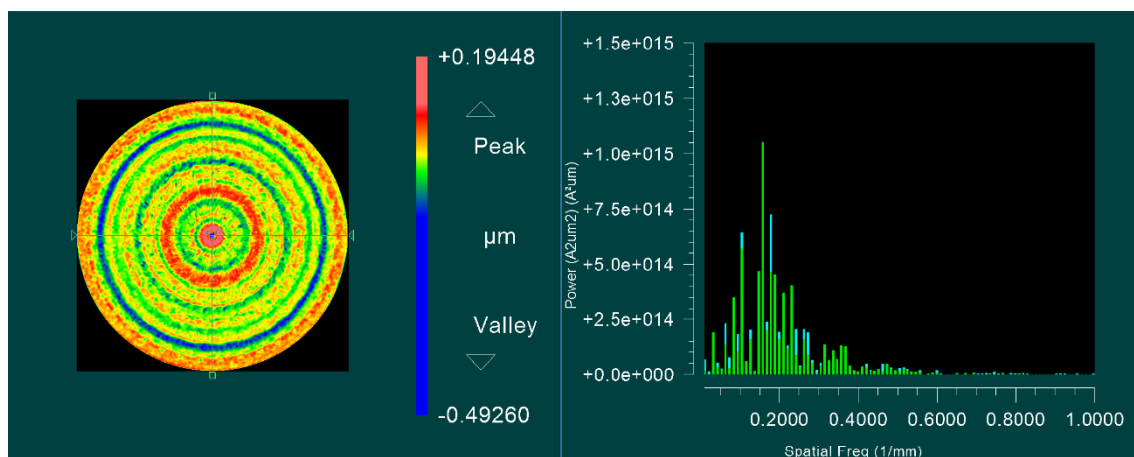
Obr. 28 - Stav povrchu po broušení (úběr materiálu: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf

Ačkoliv na levé straně není po broušení nijak extrémně patrná určitá jasná forma poškození, na pravé části obrázku můžeme vidět zastoupení celé řady prostorových frekvencí, nicméně dominantní složka se nachází na hodnotě 0.15 [1/mm], což vychází v přepočtu na prostorové frekvence na 6.66 mm periodických a s rozsahem od 1 do 10 mm tak poškození jasně spadá do kategorie středních prostorových frekvencí. Nicméně není vyloučeno možné zašumění dat při měření na bezkontaktním profilometru LuphoSCAN. Z tohoto důvodu se po každém kroku pro potvrzení ještě prováděla vizuální kontrola povrchu pod mikroskopem, jak bylo zmíněno. Nyní následovalo leštění, které proběhlo ve 2 cyklech, kdy po každém cyklu proběhlo opakovaně měření tvaru na profilometru LuphoSCAN. Nastavení leštících parametrů jednoho leštícího cyklu obsahuje Tabulka 6.

Tabulka 6 - Nastavení parametrů leštícího stroje, nástroje a samotného leštícího procesu

Obráběcí stroj:	Optotech SPO 80
Nástroj:	FEM membrána
Nastavení nástroje	
Rádus nástroje:	21 mm
Tlak:	0.2 Bar
Rychlost rotace	1350 min ⁻¹
Nastavení obrobku	
Rádus:	0 mm
Leštěný průměr:	100 mm
Nastavení procesu	
Režim:	Spiral Spindle
Typ kinematiky:	Edge to edge
Feed:	5 mm/min
Rychlost rotace:	1300 min ⁻¹
Počet přejezdů:	5
Úběr:	0.05 μm / přejezd

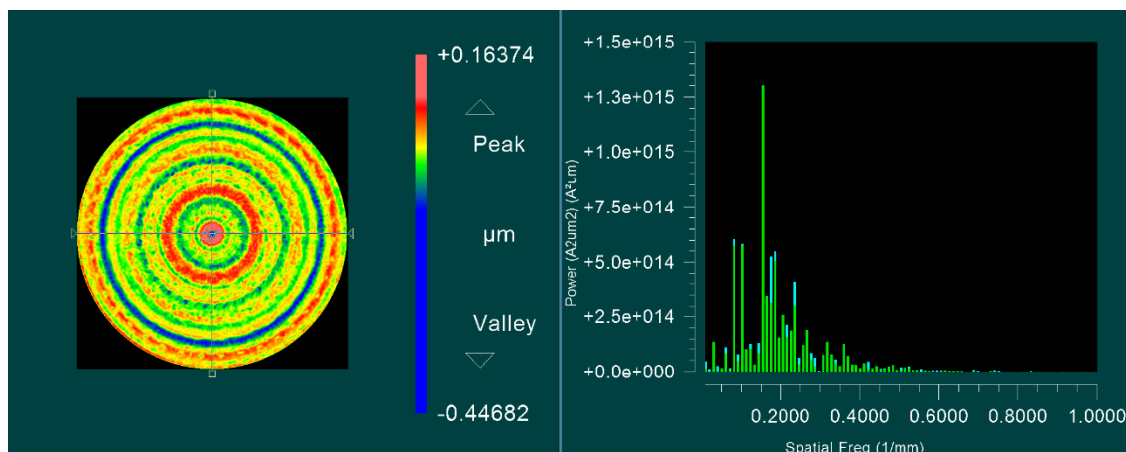
Po prvním leštícím cyklu, který trval necelých 5 minut, byl povrch obráběného vzorku opět analyzován pod mikroskopem a následně byl měřen jeho tvar opět na bezkontaktním profilometru LuphoSCAN. Výsledná data, zpracovaná v software MetroPro lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 29).



Obr. 29 - Stav povrchu po prvním cyklu leštění (úběr materiálu při předešlém broušení: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf

Oproti měření tvaru po broušení je zde vidět, že po prvním cyklu leštění se na povrchu zvýraznily charakteristické povrchové frekvence s vlnovou délkou blížíící se ke zmíněným 6.66 mm (Spatial frequency 0.15 mm⁻¹). Vzhledem k tomu, že byl pro leštění použit leštící spot s rádiusem nástroje 21 mm, lze se domnívat, že pozorované poškození vzniklo v předchozím kroku opracování, tedy při procesu broušení. Následoval druhý

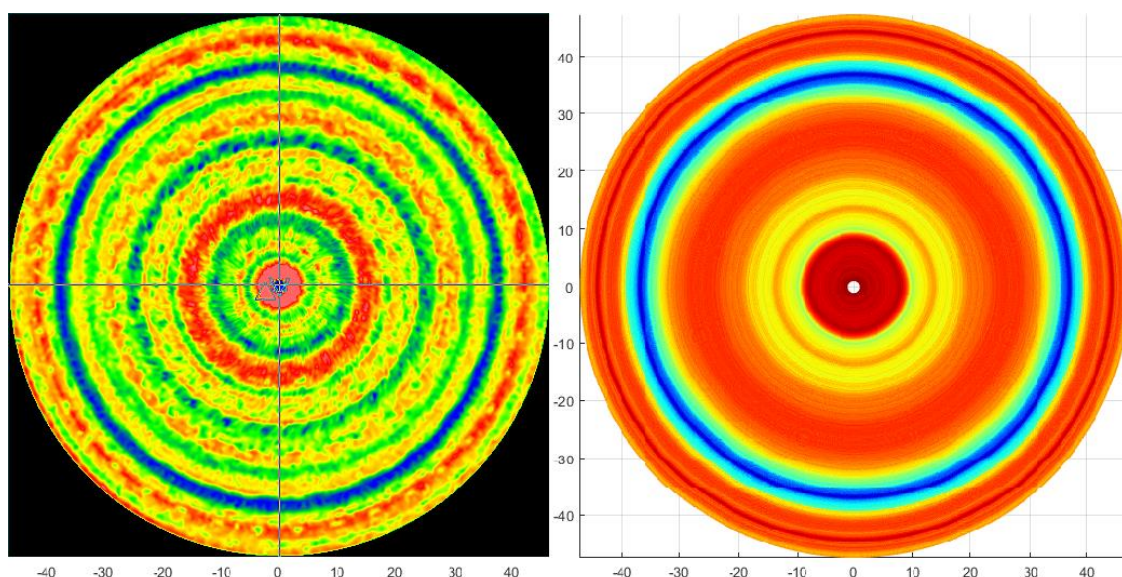
cyklus leštění, jehož nastavení procesních parametrů bylo identické, jako nastavení prvního cyklu. Po skončení druhého cyklu leštění byl povrch vzorku opět analyzován na bezkontaktním profilometru LuphoSCAN a kvůli možnému zašumění dat byla provedena i vizuální kontrola hledaných struktur pod mikroskopem. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 30.



Obr. 30 - Stav povrchu po druhém cyklu leštění (úběr materiálu při předešlém broušení: 60 μm). Vlevo stav povrchu, vpravo Power spectrum graf

Po druhém cyklu leštění je na povrchu obrázku patrný malý pokles Peak – to – Valley hodnoty o cca 0.1 μm a pravá strana přiloženého obrázku jasně vypovídá, že při druhém cyklu leštění došlo k rozvinutí sledovaného poškození s frekvencí 6.66 mm (Spatial frequency 0.15).

Pokud zmíněnou efektivní hodnotu všech frekvencí vibrací (viz Obr. 27) poté invertovanou zobrazíme ve 3D grafu, kde je ovšem nutné zohlednit parametry obráběcího procesu, tedy fakt, že se rychlost nástroje nemění lineárně, taktéž otáčky obrobkového vřetena klesají, nikoliv však lineárně, pak můžeme vytvořenou mapu vibrací porovnat s výsledky získanými z bezkontaktního profilometru po druhém leštícím cyklu, kdy se sledované struktury nejjasněji promítly na povrch. Výsledek předchozího popisu je na následujícím Obr. 31.



Obr. 31 - Porovnání mapy povrchu z bezkontaktního profilometru LuphoSCAN po druhém cyklu leštění (vlevo) a invertované mapy vibrací, které byly naměřeny při obráběcím procesu (vpravo)

Z uvedeného porovnání je vidět, že nejvýznamnější modrá koncentrická struktura na souřadnicích přibližně $[+35 \text{ mm}; +35 \text{ mm}]$ je nápadně podobná jak v případě reálného stavu povrchu měřeného bezkontaktním profilometrem (Obr. 31 vlevo), tak ve vytvořené mapě vibrací (Obr. 31 vpravo) a přímo odpovídá výkyvu v grafu celkové efektivní hodnoty (Obr. 27) v čase 500 s. Zmíněná struktura má šířku cca 3 mm, což je problematický rozměr spadající do rozsahu středních prostorových frekvencí, a to podporuje fakt, že změny ve vibračním chování daného CNC obráběcího stroje během procesu mohou způsobovat takový typ poškození.

Nicméně ani samotný fakt, že by změny v charakteru chování vibrací během procesu mohly způsobovat (a pravděpodobně způsobují) zmíněné problematické struktury na povrchu obráběného materiálu, neřeší prvotní problém se zdrojem těchto naměřených a analyzovaných vibrací, protože samotný zdroj vibrací je prvotní problém, který je třeba řešit, zejména pokud chceme pokračovat v nastoleném trendu zlepšování kvality asférických povrchů.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést měření a analýzu vibračního chování obráběcího CNC stroje MCG 100 od firmy Optotech s následným porovnáním stavu povrchu po opracování a se snahou najít korelaci mezi vzniklým poškozením na povrchu obráběného materiálu a změnami v amplitudě vibrací, přítomných během procesu. K samotnému měření bylo použito měřicí zařízení VibXpert II od firmy Prüftechnik a dva akcelerometry typu VIB 6.142. K následné analýze naměřených dat byl použit software Matlab.

Samotné měření probíhalo v 5 základních krocích, kdy byla vždy provedena alespoň 3 stejná měření z důvodu vyloučení případného výskytu nějakého nahodilého jevu a znehodnocení měření. Prvním krokem bylo měření zrychlení vibrací na nástrojovém vřetenu bez rotace připevněného nástroje, s velikostí diamantu D10 a průměrem 100 mm, při pohybu vřetena v ose Y z jeho mezní souřadnice -124 mm do pozice 0 mm a zpět do mezní pozice -124 mm. Následovalo obdobné měření, nicméně již s rotací připevněného nástroje rychlostí 4000 ot./min. Při porovnání naměřených dat byl zjištěn fakt, že rotace nástroje má vliv na amplitudu vibrací (pro měření s rotací nástroje je amplituda cca 3x vyšší), nicméně samotná rotace nástroje má jen nepatrný vliv na charakter vibrací a změny ve vibračním chování během procesu. Dále se jako dominantní frekvence, které mění svoji amplitudu v průběhu procesu, ukázaly 4 kHz a 12 kHz. Třetím krokem bylo měření na obrobkovém vřetenu bez upnutého obrobku. Jako parametr obrábění byl zvolen proces obrábění rovinného vzorku s průměrem 100 mm, kdy otáčky obrobkového vřetena nelineárně klesaly z hodnoty 450 ot./min na 50 ot./min. Další fází bylo opět obdobné měření na obrobkovém vřetenu, ale již s upevněným obrobkem do vřetena, nicméně stále bez kontaktu obráběcího nástroje s povrchem upevněného vzorku. Při porovnání naměřených dat bylo zjištěno, že samotná zátěž v podobě upevněného obrobku do vřetena má za následek mírný pokles amplitudy vibrací, která poměrně plynule, bez žádných výrazných změn, klesá a to vede na fakt, že otáčky obrobkového vřetena mají přímý vliv na amplitudu vibrací, resp. s rostoucími otáčkami vřetena roste i amplituda měřených vibrací. Pátým krokem bylo měření při reálném obrábění připraveného vzorku, a to roviny o průměru 100 mm z materiálu BK7, který byl upevněn na ocelovou tmelku a předbroušen nástrojem D38. Samotné obrábění probíhalo odzadu obrobku do jeho středu nástrojem D10 v 6 krocích s úběrem 10 μm /krok a s následnými dvěma lešticími cykly. Výsledný stav povrchu po 6 obráběcích krocích (úběru množství materiálu 60 μm) byl analyzován jak vizuálně pod mikroskopem, tak na 3D profilometru LuphoSCAN. Důraz byl zde kladen zejména na hledání koncentrických struktur, které svým rozsahem spadají do

kategorie středních prostorových frekvencí. Zmíněné povrchové struktury se plně rozvinuly po druhém leštícím cyklu, kde nejvýznamnější poškození je nápadně podobné amplitudovému výkyvu ve vytvořené mapě zrychlení vibrací, naměřených právě při procesu obrábění. S průměrem poškození cca 3 mm tato struktura spadá jasně do kategorie středních prostorových frekvencí a v závislosti na velikosti leštícího spotu 21 mm můžeme předpokládat, že vznikla již během procesu broušení.

Z výše uvedeného souhrnu se tak lze domnívat, že změny v amplitudě zrychlení vibrací během procesu obrábění mají jistý vliv na stav povrchu obráběného materiálu a značná podobnost přítomných koncentrických struktur s amplitudovými výkyvy v mapě naměřených vibrací při samotném procesu tak poukazuje na spojitost změn ve vibračním chování obráběcího stroje a přítomností poškození z oblasti středních prostorových frekvencí na povrchu obráběného materiálu. Pomocí provedené časově – frekvenční analýzy však kromě nárůstu frekvencí 4 kHz a 12 kHz v místech velkého podpovrchového poškození nebylo možné s jistotou identifikovat žádný další zdroj vibrací. Předpokládá se, že hlavním zdrojem dominantních frekvencí vibrací je frekvenční měnič nástrojového a obrobkového vřetena, nicméně hlavní otázkou zůstává, co je zdrojem samotných změn v amplitudě vibrací a právě tento fakt nelze s naprostou přesností určit bez hlubší analýzy celé problematiky, zejména pak konstrukce stroje a vlastností použitých komponent, protože právě konstrukce stroje, ve spojení s postupným posuvem nástrojového vřetena v ose Y, by mohla být hledaným zdrojem proměnlivosti amplitudy vibrací během obrábění. Optimální by bylo udělat cílené analýzy na frekvence otáčení vřeten a jejich harmonické násobky, ale to již není předmětem práce. Získané poznatky lze použít jako základ pro rozsáhlejší analýzu celé této problematiky vzniku středních prostorových frekvencí, které jsou dnes hlavní překážkou ve zvyšování kvality povrchu v oblasti asférické optiky.

Citovaná literatura

- [1] **DAREBNÍKOVÁ, Jana.** *Asférické plochy v optice*. Olomouc, 2009. Dostupné z: <http://theses.cz/id/nq774m/69400-780247872.pdf>. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Jaroslav Wagner, Ph.D.
- [2] **WANG, Jian, Yaguo LI, Jinghua HAN, Qiao XU, Yinbiao GUO.** Evaluating subsurface damage in optical glasses. *Evaluating subsurface damage in optical glasses*. 2011, č. 6, s. 1-11. DOI: 10.2971/jeos.2011.11001. Dostupné z: http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/11001/700
- [3] **SHEN, Jian, Shouhua LIU, Kui YI, Hongbo HE, Jianda SHAO a Zhengxiu FAN.** Subsurface damage in optical substrates. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 2005, vol. 116, issue 6, s. 288-294. DOI: 10.1016/j.ijleo.2005.02.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402605000665>
- [4] **FRANTIŠEK, Procháska, Ondřej MATOUŠEK, Pavel PSOTA a Jiří BENEŠ.** Chování "mid spatial frequencies" při CNC opracování optických ploch. *Jemná mechanika a optika*. 2015, (10). ISSN 0447-6441.
- [5] **M. AIKENS, David, Jessica E. DEGROOTE a Richard N. YOUNGWORTH.** Specification and Control of Mid-Spatial Frequency Wavefront Errors in Optical Systems. *Optical Society of America* [online]. 2008 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://www.savvyoptics.com/files/Aikens_DeGroote_and_Youngworth_MSF_paper-reformat.pdf
- [6] **ABDULHANI JABBAR ALSWEDE, Faris.** *Study Of Vibration For CNC Machine At Difference Feed* [online]. Iraq: International Journal of Advancements in Research & Technology, 2014 [cit. 2016-01-15]. ISSN 2278-7763. Dostupné z: <http://www.ijoart.org/docs/Study-Of-Vibration-For-CNC-Machine-At-Difference-Feed.pdf>

- [7] **LUKOVICS, Petr.** *VLIV VIBRACÍ BROUSICÍHO NÁSTROJE NA STRUKTURU BROUŠENÉHO POVRCHU* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/24788>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Pernikář.
- [8] **FIALA, Zdeněk.** *Vibrace při obrábění kovů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/16601>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [9] **SUCHÁČEK, Roman.** *Regenerativní kmitání při soustružení* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/20289>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Fiala.
- [10] **ROWE, W. B.** *Principles of modern grinding technology*. Second edition. ISBN 03-232-4271-5.
- [11] **WEIGL, Martin.** *Měření vibrací* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6359>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Martin Musil.
- [12] **VOJÁČEK, Antonín.** *Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. Automatizace.hw.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>

- [13] **ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK.** Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa* [online]. 2010, **2010**(1) [cit. 2016-03-23].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [14] **HUSAR, Tomáš.** *Měření vibrací na obráběcích strojích* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2016-03-23].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40110>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jan Vetiška.
- [15] **POLÁK, Martin.** *Volba a použití akcelerometru při měření vibrací* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/36729>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Pavel Kukla.
- [16] MCG 100 CNC. OPTOTECH. [obrázek] [online]. [cit. 2016-04-30].
Dostupné z: http://www.optotech.de/files/downloads/products/mc_100_cnc_asph_0.pdf
- [17] PRÜFTECHNIK. *VIBXPERT II* [obrázek] [online]. [cit. 2016-04-30].
Dostupné z: <http://www.pruftechnik.com/products/condition-monitoring-systems/portable-systems-for-condition-monitoring/vibxpert-ii.html>
- [18] TOPTEC: Regionální centrum optiky a optoelektronických systémů. [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.toptec.eu/cz/>
- [19] N-BK7 Optical Glass. *Präzisions glas & optik* [online]. Německo [cit. 2016-05-15].
Dostupné z: <https://www.pgo-online.com/intl/katalog/BK7.html>