



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

ONLINE DIAGNOSTIKA OBRÁBĚCÍHO STROJE MCV 754

ONLINE DIAGNOSTICS OF MACHINE TOOL MCV 754

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Benedikta Rázgová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	Bc. Benedikta Rážgová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Daniel Zuth, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Online diagnostika obráběcího stroje MCV 754

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat popisem konkrétního řešení online vibrodiagnostického zařízení na obráběcím stroji, jedná se o stroj MCV 754 a online diagnostický systém fy SKF. Práce bude obsahovat detailní popis instalovaného zařízení včetně podrobného popisu ovládání dodaného SW. Poté bude provedena série testovacích měření, která ověří možnosti použitého systému.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti vibrodiagnostiky a online vibrodiagnostických systému.
Popis použitého obráběcího stroje včetně uchycení senzorů.
Popis použitého online diagnostického zařízení a srovnat s ostatními výrobci.
Popsat, provést a vyhodnotit sérii měření.
Vytvořit dokumentaci k použitému systému.
Vyhodnocení dosažených výsledků.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

BROCH, Jens Trampe. Mechanical Vibration and Shock Measurements. 2nd Edition. Naerum: Brüel & Kjaer, 1984. ISBN 8787355361.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá online diagnostikou obrábacieho stroja a okrajovo analýzou textúry povrchu. Prvá časť práce pojednáva o problematike v teoretickej rovine, popísané sú tu obrábacie zariadenia, údržba, metódy technickej diagnostiky, konkrétne online vibrodiagnostické systémy a tiež prehľad profilových a plošných parametrov. V praktickej časti sú pomocou analýzy signálu z online vibrodiagnostického systému a analýzy textúry povrchu porovnané dva procesy obrábania pri ideálnych a zhoršených podmienkach. Súčasťou práce je vyhodnotenie vykonaných analýz a odporúčenie pre prax.

ABSTRACT

This master's thesis deals with online diagnostics of a machine tool and marginal analysis of surface texture. The first part of the thesis deals with problems theoretically, there are described the machine tools, maintenance, methods of technical diagnostics, specifically online vibrodiagnostic systems and an overview of profile and area parameters. In the practical part, two test samples created under ideal and degraded conditions. In the practical part, two signal processing processes under ideal and degraded conditions are compared using signal analysis from an online vibrodiagnostic system and surface texture analysis. Part of the work is the evaluation of the performed analyzes and recommendations for practice.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vibrodiagnostika, online vibrodiagnostický systém, online diagnostika obrábacieho stroja, frekvenčná analýza, textúra povrchu.

KEYWORDS

Vibrodiagnostics, online vibrodiagnostic system, online diagnostics of machine tools, frequency analysis, surface texture.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

Rážgová, B. *Online diagnostika obrábacieho stroja MCV 754*, Brno, Vysoké učenie technické v Brne, Fakulta strojného inžinierstva. 2020, 107 s., Vedúci diplomovej práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Pod'akovanie patrí môjmu vedúcemu práce Ing. Danielovi Zuthovi, Ph.D. za ústretoý prístup a odborné rady počas celého vypracovania diplomovej práce. Jedno veľké ďakujem tiež patrí mojej rodine, ktorá mi štúdium umožnila a priateľovi, ktorý pri mne vždy stál.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Daniela Zutha Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25.6.2020

.....

Rázgová Benedikta

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	OBRÁBACIE STROJE	17
2.1	Požiadavky obrábacích strojov	17
2.2	Číslicovo riadené stroje	17
2.3	Frézovanie.....	17
2.3.1	Obvodové frézovanie.....	18
2.3.2	Čelné frézovanie	18
2.3.3	Základné vzorce pre frézovanie.....	19
3	ÚDRŽBA STROJNÉHO ZARIADENIA	21
3.1	Základné stratégie údržby	21
3.1.1	Údržba po poruche.....	21
3.1.2	Preventívna údržba	22
3.1.3	Údržba s predom stanovenými intervalmi.....	22
3.1.4	Údržba podľa technického stavu	22
4	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	23
4.1	Základné definície a terminológia	23
4.1.1	Diagnóza	23
4.1.2	Diagnostický systém.....	23
4.1.3	Technický stav objektu	24
4.1.4	Diagnostický signál	24
5	VIBRODIAGNOSTIKA	27
5.1	Budiace sily.....	27
5.1.1	Budiaca sila periodická.....	27
5.1.2	Budiaca sila impulzná.....	28
5.1.3	Budiaca sila náhodného priebehu	28
5.2	Kmitanie.....	29
5.2.1	Vlastné kmitanie	29
5.2.2	Budené kmitanie	30
5.2.3	Samo budené kmitanie.....	30
5.2.4	Základné vzťahy popisujúce kmitavý pohyb.....	31
5.3	Merané veličiny	32
5.4	Senzory vibrácií	32
5.4.1	Senzory výchylky	33
5.4.2	Senzory rýchlosti	33
5.4.3	Senzory zrýchlenia – akcelerometre.....	33
5.4.4	Umiestnenie a pripevnenie snímačov	34
5.5	Vyhodnocovanie vibrácií.....	35
5.5.1	Analýza v časovej oblasti	35
5.5.2	Analýza vo frekvenčnej oblasti	36
5.6	Meranie vibrácií na obrábacích strojoch.....	37
5.6.1	Pochôdzková vibračná diagnostika	37
5.6.2	Online vibračná diagnostika	38
6	ONLINE VIBRODIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY	39

6.1.1	Adash spol. s.r.o.	39
6.1.2	PRÜFTECHNIK Dieter Busch AG.....	42
6.1.3	SKF Group Headquarters	43
6.1.4	National Instruments	46
6.2	Porovnanie online diagnostických zariadení	47
7	METROLÓGIA TEXTÚRY POVRCHU	48
7.1	Profilová metóda	48
7.2	Plošná metóda.....	50
8	ONLINE VIBRODIAGNOSTICKÁ ANALÝZA	52
8.1	Obrábacie centrum MCV 754 QUICK.....	52
8.2	Snímače	53
8.3	Popis merania	53
8.3.1	Popis testovacieho vzorku	54
8.3.2	Popis nástrojov	55
8.3.3	Popis obrábania	55
8.4	Analýza signálu	56
8.4.1	ARM software	56
8.4.2	Postup analýzy signálu	56
8.4.3	Porovnanie nameraných dát od SKF	58
8.4.4	Porovnanie nameraných dát od NI	60
8.4.5	Vyhodnotenie online vibrodiagnostickej analýzy	61
9	ANALÝZA TEXTÚRY POVRCHU	62
9.1	Popis merania	62
9.1.1	Optický profilometer Talysurf CCI Lite	62
9.2	Analýza nameraných dát	63
9.2.1	TalyMap Gold software	63
9.2.2	Postup analýzy nameraných dát	63
9.2.3	Porovnanie obrobkov pomocou plošných parametrov	64
9.2.4	Vyhodnotenie analýzy povrchu.....	65
10	ZHRNUTIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV.....	66
10.1	Odporúčenie pre prax	66
11	ZÁVER.....	69
12	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.....	71
13	ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK.....	75
13.1	Zoznam tabuliek	75
13.2	Zoznam obrázkov	76
14	ZOZNAM PRÍLOH.....	79
A	VÝROBNÝ VÝKRES TESTOVACIEHO VZORKU	81
B	DOKUMENTÁCIA K POUŽITÉMU SYSTÉMU	82
14.1	@ptitude observer.....	82
14.2	Analysis and Reporting Manager	88
C	SPRACOVANÉ DÁTA OD SKF	93
D	SPRACOVANÉ DÁTA OD NI	99
E	SPRACOVANÉ DÁTA K ANALÝZE POVRCHU	104

1 ÚVOD

Monitorovanie a hodnotenie stavu sa v našej spoločnosti vyskytuje pomerne dlhý čas. Už naši predchodcovia zisťovali životné funkcie u svojich potomkov, či zvierat. Taktiež potrebovali udržiavať svoje primitívne nástroje na lov v stave schopnom plniť požadovanú funkciu. Vývoj priemyslu neustále napreduje, a tým pádom sa zvyšuje význam údržby a technickej diagnostiky.

Súčasná situácia v priemysle je vysoko konkurenčná. Trh je presýtený výrobcami, ktorí sa neustále snažia zdokonaľovať, vylepšovať a urýchľovať svoju výrobu. Zákazník je pre firmu kľúčový, pretože on určuje hospodárny rast. Medzi hlavné ciele každého výrobného priemyslu patria nízke náklady na výrobu, včasné dodanie a vysoká kvalita výrobkov, ktorá uspokojí požiadavky zákazníka. Najmodernejším prístupom, ako zabezpečiť kvalitnú výrobu bez nežiadúcich prestojov je zaistenie online diagnostiky na výrobných zariadeniach. Momentálne medzi najpoužívanejšie metódy technickej diagnostiky patrí vibrodiagnostika vďaka tomu, že väčšina sledovaných zariadení sú stroje s rotačnými komponentami. Pomocou vibrácií je u týchto strojov možné odhaliť väčšinu problémov. Online vibrodiagnostický systém je automatizované nepretržité monitorovanie aktuálnych vibrácií strojov. Periodický zber dát sa ukladá na server, ktorý je prístupný aj na diaľku. Na základe dát zo systému môžu byť nastavené medzné hodnoty, ktoré po prekročení upozornia užívateľa. Systém je schopný odhaliť nekvalitné obrábanie, ktoré sprevádzajú zvýšené vibrácie.

Diplomová práca je zameraná na odhalenie nekvalitného obrábania prostredníctvom online vibrodiagnostického systému na obrábacom strojnom zariadení MCV 754. V prvej časti vysvetľuje riešenú problematiku v teoretickej rovine. Je tu stručný popis obrábacích strojov, konkrétnej obrábacej metódy – frézovania, údržby a technickej diagnostiky. Do popredia je kladená vibrodiagnostika, ako jedna z techník diagnostiky spolu s online vibrodiagnostickými systémami. Súčasťou práce je porovnanie týchto systémov s použitým diagnostickým systémom od firmy SKF. Okrajovo sú v práci spomenuté parametre textúry povrchu.

Teoretické poznatky boli realizované pri analýzach a vyhodnoteniach dát. Kvôli mimoriadnemu opatreniu ministerstva zdravotníctva, konkrétne zákazu osobnej prítomnosti študentov na školách z dôvodu pandémie Covid-19 som sa pri realizácii meraní nezúčastnila. Namerané dáta a fotodokumentácia mi boli poskytnuté vedúcim práce. Pre jednoduchšie porozumenie a prevzatie mnou vytvoreného postupu bola vytvorená dokumentácia jednotlivých krokov v použitých programoch. Práca na konci disponuje celkovým zhrnutím dosiahnutých výsledkov analýz a odporúčením pre prax.

2 OBRÁBACIE STROJE

Medzi najrozšírenejší druh výrobných strojov patria obrábacie stroje. Obrábací stroj umožňuje obrobku dať žiadaný geometrický tvar a kvalitu povrchu oddelovaním materiálu vo forme triesok rezným nástrojom. [1]

2.1 Požiadavky obrábacích strojov

Hlavné ciele každého výrobného priemyslu sú nízke náklady na výrobu, včasné dodanie a vysoká kvalita výrobkov. Poruchy strojov ovplyvňujú schopnosť plniť ciele v oblasti nákladov, času a kvality.

Z tohto dôvodu sú na obrábacie stroje kladené vysoké požiadavky. Hlavnou požiadavkou je hospodárna výroba. Tento pojem znamená realizáciu technologických operácií v požadovanej presnosti s minimálnymi nákladmi v čo najkratšom čase. [2]

Medzi ďalšie dôležité požiadavky patria: [2]

- prevádzková spoľahlivosť,
- bezpečnosť,
- ergonómia,
- tuhosť,
- kvalita práce,
- výrobná a pracovná presnosť.

Aby sme všetky tieto požiadavky dosiahli je potrebná dostatočná údržba stroja, vďaka nej sa vieme vyhnúť nečakaným prestojom. V tejto diplomovej práci sa zameriam práve na diagnostiku strojov, ktorá je súčasťou údržby. Pomocou diagnostiky sa nám potom ľahšie plnia uvedené požiadavky.

2.2 Číslicovo riadené stroje

Číslicovo riadené stroje označované anglickou skratkou CNC (Computer Numerical Control) sú charakteristické tým, že všetky pracovné funkcie sú ovládané riadiacim systémom pomocou vytvoreného programu. Všetky informácie sú do programu zadané formou čísel, ktoré sú vytvorené v určitom kóde, zrozumiteľnom pre riadiaci systém. Súčasťou CNC strojov sú vstavané počítače, v ich pamäti sú uložené všetky dôležité funkcie systému ako posuv, otáčky a pod. [3]

2.3 Frézovanie

Medzi najrozšírenejšie metódy obrábania patrí najmä frézovanie. Medzi jeho prednosti je radená pomerne veľká výkonnosť pri veľmi dobrej kvalite obrábania. Frézovanie sa využíva na obrábanie hranolovitých rovinných, tvarových a rotačných plôch, na obrábanie drážok rôznych profilov, taktiež na obrábanie závitov a ozubení. [4]

Trieska je odoberaná zubami rotujúceho nástroja – frézou. Hlavný pohyb vykonávaný nástrojom je rotačný. Vedľajší pohyb je posuv obrobku, ktorý je zvyčajne priamočiary. U moderných strojných zariadeniach sú posuvy plynule meniteľné a realizovateľné vo viacerých

smeroch zároveň. Podľa polohy osy nástroja k obrábanej ploche sa rozlišuje frézovanie obvodové a čelné. [4]

2.3.1 Obvodové frézovanie

Pri obvodovom frézovaní sa frézuje obvodom nástroja, zuby sú len po obvode. Osa nástroja a obrábaná plocha sú navzájom rovnobežné. Hĺbka rezu sa nastavuje kolmo na osu frézy a na smer posuvu. Používajú sa tvarové a valcové frézy. Podľa zmyslu otáčania nástroja existujú dva druhy obvodového frézovania, a to proti bežné a súbežné. [4]

Zmysel rotácie pri proti bežnom frézovaní ostria nástroja je proti smeru posuvu obrobku. Premennivá hrúbka triesky sa mení od minimálnej ku maximálnej hodnote. Spočiatku hrot nástroja materiál len stlačuje. Silové účinky a deformácia, ktoré vznikajú pri tomto druhu frézovaní spôsobujú zvýšené opotrebenie nástroja. [4]

Výhody proti bežného frézovania sú: [4]

- počiatočný záber nezávisí na hĺbke rezu,
- menšie opotrebenie strojného zariadenia,
- povrch obrobku nemá významný vplyv na trvanlivosť nástroja.

Nevýhody proti bežného frézovania sú: [4]

- zhoršená kvalita obrobenej plochy,
- smer sily frézovania s ohľadom na upnutie.

Pri súbežnom frézovaní ostrie nástroja rotuje v smere posuvu obrobku. Hrúbka triesky ide z maximálnej do minimálnej hodnoty. K prevedeniu súbežného frézovania musí byť frézka prispôbená tak, že vymedzí vôle a predpätie medzi posunovým šraubom a maticou stola. Za nesplnenia tejto podmienky hrozí poškodenie nástroja a dokonca až stroja. [4]

Výhody súbežného frézovania sú: [4]

- vyššia trvanlivosť nástrojov,
- použitie vyšších rezných rýchlostí a posuvov,
- jednoduchšie upínanie vzhľadom k tomu, že sila rezania pritlačuje obrobok ku stolu,
- menší sklon ku kmitaniu,
- vyššia kvalita obrobenej plochy.

Nevýhody súbežného frézovania sú: [4]

- silová záťaž každého zubu pri zábere,
- nevhodné pri obrábaní polotovarov s tvrdým a znečisteným povrchom.

2.3.2 Čelné frézovanie

Čelné frézovanie spočíva vo frézovaní čelom nástroja. Osa nástroja a obrábacia plocha sú na seba kolmé. Nástroj má britvy po obvode frézy, ale aj na jej čele tj. na ploche kolmej k ose frézy. Podľa polohy osy rotácie frézy vzhľadom k obrábanej ploche rozlišujeme dve metódy frézovania: [4]

- symetrické, kde osa nástroja prechádza stredom obrábacej plochy,
- nesymetrické, kde osa nástroja je mimo stred obrábacej plochy.

2.3.3 Základné vzorce pre frézovanie

V tejto kapitole uvediem základné vzorce používané pri frézovaní, ktoré neskôr využijem v praktickej časti.

Rezná rýchlosť v_c je v podstate obvodová rýchlosť nástroja, udáva sa v m/min . [4]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Kde:

D – priemer nástroja [mm],

n – otáčky nástroja [min^{-1}].

Posuv na otáčku f_n je veličina, ktorá udáva dĺžku dráhy obrobku za dobu jednej otáčky nástroja a udáva sa v mm . Základnou jednotkou posunového pohybu je posuv na zub f_z v mm . Je to dĺžka dráhy obrobku za dobu jednej otáčky nástroja vydelená počtom zubov nástroja. [4]

$$f_n = f_z \cdot z \quad (2)$$

Kde:

z – počet zubov / britiev nástroja.

Jednotka posunovej rýchlosti v_f je v mm/min a jej vzorec je nasledovný. [4]

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = f_n \cdot n \quad (3)$$

Otáčková frekvencia f_o je frekvencia otáčania nástroja, udáva sa v Hz . V spektrách sa prejavuje zvýšenou amplitúdou. V spektrách sa označuje prvá harmonická frekvencia a jej násobky.

$$f_o = \frac{n}{60} \quad (4)$$

Ďalšia dôležitá frekvencia je dotyková frekvencia zubu f_d v Hz , ktorá určuje ako často sa zub nástroja zarýva do materiálu.

$$f_d = f_o \cdot z \quad (5)$$

3 ÚDRŽBA STROJNÉHO ZARIADENIA

Každé jedno zariadenie, od ktorého očakávame spoľahlivé vykonávanie funkcie po celú dobu plánovanej životnosti je potrebné udržiavať. Úlohou údržby nie je len opravovať poškodené zariadenia, ale zabrániť ich poškodeniu. Hlavné ciele údržby, ktoré sa navzájom ovplyvňujú sú: [5]

- dosiahnutie maximálnej produktivity,
- optimalizácia výkonnosti stroja,
- zaistenie bezpečnosti prevádzky.

K dosiahnutí týchto cieľov nám vo veľkej miere napomáha technická diagnostika.

Definícia údržby: „Údržba predstavuje proces riadenia všetkých technických a administratívnych činností počas životného cyklu objektu, zameraných na udržanie alebo obnovenie takého jeho stavu, v ktorom môže vykonávať požadovanú funkciu, pri zohľadnení optimálnych nákladov a požiadaviek na kvalitu, bezpečnosť a prostredie.“ [6]



Obr. 1) Rozdelenie údržby [7]

3.1 Základné stratégie údržby

Všetky organizačné jednotky v spoločnosti majú svoj cieľ, kvôli ktorému boli zriadené. Spôsob naplnenia týchto cieľov si organizačné jednotky určujú samy pomocou určitej stratégie. Stratégia údržby je súbor pravidiel manažmentu, podľa týchto pravidiel sú vykonávané jednotlivé úkony údržby a plánuje sa ich realizácia v čase. [8]

3.1.1 Údržba po poruche

Údržba po poruche je historicky najstarší typ stratégie údržby. Taktiež je označovaná aj ako reaktívna údržba, ktorá reaguje na stratu funkčnosti stroja za účelom navrátiť mu požadovanú funkciu. Technická diagnostika stroja nastane, až po jeho odstavení z prevádzky. Hlavným

cieľom je zabezpečenie bezporuchového stavu zariadenia v čo najkratšom čase a obnovenie prevádzky s čo najnižšími stratami. Jej výhoda spočíva vo využití celej životnosti stroja. [8]

Údržba po poruche môže byť: [9]

- **Okamžitá údržba** je realizovaná hneď po vzniku poruchy.
- **Odložená údržba** nie je možná hneď po vzniku poruchy.

3.1.2 Preventívna údržba

Neustále zvyšovanie produktivity práce a snaha, čo najefektívnejšie využiť strojné zariadenia viedli k prechodu od reaktívnej údržby k preventívnej údržbe. Preventívna údržba je súbor činností, ktoré slúžia ako prevencia pred výskytom porúch. Jedná sa o plánovanú údržbu. [8]

3.1.3 Údržba s predom stanovenými intervalmi

Údržba s predom stanovenými intervalmi je vykonávaná v presne stanovených intervaloch vychádzajúcich z minimálnej životnosti komponentov bez ohľadu na reálne opotrebenie. Realizácia tejto údržby spočíva v robení preventívnych prehliadok, kontrol a výmeny súčiastok, a to vždy po uplynutí určitej doby. Daný časový interval sa môže meniť v závislosti na veku objektu. Plánovanie tu zohráva dôležitú rolu, vďaka nemu dochádza k zníženiu výdajov oproti výdajom spojených s reaktívnou údržbou. Nevýhodou je plytvanie nákladov kvôli nepoznaniu skutočného technického stavu zariadenia a veľakrát môže byť oprava zbytočná. [9]

3.1.4 Údržba podľa technického stavu

Údržba podľa technického stavu je založená na princípe monitorovania a diagnostikovania technického stavu objektu. Pomocou snímačov a senzorov sa sledujú fyzikálne vlastnosti zariadenia, ako napríklad teplota, vibrácie a podobne. Vyhodnocovanie týchto parametrov sa s rýchlou napredujúcou technickou dobou čoraz viac zdokonaľuje, čo vedie k presnejšiemu určeniu technického stavu. Táto metóda údržby vyhodnocuje skutočný stav sledovaného zariadenia, zisteného pomocou technickej diagnostiky. Údržbárska činnosť sa realizuje po objavení zhoršeného stavu objektu. Na jednej strane je minimalizácia poruchových stavov, nákladov a prestojov, na druhej strane sú vysoké výdavky na zadováženie diagnostickej techniky a výškolenie obsluhy. [9]

Ďalej sa táto údržba podľa technického stavu rozdeľuje nasledovne: [9]

- **Prediktívna údržba** umožňuje odvrátenie nepriaznivého stavu na základe získaných dát pomocou prepracovaného diagnostického systému. Jej základom je predikcia budúceho vývoju sledovaných charakteristík a parametrov vychádzajúcich z časovej histórie. Určuje trend priebehu technického stavu objektu.
- **Proaktívna údržba** je najmladší typ údržby, ktorý sa zameriava na príčiny porúch a ich odstraňovanie.

4 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Slovo diagnostika má pôvod v gréčtine, kde dia-gnosis znamená skrz poznanie. Spočiatku bolo slovo používané len v lekárstve a postupom času našla diagnóza uplatnenie aj v technickom priemysle. [10]

V bežnom živote ľudí neustále monitorujeme prostredníctvom rôznych lekárskeho zariadení, ako napríklad tlakomer, teplomer a i. Ich zdravotný stav priebežne kontrolujeme pomocou preventívnych prehliadok, aby sme ich udržali, čo najdlhšie v dobrej kondícii. S rýchlo rastúcou zložitosťou a cenou strojov sa kladie čoraz väčší dôraz na diagnostiku strojných zariadení.

Technická diagnostika sa definuje ako samostatný vedný obor, ktorý sa zaoberá bez demontážnymi a nedeštruktívnymi prostriedkami a metódami stanovenia technického stavu objektu. Na rozdiel od lekárskej diagnostiky je založená na znalostiach, ktoré okrem heuristického charakteru majú kauzálny charakter, alebo tiež matematických modeloch diagnostikovaných objektov. Spoľahlivosť, ako jedna zo základných znakov kvality technických zariadení je podmienená racionálnym sledovaním technického stavu stroja a včasným rozpoznaním fyzikálnych zmien a procesov. Vierohodnosť diagnózy je podmienená optimálnou voľbou diagnostického zariadenia, jeho senzorov, ich umiestnenia a hlavne správnu analýzou a vyhodnotením nameraných dát. [11]

Hlavným cieľom technickej diagnostiky je v čo najväčšej miere nahradiť intuitívny a individuálny prístup určovania technického stavu objektu, prístupom exaktným a systematickým s maximálnym využitím všetkých relevantných informácií o diagnostikovanom objekte. [12]

4.1 Základné definície a terminológia

V nasledujúcich kapitolách je popísaná najčastejšia terminológia a názvoslovie pre lepšie pochopenie problematiky.

4.1.1 Diagnóza

V technickom priemysle je možné si pod pojmom diagnóza predstaviť okamžitú analýzu technického stavu stroja, respektíve vyhodnotenie jeho prevádzkyschopnosti.

Najdôležitejšie úlohy technickej diagnostiky sú: [4]

- **Detekcia** je identifikácia vady, alebo poruchy.
- **Lokalizácia** je určenie miesta vady, alebo poruchy.
- **Genéza** je stanovenie príčiny vzniku vady, alebo poruchy.
- **Prognóza** je určenie predikcie zostávajúcej životnosti pre naplánovanie vhodného termínu opravy a zabezpečenie potrebných logistických úkonov.

4.1.2 Diagnostický systém

Diagnostický systém je organizovaný súbor tvorený diagnostickými prostriedkami, diagnostickým objektom, obsluhou a súborom pracovných postupov. [10]

Diagnostické prostriedky tvoria súbor technických zariadení a pracovných metód pre analýzu a vyhodnotenie stavu skúmaného objektu. [10]

Rozdelenie diagnostických prostriedkov: [10]

- **ON-LINE** prostriedky umožňujú objekt diagnostikovať pri prevádzke. Ak je diagnostický systém trvale, alebo periodicky pripojený k meranému objektu, hovoríme o monitorovaní. Monitorovanie znamená priebežné, alebo pravidelné sledovanie technického stavu sledovaného zariadenia a vyhodnocovanie trendu porúch, alebo medzných bezpečnostných stavov, pri ktorých nie je nutné zariadenie odstaviť z prevádzky.
- **OFF-LINE** prostriedky diagnostikujú objekty, ktoré sú odstavené z prevádzky. Stroj sa testuje v určených intervaloch a následne sa vyhodnocuje jeho stav.

4.1.3 Technický stav objektu

Technický stav je daný odpovedajúcou veľkosťou a vývojom diagnostickej veličiny a množinou vybraných vlastností, vrátane technických parametrov. Diagnostická veličina je nositeľom informácie o technickom stave zariadenia. [10]

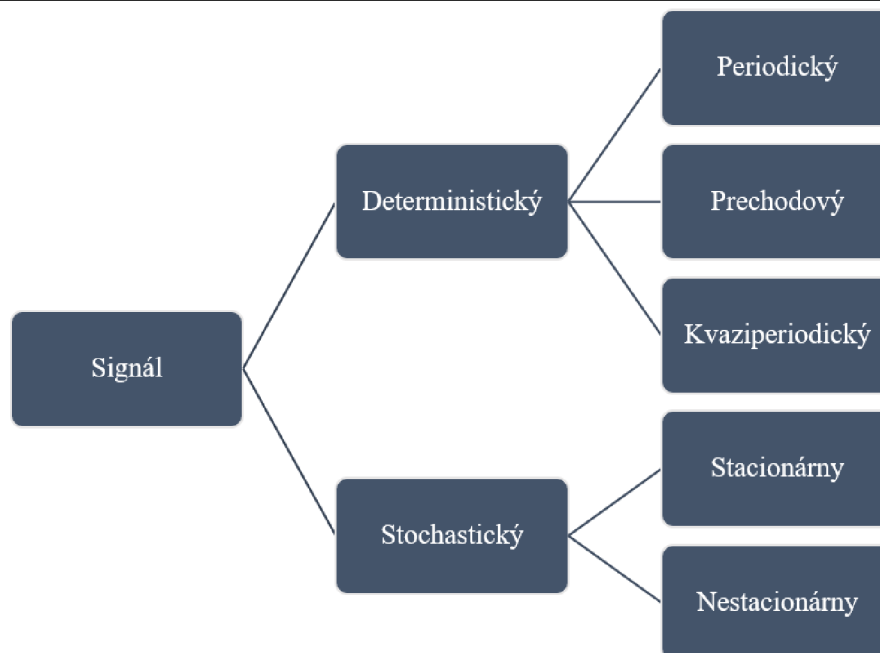
Objekt je prevádzkyschopný, ak je schopný plniť všetky stanovené funkcie podľa technických podmienok. Porucha je jav ukončujúci prevádzkyschopnosť objektu. Funkčnosť je schopnosť objektu vykonávať špecifickú funkciu podľa technických parametrov. Vada je stav, pri ktorom dochádza k odchýlke hodnoty meraného parametru bez príčiny, pričom nie sú prekročené medze predpísané v technických podmienkach. Technický stav je zhoršovaný postupne. [13]

4.1.4 Diagnostický signál

Signál je nositeľom časovej funkcie reprezentujúcej časové priebehy fyzikálnych veličín, ktoré obsahujú relevantné informácie o objekte. Klasifikácia signálov z obecného hľadiska rozdelenia je zobrazená na obr. 2). Dané rozdelenie je stručne charakterizované nasledovne: [13]

- **Signály deterministické** je možné popísať, definovať (napr. funkčným popisom), ich priebeh sa dá z tohto dôvodu predvídať.
- **Signály stochastické** jedná sa o náhodné signály, ich priebeh je nepredvídateľný.
- **Signály periodické** sú zložené z harmonických signálov o frekvenciách, ktoré sú celistvým násobkom jednej základnej frekvencie.
- **Signály prechodové** sú časovo obmedzené, ako napríklad impulzné vybudenie.
- **Signály kvaziperiodické** sú zložené z harmonických signálov o frekvenciách, ktoré sú násobkami najmenej dvoch základných frekvencií a súčasne sú v pomere určenom iracionálnym číslom.
- **Signály stacionárne** majú ustálené štatistické vlastnosti s časom nemenné.
- **Signály nestacionárne** ich priebeh sa v čase mení. Hranice medzi stacionárnymi a nestacionárnymi signálmi sa určujú s prihliadnutím ku skúmanej dĺžke záznamu signálu. Pôvodne nestacionárny signál, môže byť z pohľadu niekoľkonásobnej dlhšej doby stacionárny.

Úplne náhodný signál sa označuje ako šum. Najčastejšie sa na strojoch objavujú periodické, alebo kvaziperiodické signály. Bežný príklad zdroja kvaziperiodického signálu je prevodovka. [13]



Obr. 2) Rozdelenie signálu [13]

5 VIBRODIAGNOSTIKA

Na monitorovanie a analýzu strojov v závode sa používa niekoľko techník prediktívnej údržby. Medzi tieto techniky patrí vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termografia, tribológia, monitorovanie procesov, vizuálna kontrola a iné nedeštruktívne analytické techniky. Z týchto techník je dominantná práve analýza vibrácií. Prediktívna údržba sa stala synonymom pre monitorovanie vibračných charakteristík rotujúcich strojov s cieľom včas identifikovať poruchu, určiť pôvod a upozorniť v dostatočnom predstihu na blížiace sa problémy. Využívanie vibrodiagnostiky v systéme riadenia údržby napomáha k zvýšeniu prevádzkovej spoľahlivosti, životnosti a bezpečnosti strojného zariadenia, a tým pádom zvyšuje prevádzkyschopnosť strojov. [14]

5.1 Budiace sily

Základným problémom každej metódy technickej diagnostiky je analýza odozvy na pôsobiace príčiny, ktoré sú dôležité pre určenie spôsobu opravy. Odozvou vibrodiagnostiky sú vibrácie, ktorých charakter závisí na pôsobiacej sile. [5]

5.1.1 Budiaca sila periodická

Najjednoduchší druh periodickej sily je harmonická sila. V praxi je harmonická sila ojedinelá, avšak väčšinu síl vyskytujúcich sa v rotačných strojov môžeme vyjadriť ako súčet harmonických síl, čo bude popísané v kapitole 5.3. Z tohto dôvodu je možné pomocou harmonickej sily a odozvy popísať vlastnosti periodickej sily a jej vplyv na vibračnú odozvu. [5]

Harmonická sila je vyjadrená rovnicou: [5]

$$f(t) = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (6)$$

Kde:

F - amplitúda budiacej sily [N],

ω - kruhová frekvencia budiacej sily [rad/s],

t - čas [s],

φ_F - počiatočný fázový posuv budiacej sily.

V prípade pôsobenia harmonickej silou na pružné teleso je pohyb telesa po ustálení harmonickej s rovnakou kruhovou frekvenciou, ale s inou amplitúdou (obr. 3)). Toto kmitanie sa nazýva vynútené kmitanie. [5]

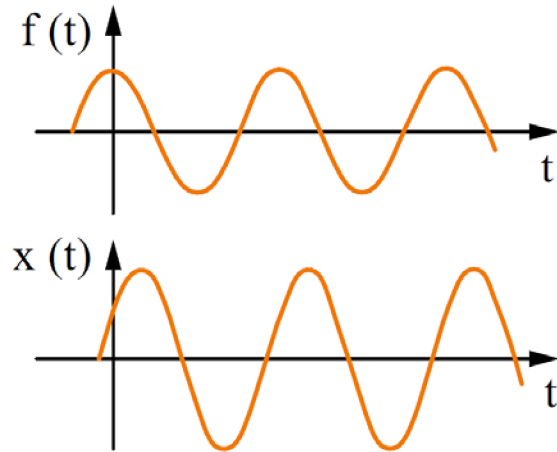
Výchylku kmitania popisuje rovnica: [5]

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (7)$$

Kde:

X - amplitúda vynúteného kmitania [μm],

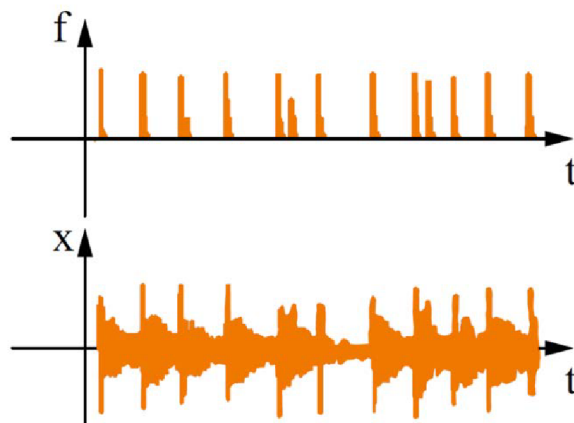
φ - fázový posuv – oneskorenie výchylky za budiacou silou.



Obr. 3) Kmitanie budené harmonickou budiacou silou - vytvorenie obr. podľa [5]

5.1.2 Budiaca sila impulzná

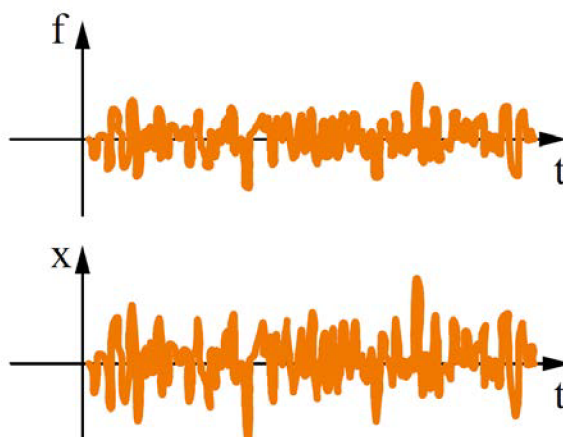
Impulzná sila pôsobiaca na teleso spôsobí jeho vychýlenie z rovnovážnej polohy a následné voľné kmitanie na jednej, či viacerých vlastných frekvenciách. Zámerné impulzné meranie sa používa pri Bump Teste. Bump Test je založený na analýze modálneho chovania objektu, spočívajúcom v údere do meracieho zariadenia a meraní amplitúdy a frekvencií výsledných vibrácií. Pri poruchách vo valivých ložiskách sa nachádza neznáme rázové budenie. [5]



Obr. 4) Kmitanie budené impulznou budiacou silou - vytvorenie obr. podľa [5]

5.1.3 Budiaca sila náhodného priebehu

V prípade pôsobenia sily náhodného priebehu na teleso je odozva taktiež náhodná, ale navyše môžu byť vybudené vlastné frekvencie. V praxi je náhodné budenie vždy prítomné, poväčšine ako šum. [5]



Obr. 5) Kmitanie budené silou náhodného priebehu - vytvorenie obr. podľa [5]

5.2 Kmitanie

Mechanické kmitanie stroja sa prejavuje vibráciami a je charakterizované zmenou polohy častí stroja, či samotného stroja, pričom periodicky kmitá s konečnou výchylkou okolo rovnovážnej polohy. [9]

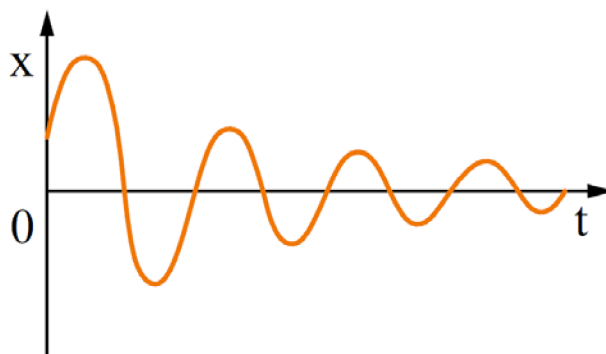
Kmitanie je sprievodným javom takmer pri každej prevádzke strojného zariadenia. Stroj je komplikovanou sústavou hmotných a pružných častí. Zložité procesy kmitania vznikajú v sústave stroj – nástroj – obrobok pri obrábaní kovov. Niekedy je možné toto kmitanie zanedbať, inokedy je veľmi intenzívne a môže sa prejavovať aj zvukom.

Pri obrábacích strojoch sa vyskytujú 4 základné druhy kmitania: [3]

- vlastné / voľné,
- budené / vynútené,
- samo budené.

5.2.1 Vlastné kmitanie

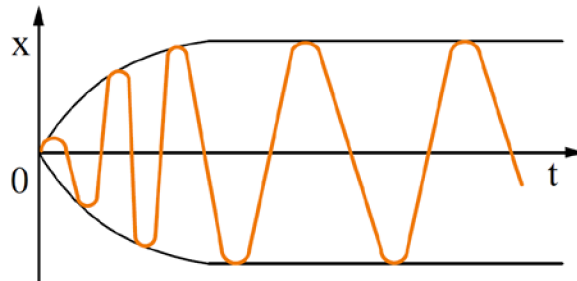
V sústave stroj – nástroj – obrobok, alebo v niektorých jej uzloch sú vlastné kmity vyvolané nárazom ako napríklad pri zábere stroja. Na proces obrábania je poväčšine vplyv vlastných kmitov zanedbateľný, pretože sa kmitanie rýchlo utlmí. Nepriaznivý vplyv na obrábanie majú hlavne budené a samo budené kmity. [15]



Obr. 6) Časový priebeh výchylky vlastných kmitov - vytvorenie obr. podľa [15]

5.2.2 Budené kmitanie

Príčinou vzniku budených kmitov sú periodicky sa meniace sily s časom, ktoré pôsobia na kmitajúci systém stroj – nástroj – obrobok. Frekvencia týchto kmitov sa zhoduje s frekvenciou budiacej sily. Ak teleso v pokoji začne kmitať v dôsledku pôsobenia vynucujúcej sily, tak amplitúda kmitov narastá až dokým sa neustáli na určitej hodnote. [15]



Obr. 7) Časový priebeh výchylky vynútených kmitov - vytvorenie obr. podľa [15]

Budené kmity vznikajú najčastejšie pri valcovom a čelnom frézovaní. Kmity v tomto prípade majú frekvenciu priamoúmernú počtu otáčok frézy. [15]

Budené kmitanie sa môže rozdeliť na dve kategórie: [15]

1. Kmity nezávislé od procesu rezania materiálu vyvolané:
 - prenosom kmitov zvonku na základe kmitania okolitých strojov,
 - nevyváženými rotujúcimi časťami stroja, nástroja, alebo obrobku,
 - chybami v prevodoch stroja,
 - rôznou tuhosťou jednotlivých súčiastok stroja.
2. Kmity závislé od procesu rezania materiálu vyvolané:
 - nerovnomerným prierezom odrezávanej vrstvy,
 - charakterom práce stroja.

5.2.3 Samo budené kmitanie

Samo budené kmitanie na rozdiel od budeného kmitania ku vzniku a udržaniu nepotrebuje žiadnu vonkajšiu periodickú budiacu silu. Vzniká a udržuje sa pôsobením periodicky meniacej sa sily vznikajúcej v dôsledku kmitania. Táto sila zmizne v okamihu zastavenia kmitavého pohybu. Charakter samo budených kmitov určuje štruktúra kmitajúcej sústavy. Neoddeliteľnou súčasťou sústavy je zdroj energie. [15]

Samo budené kmitanie spôsobuje: [16]

- zvýšenie dynamického namáhania súčastí stroja,
- zhoršenie kvality obrábaného povrchu,
- zvýšenie hluku pri pracovnom procese.

Vznik samo budeného kmitania je sprevádzaný stratou stability pohybu dynamického systému obrábacieho stroja. Pre obnovenie stability obrábania je potrebné: [15]

1. Upravenie rezných podmienok
 - zvýšením reznej rýchlosti,
 - zmenou hĺbky odrezávanej vrstvy,
 - zmenou geometrie nástroja.
2. Zväčšenie tuhosti systému
 - zväčšením prierezu nástroja,
 - použitím zotrvačiek u frézovacích hláv,
 - podložením obrobnku.
3. Zmenenie polohy reznej sily
 - správnou voľbou geometrie nástroja,
 - zmenou smeru otáčania.
4. Zväčšenie tlmenia prvkov sústavy stroj-nástroj-obrobok
 - pridaním statických tlmičov,
 - pridaním dynamických tlmičov.

5.2.4 Základné vzťahy popisujúce kmitavý pohyb

Najjednoduchší typ kmitania je harmonické kmitanie. Harmonický kmitavý pohyb vykonáva po vychýlení z rovnovážnej polohy hmota o hmotnosti m umiestnená na pružine o tuhosti k . Po zanedbaní tlmenia kmitá táto hmota vlastnou frekvenciou a časový priebeh je sínusový. [5]

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

$$x(t) = x_a \cdot \sin(\Omega \cdot t - \varphi) \quad (9)$$

Kde:

x_a - amplitúda harmonického kmitania [m],

Ω - vlastná kruhová frekvencia [rad/s],

φ - počiatočný fázový uhol.

V technickej praxi sa častejšie používa frekvencia v hertzoch, ktorá udáva počet cyklov v danom časovom úseku. [5]

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (10)$$

Kde:

ω - uhlová frekvencia [rad/s].

Periódou je prevrátenou hodnotou frekvencie a je vyjadrená v sekundách. [5]

$$T = \frac{1}{f} \quad (11)$$

5.3 Merané veličiny

Vo vibrodiagnostike sa merajú a analyzujú tri základné veličiny: [7]

- **Výchylka vibrácií** [μm] využívame ju napríklad na monitorovanie technického stavu turbín.

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (12)$$

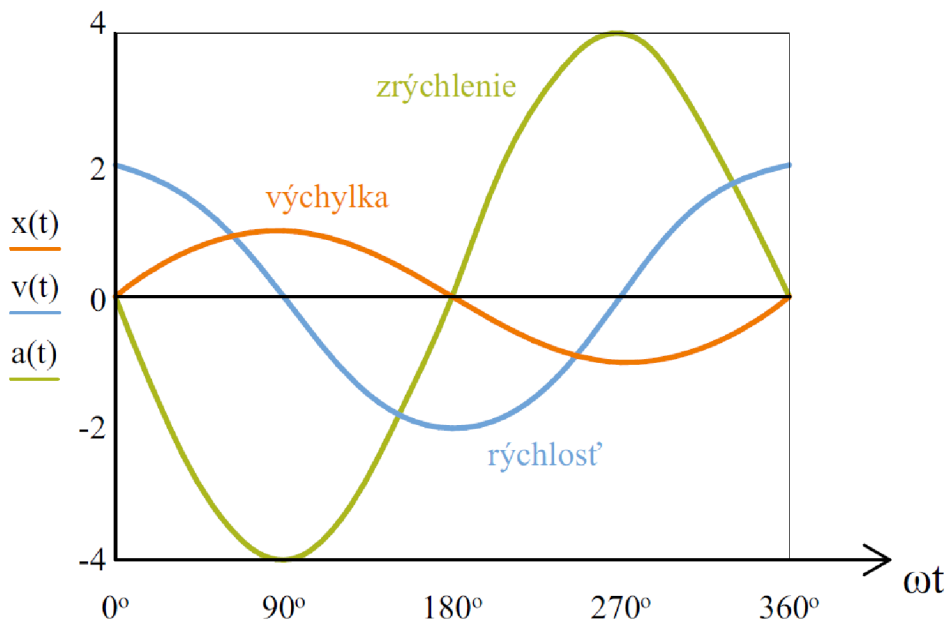
- **Rýchlosť vibrácií** [mm/s] sa využíva pri identifikácii porúch, ktoré sa prejavujú pri nízkych až stredných frekvenciách, vo frekvenčnom pásme 10-1 000 Hz, ako napríklad nevyvaha, uvoľnenie, nesúososť.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (13)$$

- **Zrýchlenie vibrácií** [m/s^2] sa prejavuje vo vysokých frekvenciách v jednotkách až desiatkach kHz, pri ktorých sa prejavujú napríklad začínajúce problémy ložísk, prevodov, mazania.

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (14)$$

Nadväznosť medzi jednotlivými veličinami je zobrazená na obr. 8). Výchylka a zrýchlenie sú vzájomne v proti fázy, rýchlosť je voči nim posunutá o 90° .



Obr. 8) Fázové porovnanie zrýchlenia, rýchlosti a výchylky - vytvorenie obr. podľa [7]

5.4 Sensory vibrácií

K meraniu vibrácií objektu je potrebné diagnostické vybavenie. V praxi sa aplikuje veľká škála meracích prostriedkov od jednoduchých meradiel celkových hodnôt vibrácií, až po viacanálové analyzátory s množstvom funkcií, v ktorých je možná už aj samotná analýza nameraných dát.

Najskôr je potrebné správne určiť o aké vibrácie sa jedná, a na tomto základe vybrať správny typ snímačov. Pri zlom určení sa nám meranie znehodnotí. Vibrácie môžu byť: [17]

- **Relatívne vibrácie** popisujú pohyb vzhľadom k umelo vytvorenej, respektíve vhodne zvolenej základni ako napríklad rám stroja, ktorý sám môže rôzne kmitať vzhľadom k Zemi.
- **Absolútne vibrácie** popisujú pohyb sledovaného objektu alebo jeho časti spravidla vzhľadom k Zemi.
- **Celkové vibrácie** stroja vyjadrujú celkovú energiu kmitania stroja. [9]

5.4.1 Senzory výchylky

Snímače výchylky tvoria relatívne zložitý systém, preto majú úzky profil využitia, a to meranie relatívnych vibrácií rotoru voči statorovej časti, väčšinou voči ložisku. [5]

Snímače výchylky je možné realizovať na indukčnom, indukčnostnom, magnetickom, kapacitnom alebo optickom princípe. V technickej diagnostiky sú najčastejšie využívané indukčnostné snímače. Tieto snímače využívajú závislosť indukčnosti cievky na prúdovej hustote vírivých prúdov. Kvôli vysokofrekvenčnému princípu sú citlivé na parazitné vplyvy, ako napríklad dĺžka káblu, či vnútorné elektromagnetické pole. Z tohto dôvodu sa vyrábajú integrované. Ďalším často využívaným snímačom sú aj bezdotykové optické snímače. [17]

Senzory výchylky neobsahujú žiadne pohyblivé časti, takže ich výstup je rovnaký bez ohľadu na ich umiestnenie. Väčšinou sa používajú dva snímače pootočené o 90°. [5]

5.4.2 Senzory rýchlosti

Snímače rýchlosti fungujú na základe elektromagnetickej indukcie. Senzor rýchlosti sa skladá z permanentného magnetu, ktorý je pevne spojený s puzdrom snímača a cievkou, ktorá je uložená na citlivých pružinách. Cievka vďaka svojej zotrvačnosti zostáva v kľude, zatiaľ čo magnet kmitá spolu s puzdrom. Pri pohybe cievky v magnetickom poli sa na vývodoch cievky indukuje elektrické napätie. Veľkosť tohto indukovaného napätia je priamo úmerná relatívnej rýchlosti medzi magnetickým polom a cievkou. [5]

Obecne sa senzor rýchlosti umiestňuje na stacionárnu konštrukciu z dôvodu veľkej citlivosti na bočné vibrácie. [5]

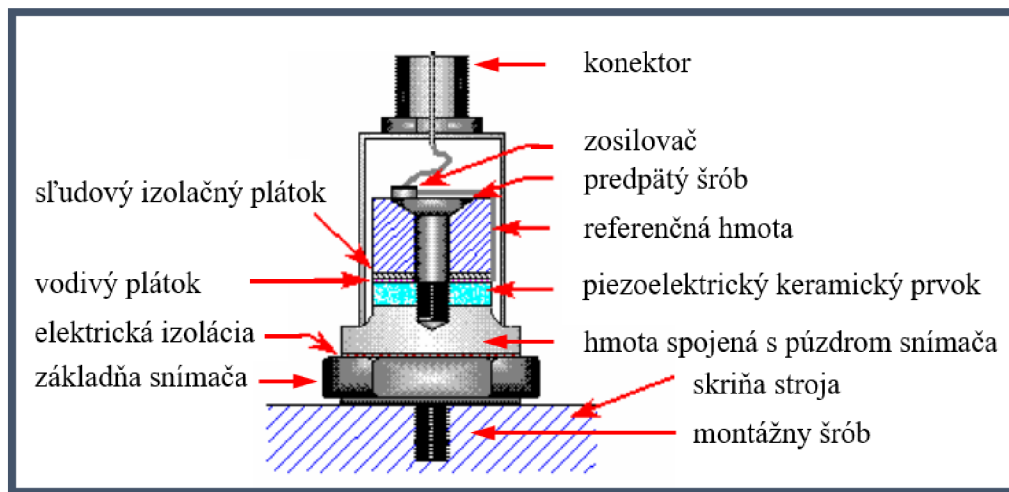
V súčasnej dobe sa rýchlosť kmitavého pohybu najčastejšie určuje integráciou signálu zo senzorov zrýchlenia. [17]

5.4.3 Senzory zrýchlenia – akcelerometre

Akcelerometre patria medzi najpoužívanejšie senzory vibrácií, vďaka najmenšiemu počtu nevýhod. Umožňujú integráciou signálu určiť výchylku, alebo rýchlosť. Môžu byť upevnené na skriňu stroja v akejkoľvek polohe, vďaka dostatočnej tuhosti systému hmota a pružina. Neobsahujú žiadne pohyblivé časti, tým pádom sú trvanlivé a spoľahlivé. Ich použitie je v širokom rozsahu frekvencií od 0,1 Hz do 30 000 Hz, majú veľký dynamický rozsah a existujú prevedenia pre vysoké prevádzkové teploty. Sú ľahko upevňované na objekt. Je dôležité dať si pozor, aby piezoelektrický prvok v snímači bol namáhaný len vibráciami a nie inými vplyvmi. Kvôli tomu musí byť plocha umiestnenia snímača hladká a plochá, aby nedošlo k deformáciám základne snímača. Taktiež je potrebné dať si pozor na teplotné zmeny a príliš veľký uťahovací moment pri upevnení snímača šraubom. [5]

Ich funkcia spočíva na princípe piezoelektrického javu. Piezoelektrická doštička je uložená medzi zotrvačnou (seizmickou) referenčnou hmotou a hmotou pevne spojenou

s puzdrom senzoru. Hmota spojená s puzdrom snímača kmitá spolu s meraným objektom, zatiaľ čo referenčná hmota je statická. Z tohto dôvodu vzniká sila, ktorá deformuje piezoelektrický prvok, pričom vzniká elektrický náboj, ktorý je priamoúmerný deformácií. Sensory zrýchlenia merajú absolútne vibrácie. [5]



Obr. 9) Senzor zrýchlenia (tlakový typ) [5]

Medzi dôležité parametre akcelerometrov patrí citlivosť snímača a frekvenčný rozsah jeho použiteľnosti. Tieto parametre sa dajú vyčítať z kalibračnej krivky. U novších snímačov s predzosilňovačom integrovanom v ich puzdre sa citlivosť udáva v mV/g . Všeobecne platí, že s veľkosťou snímača sa zväčšuje aj jeho citlivosť, a tým pádom dokáže merať nižšie frekvencie. [5]

Snímače tiež vyberáme na základe dôležitých vlastností ako sú dynamický rozsah, frekvenčná odozva, horný frekvenčný limit, dolná prahová frekvencia, rušenie, rezonančná frekvencia, citlivosť, teplotný vplyv, či teplotný rozsah. [10]

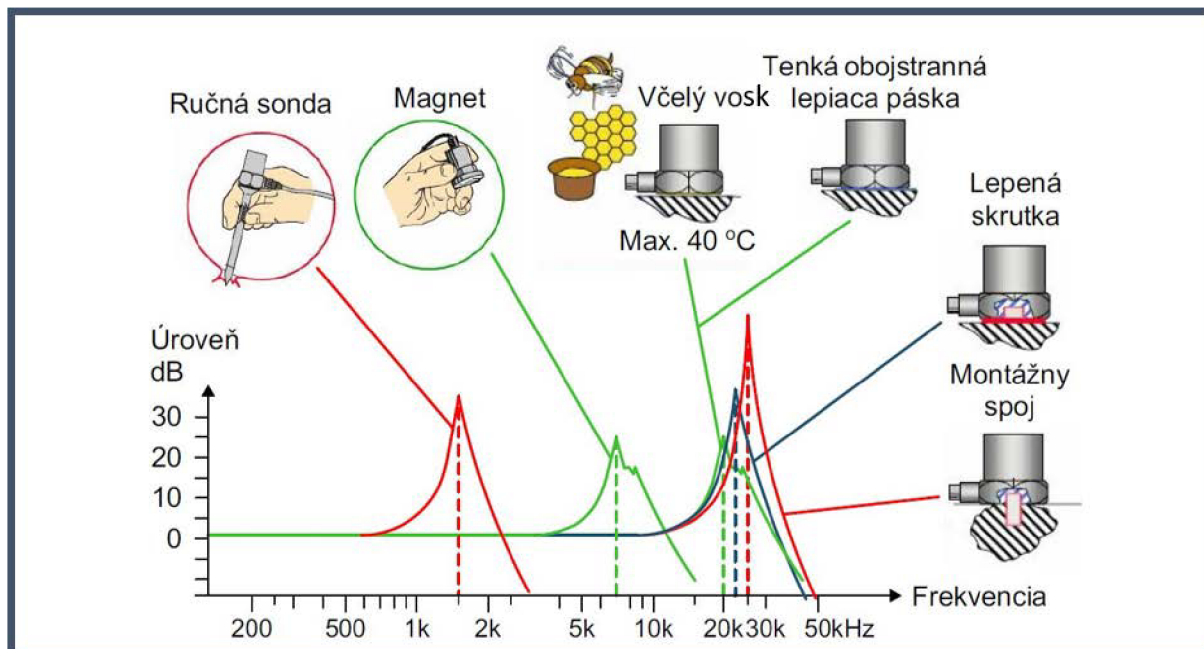
Vyrábajú sa tri druhy akcelerometrov tlakový, ohybový a smykový. Najčastejšie sa používajú snímače so šmykovým namáhaním piezokryštálu a najmenej s tlakovým, ktoré sú najviac náchylné na parazitné vplyvy. [5]

5.4.4 Umiestnenie a pripevnenie snímačov

Pre získanie korektných dát nie je rozhodujúci len správny výber diagnostikovateľného zariadenia a snímačov, ale taktiež spôsob umiestnenia a pripevnenia vybraných snímačov. Dôležité aspekty sú správna voľba umiestnenia snímača, vhodne zvolená poloha snímača s ohľadom na šírenie signálu. To znamená, čo najbližšie umiestnenie snímača k meranému miestu, pretože s väčšou vzdialenosťou dochádza k útlmu signálu. Pre správne umiestnenie snímača je potrebné sa zoznámiť s celou konštrukciou stroja. Pravidelné opakované merania je potrebné robiť za totožných podmienok (otáčky stroja, jeho zaťaženie a pod.) s rovnakým umiestnením snímačov. Nie je vhodné umiestňovať snímače na znečistené, alebo silno lakované a farebné povrchy. Medzi ďalšie negatívne vplyvy patrí vlhkosť, kyslé prostredie, radiácia, akustický šum, magnetické pole, či predpätie základne. [10]

Správny výber upevnenia snímačov má vplyv na frekvenčný rozsah. Najspoľahlivejšie uchytenie, ktoré len zanedbateľne ovplyvňuje frekvenčné charakteristiky je upevnenie snímačov závrtnými skrutkami. Pri správnom použití lepidla na vhodne upravenú plochu sa dosahuje veľmi dobrý frekvenčný rozsah. Avšak si treba dať pozor na maximálnu prevádzkovú

teplotu približne 80 až 100°C, pri ktorej lepidlo mäkne. Rýchly, nie príliš bežný spôsob upevnenia a menej spoľahlivý pôsob upevnenia je obojstrannou lepiacou páskou. Včelí vosk sa prioritne uplatňuje na uchytenie menších snímačov pri laboratórnych meraniach. V technickej diagnostike sa nevyužívajú, pretože majú obmedzený frekvenčný rozsah a jeho teplotná tolerancia je do teploty okolo 40°C. Ručná sonda a magnet sú najnepresnejšie, avšak najvyužívanejšie pri hľadaní vhodného umiestnenia snímača. Obr. 10) zobrazuje súhrn informácií. [5]



Obr. 10) Vplyv spôsobu pripevnenia snímača na jeho amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku [18]

5.5 Vyhodnocovanie vibrácií

Cieľom diagnostiky nie je meranie, ale vyhodnotenie stavu stroja. Pri plnení tohto cieľa sú nápomocné normy. Základné doporučené postupy pre meranie a hodnotenie absolútnych vibrácií sú vysvetlené v ČSN ISO 10816 Vibrácie – Hodnotenie vibrácií na základe merania na nerotujúcich častiach. Norma je založená na meraní celkovej efektívnej hodnoty rýchlosti vibrácií vo frekvenčnom pásme 10-1000 Hz. V norme sú pre rôzne typy strojov poskytnuté postupy pre hodnotenie stavu stroja na základe dvoch kritérií, a to veľkosť vibrácií a zmeny veľkosti vibrácií. [5]

Metódy vyhodnocovania vibrácií sú rozdelené do dvoch základných skupín do časovej a frekvenčnej oblasti. Pri analýze vibrácií sa používa omnoho častejšie frekvenčná analýza, vďaka poskytovaniu detailnejších informácií o signály. [19]

5.5.1 Analýza v časovej oblasti

Analýza signálu v čase umožňuje určovať celkovú úroveň vibrácií a časové priebehy určujúcich veličín. Najčastejšie sa sledujú efektívne, alebo špičkové hodnoty veličín vibrácií. Časový signál je možné popísať nasledujúcimi charakteristikami: [20]

- **Vrcholovou veličinou**, označovanou aj ako výkmit x_a . Udáva maximálnu hodnotu amplitúdy a používa sa napríklad na popis krátkodobých javov a mechanických rázov.

- **Efektívnou hodnotou**, ktorá je označovaná aj skratkou RMS z anglického Root Mean Square. Z hľadiska popisu chvenia je najpoužívanejšia a najdôležitejšia, pretože nesie dôležitú informáciu o časovom priebehu kmitania.

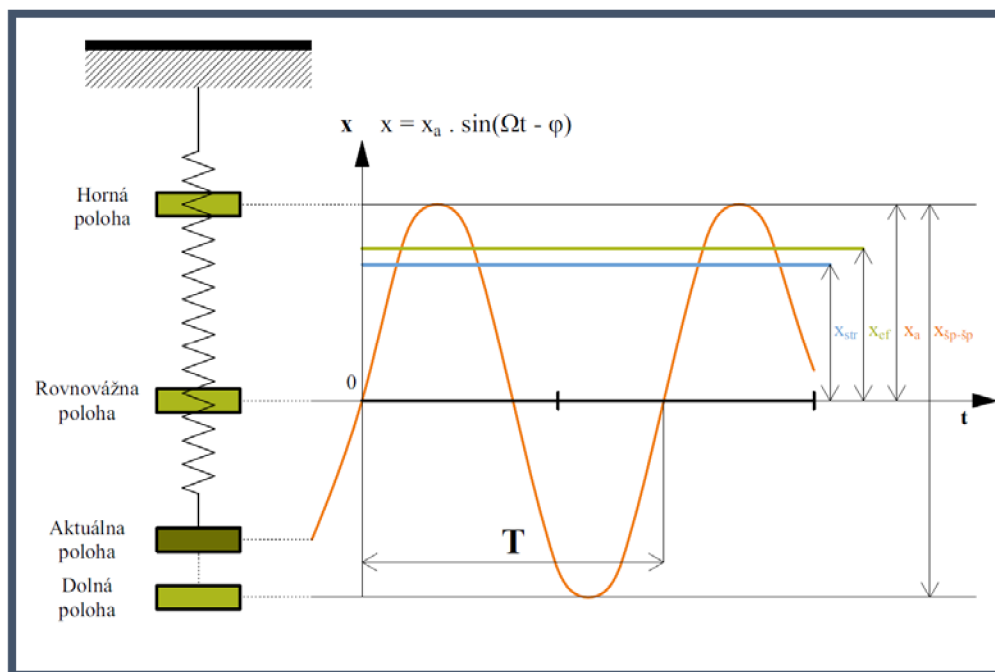
$$x_{ef} = x_{RMS} = 0,707 \cdot x_a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 dt} \quad (15)$$

- **Strednou hodnotou**, ktorá popisuje priebeh hodnoteného chvenia. Nemá veľký význam, pretože nemá vzťah k žiadnej dôležitej fyzikálnej veličine.

$$x_{str} = 0,637 \cdot x_a = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| dt \quad (16)$$

- **Maximálnym rozkmitom**, tiež označovaným dvojitá amplitúda od špičky k špičke. Popisuje chvenie z hľadiska maximálneho prípustného mechanického namáhania a konštrukčných vôlí.

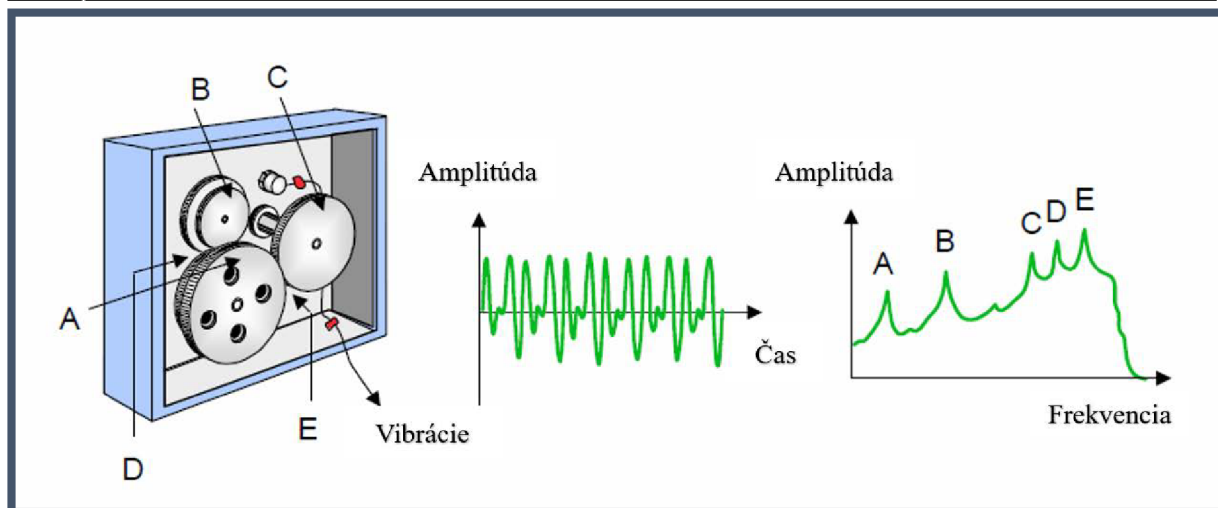
$$x_{\text{šp-šp}} = 2 \cdot x_a \quad (17)$$



Obr. 11) Popis harmonického pohybu veličinami [5]

5.5.2 Analýza vo frekvenčnej oblasti

Frekvenčná analýza umožňuje lokalizovať vznikajúce poruchy jednotlivých častí sledovaného strojného zariadenia. Úplná frekvenčná analýza poskytuje amplitúdové a fázové spektrum signálu. Fázové spektrum sa využíva pri identifikácii väd na rotujúcom stroji, ako je napr. nevyváženosť ozubených ložísk. Na obr. 12) je zobrazený prevod z časovej do frekvenčnej oblasti modelu s niekoľkými zdrojmi vibrácií, ktoré sa vo frekvenčnej analýze zobrazia ako viditeľné špičky. [21]



Obr. 12) Princíp frekvenčnej analýzy [22]

Frekvenčná analýza sa realizuje pomocou Fourierovej transformácie, rozkladu do Fourierovej rady.

Rýchla Fourierova transformácia

Fast Fourier Transformation (FFT) je najčastejšie používanou analytickou metódou. Princíp metódy spočíva v schopnosti vyhľadať periodické deje v signály, ktoré sú podľa príslušnej frekvencie zobrazené vo frekvenčnom spektre. Frekvenčné spektrum je graf s rozkladom časového signálu na množstvo sínusových signálov s príslušnou amplitúdou a počiatočnou fázou. [5]

5.6 Meranie vibrácií na obrábacích strojoch

Základným vybavením moderných obrábacích strojov je diagnostický systém vyhodnocujúci prevádzkové parametre ako sú teploty, prietoky a tlaky. Uvedené veličiny slúžia ako informácie o vzniknutej poruche. Pri prekročení nastavenej medze veličín sú stroje naprogramované napríklad na zastavenie prevádzky. Tieto krátkodobé informácie nedokážu predikovať životnosť jednotlivých komponentov. A práve preto sa využíva manažment prediktívnej a proaktívnej údržby, ktorý využíva sofistikovanejšie diagnostické systémy, medzi ktoré patrí napríklad aj vibrodiagnostika. [23]

Vibračnú diagnostiku je možné rozdeliť podľa spôsobu vykonávaného merania na pochôdzkovú a online diagnostiku.

5.6.1 Pochôdzková vibračná diagnostika

Pochôdzková diagnostika spočíva v periodickom meraní vibrácií technickým diagnostikom na vytipovaných strojných zariadeniach. Vibrácie meria pomocou prenosného analyzátora a následne analyzuje zaznamenané dáta v svojej pracovni. Životnosť jednotlivých komponentov nám umožňuje predpovedať opakované meranie pri rovnakých podmienkach v pravidelných časových intervaloch. [23]

Výhody pochôdzkovej diagnostiky oproti online diagnostike sú: [23]

- nižšie obstarávacie náklady,
- viac nástrojov a možností pre podrobné vyhodnotenie,
- meranie viacero strojov jedným analyzátorom.

Taktiež má tento prístup aj svoje nevýhody, najmä pri použití na obrábacích strojných zariadeniach. Závažné poruchy často nastávajú vplyvom kolízie nástroja s obrobkom. U obrábacích strojov len zriedkakedy dochádza k prirodzenému opotrebeniu, ako napr. valivých dráh ložísk. Najčastejšie sú príčinou porúch vôľa v upínacom kuželi vretena, deformácia ložísk a pod. Prevádzka obrábacích strojov je charakteristická rýchlými zmenami otáčok a rozdielnym zaťažením. Väčšina operácií je vykonávaná v krátkych cykloch, čo urýchľuje vznik poruchy. Pomocou pochôdzkovej diagnostiky nemožno získať včasnú informáciu o vzniknutom probléme. Nevýhodou je aj fakt, že pochôdzkovým analyzátorom poväčšine nie je možné analyzovať obrábací proces, a to kvôli problému s umiestnením senzorov a kabeláže. Analýza stavu ložísk, vôlí a pod. sa meria pri chode na prázdno, čo môže narušiť výrobné plány. [23]

5.6.2 Online vibračná diagnostika

Pri online neustálej vibrodiagnostike je na stroj trvalo nainštalované diagnostické zariadenie, ktoré kontinuálne sleduje stav stroja a signalizuje prekročenie medzí. Zároveň umožňuje vzdialenú správu dát. Tento prístup merania umožňuje zaznamenať náhle zhoršenie stavu a zabezpečiť tak včasný zásah údržby. Všeobecne online systémy nedokážu vykonať tak detailnú analýzu ako u pochôdzkovej diagnostiky. Ideálne je využívať oba prístupy. Online diagnostika zaistí včasné upozornenie a technik s pochôdzkovým analyzátorom vykoná podrobnejšiu analýzu - lokalizuje vadu, určí závažnosť poškodenia a pod. [23]

Najvhodnejší výber monitorovania touto metódou je veľkosériová výroba, kedy stroj dlhodobo obrába rovnaký typ obrobku za konštantných podmienok. V takomto prípade je možné sledovať i otupenie jednotlivých nástrojov. Pri monitorovaní obrábacích strojov sa najčastejšie sledujú tieto javy: [23]

- nevyváženosť vretena,
- kolízie nástrojov,
- ložiská vretena,
- monitorovanie vibrácií pri obrábacom procese,
- optimalizácia obrábacieho procesu na základe uložených dát.

6 ONLINE VIBRODIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY

Online monitorovanie strojných zariadení je v podstate automatizované, nepretržité monitorovanie strojov. Jedná sa o súčasť najvyššej stratégie údržby, a to proaktívnej metódy vibrodiagnostiky. Online monitorovacie systémy umožňujú neustále sledovať najaktuálnejšie informácie strojných zariadení, ktoré pomáhajú optimalizovať prevádzku kľúčových výrobných aktív. Tieto systémy umožňujú periodický zber dát a uľahčujú proaktívny prístup k spoľahlivosti s nepretržitým monitorovaním strojných zariadení, a to aj vo vzdialených, nebezpečných, alebo ťažko dostupných miestach.

V súčasnej dobe je na trhu široké spektrum online vibrodiagnostických systémov. S rozvojom výpočtovej techniky klesajú aj ich obstarávacie náklady. V kapitolách nižšie porovnáam online vibrodiagnostické meracie systémy rôznych výrobcov.

6.1.1 Adash spol. s.r.o.

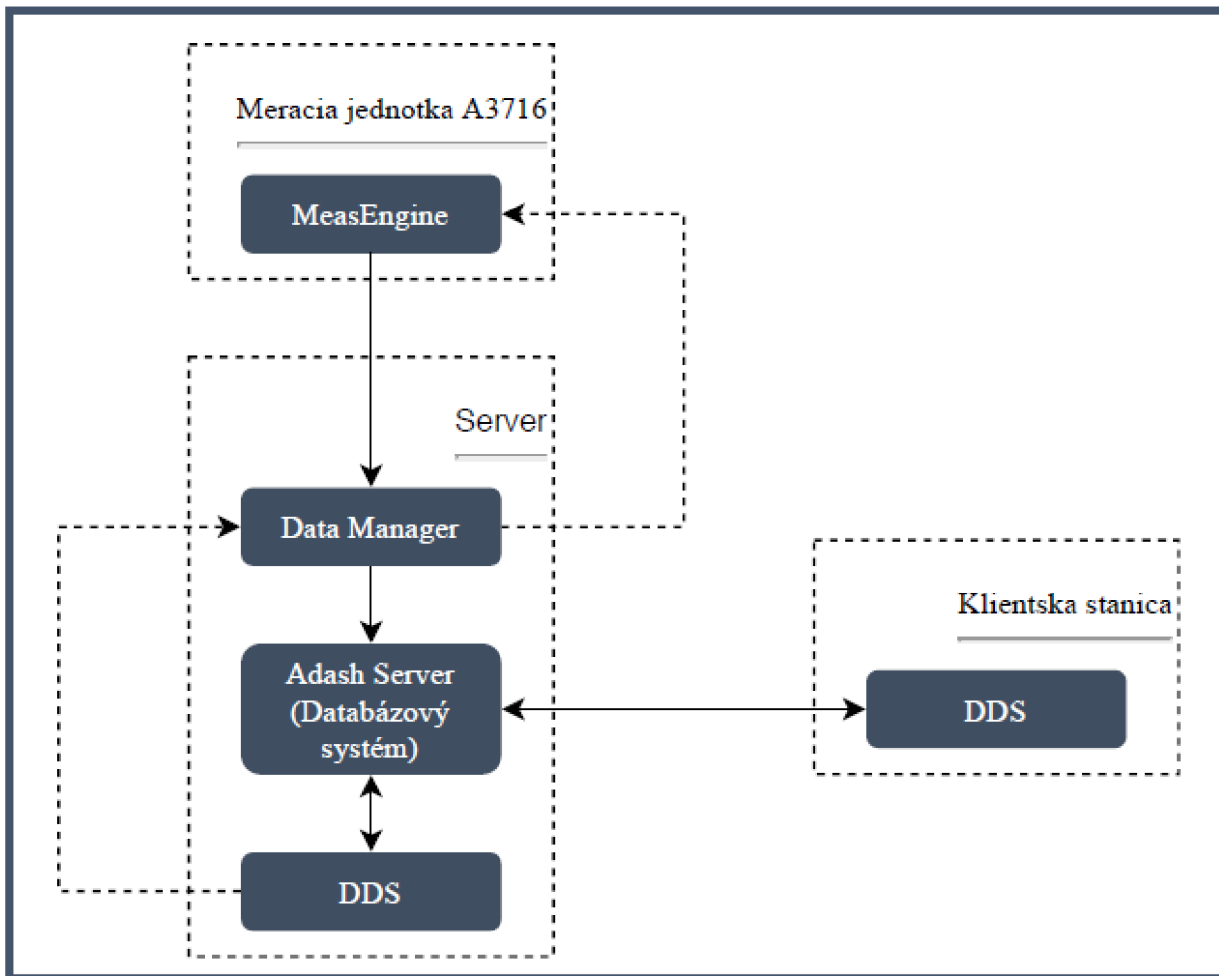
Adash je česká firma zaoberajúca sa výrobou a vývojom zariadení a softwaru v oblasti vibrodiagnostiky a monitorovania stavu strojných zariadení. Firma vznikla v roku 1991, kedy dvaja zakladatelia vytvorili vlastný software pre modálne analýzy a prevádzkové odchýlky. O niekoľko rokov neskôr ako prvý vo svete vydali software na správu dát o vibráciách pod operačným systémom Windows s názvom DDS, ktorý je využívaný dodnes. Ich prvý vibračný analyzátor prišiel na trh v roku 1995 pod názvom A4101. O rok neskôr vyvinuli ich prvý online vibrodiagnostický systém A3600. [24]

V súčasnej dobe táto firma ponúka 3 online meracie systémy. Pre opis a následné porovnanie som si vybrala aktuálne najnovší systém, ktorý podrobnejšie opíšem.

Software Adash Online Server

Logická architektúra programov pre online zber dát Softwaru Adash Online Server sa skladá z nasledujúcich programov: [25]

- *Software DDS* je diagnostický nástroj pre zber, archiváciu a vyhodnocovanie dát. V súvislosti s online meraním sa využíva aj pre konfiguráciu meraní.
- *Databázový systém MySQL* je súčasťou balíčku Adash server. Tento program sa stará o fyzické uloženia a poskytnutie nameraných dát.
- *Data Manager* je program, ktorý zbiera namerané dáta z meracej jednotky a posúva ich ďalej k uloženiu databázovému systému. Jedná sa o pasívny člen, je súčasťou DDS a mal by byť spustený len na servery.
- *Meas Engine* je software v jednotke A3716. Vykonáva zadané meranie a poskytuje namerané dáta programu Data Manager.



Obr. 13) Logická architektúra Softwaru Adash Server [25]

Meracia jednotka A3716

Systém A3716 môže pracovať samostatne, alebo môže byť nadstavbou súčasného ochranného systému. Taktiež môže byť použitý ako viackanálový analyzátor. Jednotka obsahuje 16 AC, 16 DC kanálov a 4 TACHO vstupy. Všetky kanály sú merané simultánne. Z jednotlivých modulov sa dá jednoducho skladať a vytvárať mnohokanálové systémy. V porovnaní so staršími jednotkami meria spojite a neprerušovane, vďaka adaptívnemu inteligentnému systému zberu dát. Systém neustále monitoruje vybrané strojné zariadenia a adaptívne ukladá dáta do počítača. Dáta pre správu a analýzu sú prístupné z rôznych pracovísk. [25]

Tab 1) Technické parametre meracej jednotky A3716 [25]

A3716	
Vstupy AC	16 AC, ICP® napájanie ZAP/VYP vstupná impedancia 100kΩ jednoduchá a dvojitá integrácia high pass filtr 1 Hz - 12 800 Hz low pass filtr 25 Hz - 25 600 Hz
Vstupy DC	16 DC pro procesné veličiny vstupná impedancia 100 kΩ (VDC), 250 Ω (mADC)
Tacho vstupy	4 nezávislé TACHO vstupy pre externý trigger rozsah otáčok 0,8 Hz - 1000 Hz
Vstupný rozsah	AC ± 12 V špička-špička DC ± 24 V alebo 4 - 20 mA TACHO +10V
AD prevodník	24 bit, 64 bitov spracovanie signálu
Dynamický rozsah S/N	120 dB
Frekvenčný rozsah	0 do 25,6 kHz (16 Ch, 65,5 kHz vzorkovania)
FFT rozlíšenie	Mín. 100 čiar Max. 25 600 čiar
Spracovanie dát	Širokopásmové hodnoty Časové signály FFT v reálnom čase DEMODO - ENVELOPE analýza ACMT – analýza pomalobežných ložisiek Radová analýza Užívateľská definícia pásiem Meranie otočiek Meranie DC signálu Orbity
Rekordér signálu	64 kHz vzorkovacia frekvencia 4 Ch – spotreba pamäti 3 GB/hod 4 Ch celková doba nahrávania 10h
Komunikačný protokol	Ethernet 1GB RJ45

6.1.2 PRÜFTECHNIK Dieter Busch AG

Prüftechnik je nemecká spoločnosť založená v roku 1972 vynálezcom moderného laserového zarovnaní hriadeľa. Firma je globálnym dodávateľom technológie údržby so širokým sortimentom produktov, služieb a školením. Prispôsobených potrebám odborníkov v oblasti údržby, hriadeľov, analýzy vibrácií, monitorovania stavu a nedeštruktívnych skúšok. [26]

V Českej republike a na Slovensku zastupuje Prüftechnik firma Lami Kappa.

Software OMNITREND

Software Omnitrend je kompatibilný so všetkými diagnostickými zariadeniami od firmy Prüftechnik. Program sa používa pre konfiguráciu meracích miest a k programovaniu cyklov merania. Taktiež vyhodnocuje, dokumentuje a archivuje namerané hodnoty (trend, spektrum, časový signál).

VIBRONET Signalmaster

Vibronet Signalmaster je online monitorovací systém pre sledovanie rozsiahlych strojných závodov, má až 162 meracích bodov. Je ideálny pre monitorovanie motorov, čerpadiel, ventilátorov, ozubených prevodov a ostatných štandardných strojov. Vibračné, teplotné a ďalšie parametre procesu môžu byť integrované do monitorovacej siete, ktorá pokrýva celé úseky závodu. Vibronet Signalmaster je ľahko rozširiteľný. [27]

Stav systému je možné sledovať na webových stránkach, postačujúce je len pripojenie k internetu. V prípade neštandardného stavu reaguje napr. zopnutím výstupného signálu, alebo odoslaním upozornenia cez email. Zaznamenané údaje sa analyzujú v Omnitrend, univerzálnej softvérovej platforme. [27]

Základná jednotka tohto systému je VIB 5.802, jej podrobnejší popis sa nachádza v nasledujúcej tabuľke.

Tab 2) Technické parametre meracej jednotky VIB 5.802 [27]

VIB 5.802	
Analogové vstupy (AI)	6 diferenciálnych vstupov (3 z nich synchronne)
Digitálne vstupy (DI)	vstup: 4 x, TTL...30 V, výstup: 8 x, 5 V, 5 mA
AD prevodník	16-bit
Vstupný rozsah	AI ± 10 V, ± 1 V, ± 100 mV, ± 10 mV DI + 30 V Diferenciálny vstup ± 12 V
Vzorkovanie, AI	153.6 / 76.8 / 38.4 / 19.2 / 9.6 kHz SW: 4.8/ 2.4/ 1.2/ 0.6/ 0.3/ 0.15 kHz
Dynamický rozsah	96 dB
Frekvenčný rozsah	0 Hz do 50 kHz, rozdelené do 11 pásem
FFT rozlíšenie	Min. 400 čiar Max. 12800 čiar
Spracovanie dát	Časový signál Spektrum Jednoduchá integrácia spektra Obálka Rázové pulzy Zrychlenie (RMS) Rýchlosť vibrácií (špička, RMS)
Prevádzkové režimy	Analýza frekvenčného pásma Prechodná pamäť Online klasifikácia Trendy
Komunikačný protokol	TCP/IP Internet protokol sériové káblové pripojenie cez rozhranie RS232 (protokol PPP)

6.1.3 SKF Group Headquarters

Spoločnosť SKF je švédská firma založená v roku 1907. Sú svetovým dodávateľom produktov, riešení a služieb v oblasti ložísk, tesnení, mazacích systémov a služieb. Táto firma ponúka širokú škálu systémov pre monitorovanie stavu objektov od jednoduchých základných výrobkov po moderné komplexné systémy na monitorovanie stavu a ochranu do celofiremej riadiacej platformy. Taktiež ponúkajú technické konzultácie, či školenia vibračnej diagnostiky. [28]

Firma SKF má na trhu širokú škálu online vibrodiagnostických systémov. V tab 3) sú vymenované ich súčasné inteligentné monitorovacie systémy, ktoré sú nazvané anglickou skratkou IMx -Intelligent Monitoring (generation) x. Prvá IMx-T jednotka bola vyvinutá v roku 2007. [28]

Tab 3) Prehľad IMx systémov od SKF [28]

Imx	Aplikácia
16Plus	16-kanálová jednotka s wi-fi a mobilnou komunikáciou
8	8-kanálová jednotka
B	Bogie - podvozky (monitorovanie vlakov a iných vozidiel)
C	Customised - prispôsobivý (na integráciu do kontrolných skriň a riešení na mieru)
M	Machinery protection - ochrana a monitorovanie stavu strojov
R	Railway - vlaky a metrá
P	Portable - prenosný, riešenie problémov pre všetky typy strojov
W	Wind - veterné turbíny
S	Standard - monitorovanie stavu na všeobecné účely, napr. papierenské a tlačiarenské stroje, turbíny
T	Turbo - dohľad nad strojmi, funkčne nahradený Imx M

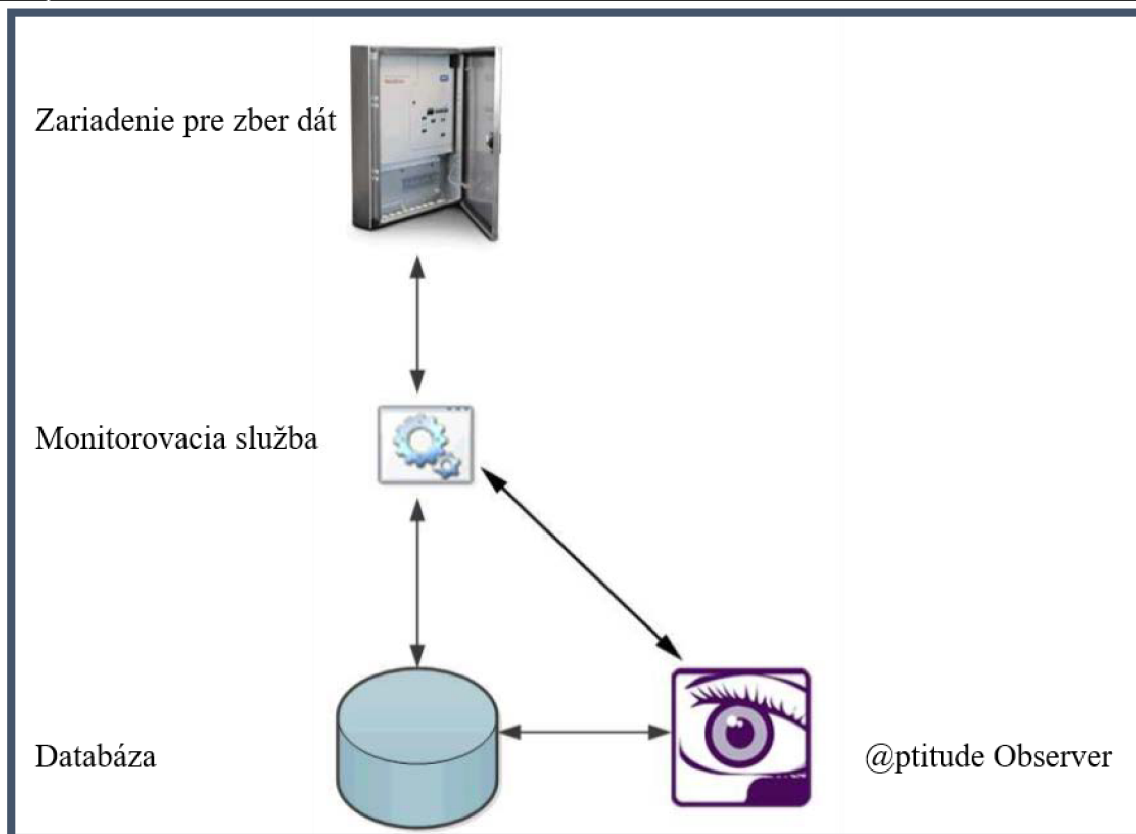
Software @ptitude Observer

Software @ptitude Observer od firmy SKF poskytuje používateľom všetkých úrovní inteligentné diagnostické nástroje potrebné na nastavenie a spustenie online monitorovacích programov. Tento program podporuje všetky IMx zariadenia. Program podporuje rýchle ukladanie údajov na stovkách monitorovacích počítačov a umožňuje neobmedzený počet úrovní hierarchie. Logická architektúra systému je zobrazená na obr. 14). [29]

Software funguje v spojení s databázovým serverom Microsoft SQL. Pri plnej verzii softwaru je veľkosť databázy prakticky neobmedzená. Všetky uložené dáta sú označené dátumom a časom. [29]

Možnosti komunikácie je niekoľko. Štandardné rozhranie TCP/IP umožňuje jednoduchú komunikáciu napríklad prostredníctvom optických vlákien, internetu, či pomocou štandardnej Ethernetovej siete. [29]

V mojej práci bolo použité pripojenie s IMx-8 jednotkou pomocou Ethernetovej siete, a to konkrétne LAN kábla na školskej sieti. Z dôvodu fyzického zákazu študentov na škole som pre pripojenie používala virtuálny počítač. Dokumentácia postupu práce v programe @ptitude Observer sa nachádza v prílohe B.



Obr. 14) Logická architektúra @ptitude Observer [29]

IMx-8

Jednotka IMx-8 má 8 analógových a 2 digitálne kanále s možnosťou pripojenia sa k mobilným zariadeniam a sieťam pre jednoduchú konfiguráciu a monitorovanie. Montujú sa na DIN lištu, alebo môžu byť umiestnené v skrinke so stupňom ochrany IP65, ktorá poskytuje dostatočnú ochranu v náročných priemyselných podmienkach. [28]

Firma SKF ponúka aj aplikáciu IMx manager na konfiguráciu a monitorovanie priamo z iOS, alebo Android zariadenia. [28]

Tab 4) Technické parametre meracej jednotky VIB 5.802 [28]

Imx-8	
Analógové vstupy	8 (A1-A8) impedancia >100k Ω
Digitálne vstupy	2 (D1-D2) impedancia 1,6k Ω
Vstupný rozsah	AI $\pm 25V$ ($\pm 28V$ bez poškodenia) DI kladné napätie do 24 V (+27 bez poškodenia)
AD prevodník	24-bit (jeden A/D prevodník na kanál)
Dynamický rozsah S/N	120 dB
Frekvenčný rozsah	AI: 0 až 40 kHz (Maximálna vzorkovacia frekvencia 102,4 kHz) DI: 0,016 Hz - 20 kHz
FFT rozlíšenie	Min. 100 čiar Max. 6 400 čiar
Spracovanie dát	Obálka zrýchlenia (gE) Časovo synchronne spriemerovanie (TSA) FFT a časový priebeh Orbitálna analýza Integrácia / diferenciácia vo frekvenčnej oblasti Súčasné uloženie rýchlosti otáčania (alebo iného analógového parametra) spolu s vibráciami merania Parametrické hradlo (Zachytáva vibračné signály pri rôznych rýchlostiach a podmienkach zaťaženia) Adaptívny alarm
Komunikačný protokol	Modbus RTU, Modbus TCP / IP IEC 61850 (pre komunikačné siete v prostredí stanice)

6.1.4 National Instruments

Spoločnosť National Instruments je americká firma založená v roku 1976. Spoločnosť NI vyvinula vysoko výkonné automatizované testy a automatizované meracie systémy. Platforma NI obsahuje tri kľúčové prvky: produktívny softvér, modulárny hardvér a rozsiahly ekosystém. Softvér je základným prvkom tejto platformy. [30]

Software LabView

LabView ponúka grafický programovací prístup, ktorý pomáha vizualizovať všetky aspekty aplikácie vrátane hardvérovej konfigurácie, nameraných údajov a ladenia. Používa pokročilú analýzu merania a digitálne spracovanie signálu. Na ovládanie zariadenia a zber dát sú využívané meracie karty. [30]

V mojom prípade v programe LabView bolo nastavené meranie 5 100 vzoriek pri rýchlosti 10 240 Hz. Taktiež bolo v programe nastavené ukladanie do súboru.

NI 9234

NI 9234 je štvorkanálový modul na získavanie dynamického signálu. Modul je ideálny pre monitorovanie stavu priemyselných strojov, monitorovanie hluku, vibrácií a tvrdosti. [31]

Tab 5) Technické parametre meracej jednotky NI 9234 [31]

NI 9234	
Analógové vstupy	4
Vstupný rozsah	± 5 V
AD prevodník	24-bit
Dynamický rozsah S/N	102 dB
Frekvenčný rozsah	vzorkovacia frekvencia na kanál 51,2 Hz
Komunikačný protokol	Wi-Fi / Ethernet USB

6.2 Porovnanie online diagnostických zariadení

Z tabuliek technických parametrov v kapitole 6 vyplýva, že každý výrobca online diagnostických zariadení má katalógové prístroje s podobnými parametrami spĺňajúcimi požiadavky pre online vibrodiagnostiku. Použitú meraciu jednotku v praktickej časti NI 9234 s ostatnými spomenutými online diagnostickými systémami neporovnávam.

7 METROLÓGIA TEXTÚRY POVRCHU

Textúra povrchu je definovaná buď opakovanými, alebo náhodne usporiadanými odchýlkami od geometrického tvaru, ktoré tvoria trojrozmernú topografiu povrchu. Štruktúra povrchu je charakterizovaná stopami po obrábaní, vlnitosťou, drsnosťou, chybami a úchylkami tvaru na obmedzenej ploche povrchu. [32]

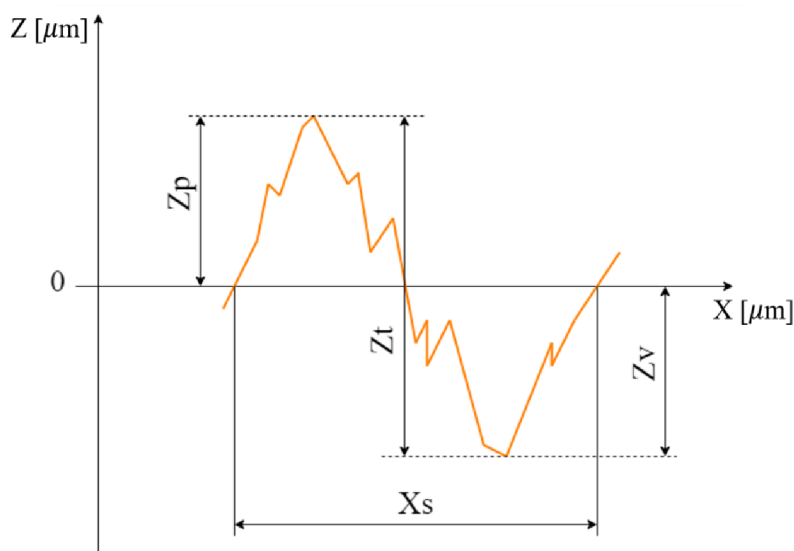
Analýza povrchu môže byť profilová, plošná, alebo plošne integračná. V mojej diplomovej práci popíšem bližšie výškové parametre profilovej a plošnej metódy,

7.1 Profilová metóda

Profilová metóda je založená na matematicko-štatistickom spracovaní dát základného profilu. Základný profil je výsledkom úpravy profilu skutočného povrchu. Zo základného profilu je možné odfiltrovať profil drsnosti a profil vlnitosti. Filter λ_s určuje rozhranie medzi drsnosťou a kratšími zložkami vln. Filter λ_c definuje rozhranie medzi drsnosťou a vlnitosťou. Filter λ_f definuje rozhranie medzi vlnitosťou a dlhšími zložkami vln. [32]

Profilové parametre textúry povrchu sa určujú na základnej dĺžke l_r , alebo na vyhodnocovanej dĺžke l_n , obe hodnoty sú v mm . Obvykle sa vyhodnocovacia dĺžka rovná päťnásobku základnej dĺžky. [32]

Prvok profilu predstavuje najmenšie častice analýzy. Jedná sa o výstupok profilu a príľahlú priehlbinu. Výška prvku profilu Z_t je súčtom Výšky výstupku Z_p a absolútnej hodnoty hĺbky priehlbiny Z_v . Šírka prvku profilu je označená ako X_s . Tieto parametre sú zobrazené na obr. 15). [32]



Obr. 15) Prvok profilu

Vybrané výškové parametre textúry povrchu: [32]

- R_p – najväčšia výška výstupku posudzovaného profilu: je výška najväčšieho výstupku profilu v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_p = \max (Zp_i) \quad (18)$$

- R_v – najväčšia hĺbka priehlbiny posudzovaného profilu: je hĺbka maximálnej priehlbiny profilu drsnosti v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_v = \max (|Zv_i|) \quad (19)$$

- R_z – najväčšia výška profilu drsnosti: je súčet výšky najväčšieho výstupku profilu a hĺbky najnižšej priehlbiny profilu v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_z = R_p + R_v \quad (20)$$

- R_c – priemerná výška prvku profilu drsnosti: je priemerná hodnota výšok prvkov profilu v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (21)$$

- R_t – celková výška profilu drsnosti: je súčet výšky najvyššieho výstupku a hĺbky najnižšej priehlbiny profilu v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky.

$$R_t = Zp + Zv \quad (22)$$

- R_a – priemerná aritmetická úchylka posudzovaného profilu drsnosti: je aritmetický priemer absolútnych hodnôt súradníc $Z(x)$ v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_a = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (23)$$

- R_q – priemerná kvadratická úchylka posudzovaného profilu: je kvadratický priemer súradníc v rozsahu základnej dĺžky.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (24)$$

Rsk – šikmosť posudzovaného profilu drsnosti: je podiel priemernej hodnoty tretích mocnín súradníc $Z(x)$ a tretej mocniny hodnoty Rq v rozsahu základnej dĺžky.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (25)$$

- Rku – špicatosť posudzovaného profilu drsnosti: je podiel priemernej hodnoty štvrtých mocnín súradníc $Z(x)$ a štvrtej mocniny hodnoty Rq v rozsahu základnej dĺžky.

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad (26)$$

Podrobnejšie informácie o profilovej metóde sa nachádzajú v norme ČSN EN ISO 4287. [33]

7.2 Plošná metóda

Plošná metóda je založená na matematickom spracovaní dát získaných z modelu neideálneho povrchu. Plošné parametre sú vyhodnocované na S-F, alebo S-L povrchu. Povrch S-F je odvodený zo základného povrchu pomocou odstránenia tvaru s použitím F operácie. Predstavuje plošný ekvivalent základného profilu. S-L povrch je odvodený od S-F povrchu odstránením stanovených zložiek pri použití L filtru. Tento povrch je ekvivalentom profilu drsnosti. [34]

Norma ČSN EN ISO 25178-2 sa podrobnejšie zaoberá plošnou metódou. Sú v nej uvedené plošné parametre rozdelené do nasledujúcich skupín výškové, priestorové, hybridné, funkčné a zmiešané. Ja bližšie rozoberiem výškové parametre. Základné pojmy sú zobrazené na obr. 16).

Výškové parametre textúry povrchu: [34]

- Sq – priemerná kvadratická výška posudzovaného povrchu: je daná strednou kvadratickou hodnotou súradníc vo vnútri definičnej plochy.

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (27)$$

- Ssk – šikmosť posudzovaného povrchu.

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (28)$$

- Sku – špicatosť posudzovaného povrchu.

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (29)$$

- S_p – maximálna výška vrcholu posudzovaného povrchu.

$$S_p = \max\{z_p(x, y)\} \quad (30)$$

- S_v – maximálna hĺbka dna posudzovaného povrchu.

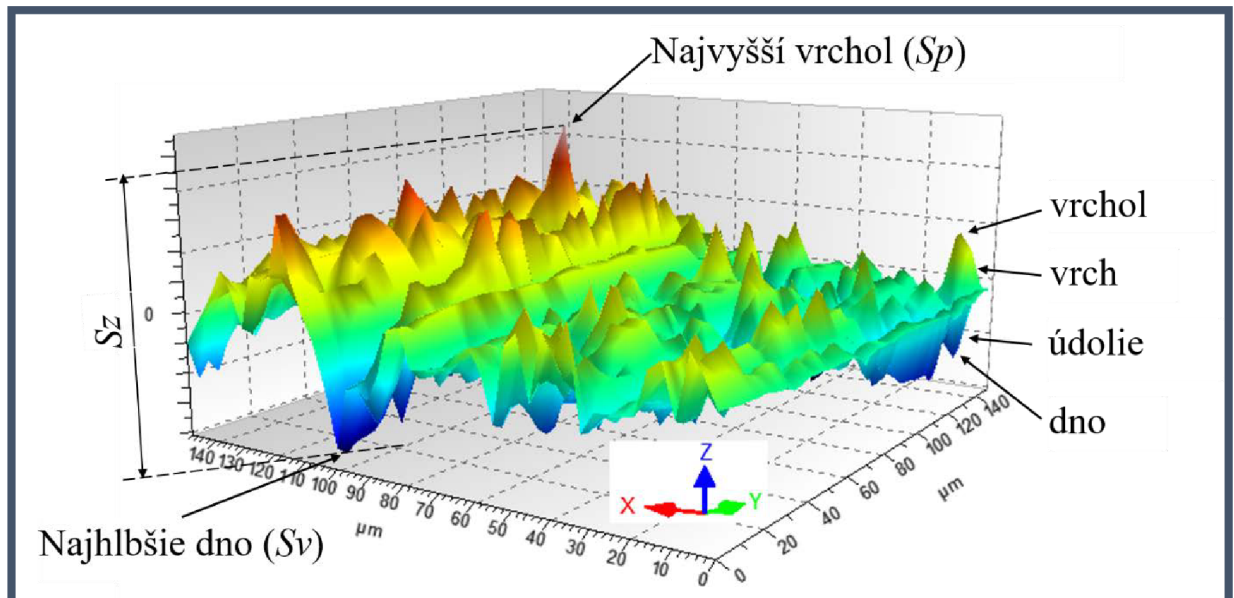
$$S_v = \max\{|z_v(x, y)|\} \quad (31)$$

- S_z – maximálna výška posudzovaného povrchu.

$$S_z = S_p + S_v \quad (32)$$

- S_a – priemerná aritmetická výška posudzovaného povrchu.

$$S_a = \frac{1}{|A|} \iint_A z^4(x, y) dx dy \quad (33)$$



Obr. 16) Zobrazenie základných pojmov plošnej metódy - upravenie obr. podľa [34]

8 ONLINE VIBRODIAGNOSTICKÁ ANALÝZA

Praktické meranie bolo realizované bez mojej prítomnosti, kvôli mimoriadnemu opatreniu ministerstva zdravotníctva, konkrétne zákazu osobnej prítomnosti študentov na školách. Namerané dáta a fotodokumentácia mi bola poskytnutá mojím vedúcim práce.

8.1 Obrábacie centrum MCV 754 QUICK

Meranie bolo vykonané na obrábacom stroji MCV 754 QUICK od českej firmy Kovosvit MAS. Firma bola založená v roku 1939, a v súčasnej dobe je lídrom vo výrobe multifunkčných obrábacích strojov v Českej republike. [35]

Jedná sa o vertikálne 3-osé obrábacie centrum s rámom v tvare C. Usporiadanie a tvar nosného rámu je skonštruované s ohľadom na vysokú tuhosť a stabilitu. Pri obrábaní aplikácia lineárneho a valivého vedenia garantuje požadovanú presnosť a dynamiku. [35]

Strojné zariadenie je vyrobené pre náročné práce v kusovej a sériovej výrobe. Dostupné úkony sú vystružovanie, vrtanie, vyvrtávanie, frézovanie a rezanie závitov. Štandardné určenie stroja je pre obrábanie materiálov z ocelí, liatin, neželezných farebných kovov a plastických hmôt upnutých na pracovnom stole. Vreteno je vybavené upínacím kuželom ISO 40, stredovým upínaním nástrojov a ložiskami s oceľovými guľičkami. Rotačný zásobník disponuje mechanickou rukou pre 24 nástrojov. Jeho ovládanie a uvoľňovanie nástrojov vo vretene je pneumatické. Pohony vretena a posuvov sú prevedené regulačnými motormi. [36]

Základná technická špecifikácia stroja je zobrazená v tab 6).

Tab 6) Základné technické dáta obrábacieho stroja MCV 754 QUICK [35]

	Popis	Rozmer	Jednotka
Stôl	Upínacia plocha stolu	1000 x 500	mm
	Max. zaťaženie stolu	400	kg
Pracovný rozsah	X-osa	754	mm
	Y-osa	500	mm
	Z-osa	550	mm
Vreteno	Max. otáčky vretena	10 000	min-1
Presnosť ČSN ISO 230-2	Presnosť nastavenia polohy	0,012	mm
	Opakovateľnosť nastavenia polohy	0,005	mm

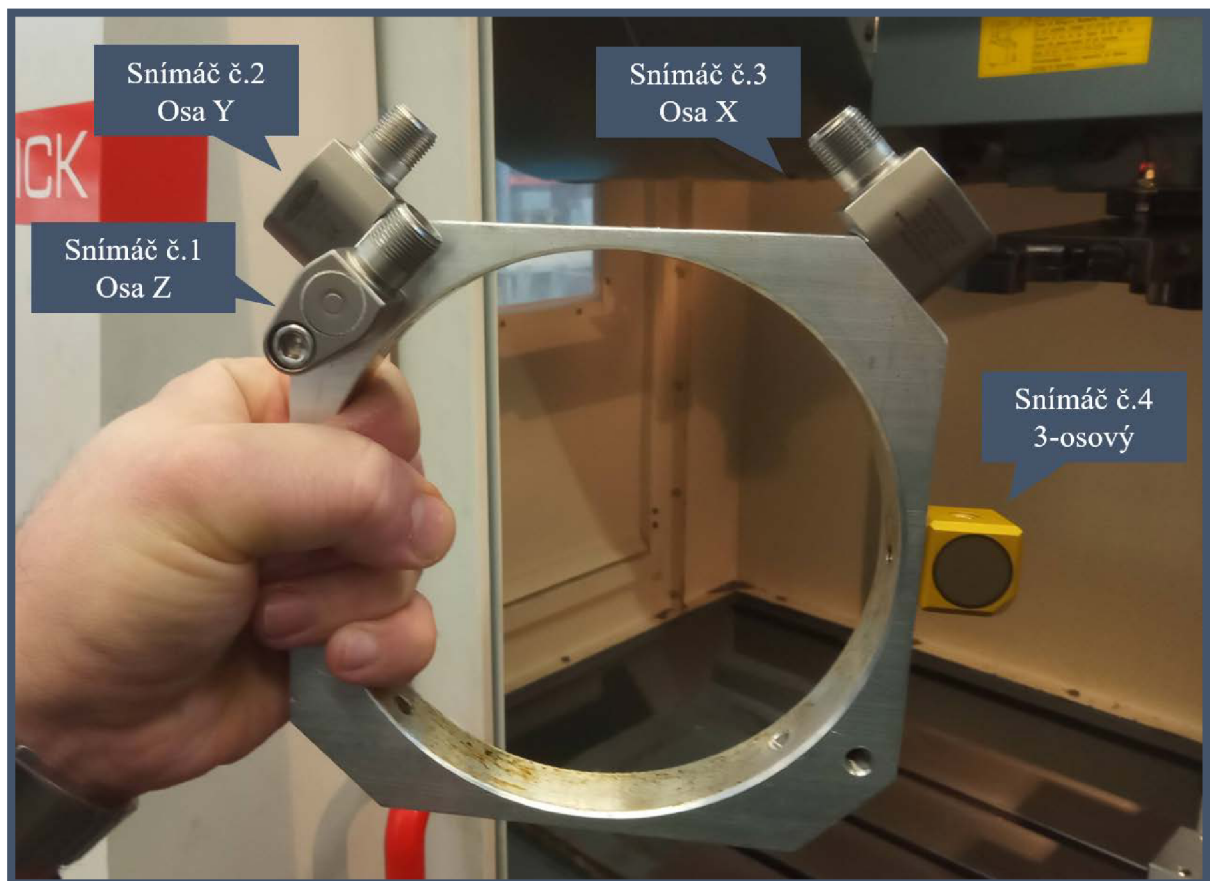
Obrábacie centrum je umiestnené na fakulte strojného inžinierstva v budove C1. Strojné zariadenie bolo zakúpené v roku 2012. Nakoľko je stroj výukový výrobca ho neustále vylepšuje za účelom testovania nových technológií. Používanie stroja je zriedkavé, používa sa len na úlohy vo výučbe, vykonávajú sa na ňom merania. V prípade potreby ústavu, projektov, záverečných prác a podobne sa obrábajú polotovary. Priemerné vyťaženie je odhadom 10 hodín za mesiac. Stroj je ovládaný jedným hlavným operátorom, vo výnimočných prípadoch môže byť ovládaný ďalšími dvoma operátormi.

8.2 Snímače

Snímanie vibrácií bolo uskutočnené pomocou štyroch senzorov prišraubovaných na objímku. Objímka bola primontovaná na vreteno obrábacieho stroja. Umiestnenie a popisanie osí merania snímačov na objímke je zobrazené na obr. 17). Snímače č.1-3 boli súčasťou online diagnostického systému od SKF, ktorý je popísaný v kapitole 6.1.3. Súbežne s týmto systémom meral vibrácie trojosový snímač č.4. Snímač č.4 bol súčasťou online diagnostického systému od NI, ktorý je popísaný v kapitole 6.1.4. Dáta z tohto snímača nám slúžili na porovnanie.

Popis použitých senzorov:

- **Snímače č. 1-3: AC244-1D** sú malé priemyselné akcelerometre od firmy Connection Technology Center. Citlivosť snímačov $\pm 5\%$ je 100 mV/g a ich frekvenčný rozsah $\pm 5\%$ je od 2 až po 7 000 Hz. [37]
- **Snímač č. 4: 356B18** je trojosový akcelerometer od firmy PCB Piezotronics. Citlivosť snímačov $\pm 10\%$ je 1000 mV/g a ich frekvenčný rozsah $\pm 10\%$ je od 0,3 až po 5 000 Hz. [38]



Obr. 17) Umiestnenie a popisanie osí snímačov na objímke [39]

8.3 Popis merania

Meranie bolo realizované pri obrábacom procese, konkrétne frézovaní testovacích vzorkov. Boli vykonané dva merania a vytvorené dva obrobky pri rôznych podmienkach. Prvé meranie bolo uskutočnené za ideálnych podmienok, druhé meranie malo úmyselne horšie podmienky. Zhoršené podmienky spočívali v zvýšenej rýchlosti pohybu obrábania a v zvýšených otáčkach vretena pri použití frézy č.2. Druhé meranie bolo sprevádzané zvýšeným hlukom.

Veľkosti veličín posuv na zub a rezná rýchlosť v tab 7) a tab 8) boli získané od operátora. Ostatné veličiny boli vypočítané na základe vzorcov z kapitoly 2.3.3.

Tab 7) Popis prvého merania

1. Meranie – dokonalé podmienky				
Nástroj	Popis veličiny	Veličina	Veľkosť	Jednotka
Fréza č.1	Posuv na zub	f_z	0,05	mm
	Rezná rýchlosť	v_c	120	m/min
	Otáčky vretena	n	6366,2	1/min
	Veľkosť posuvu	v_f	954,9	mm/min
	Otáčková frekvencia	f_o	106,1	Hz
	Dotyková frekvencia zubu	f_d	318,3	Hz
Fréza č.2	Posuv na zub	f_z	0,1	mm
	Rezná rýchlosť	v_c	100	m/min
	Otáčky vretena	n	1591,5	1/min
	Veľkosť posuvu	v_f	636,6	mm/min
	Otáčková frekvencia	f_o	26,5	Hz
	Dotyková frekvencia zubu	f_d	106,1	Hz

Tab 8) Popis druhého merania

2. Meranie – zhoršené podmienky				
Nástroj	Popis veličiny	Veličina	Veľkosť	Jednotka
Fréza č.1	Posuv na zub	f_z	0,075	mm
	Rezná rýchlosť	v_c	120	m/min
	Otáčky vretena	n	6366,2	1/min
	Veľkosť posuvu	v_f	1432,4	mm/min
	Otáčková frekvencia	f_o	106,1	Hz
	Dotyková frekvencia zubu	f_d	318,3	Hz
Fréza č.2	Posuv na zub	f_z	0,12	mm
	Rezná rýchlosť	v_c	120	m/min
	Otáčky vretena	n	1909,9	1/min
	Veľkosť posuvu	v_f	916,7	mm/min
	Otáčková frekvencia	f_o	31,8	Hz
	Dotyková frekvencia zubu	f_d	127,3	Hz

8.3.1 Popis testovacieho vzorku

Materiál testovacieho vzorku je EN AW 6060, jedná sa o stredne odolnú tepelne spracovanú zliatinu hliníka s horčíkom a kremíkom. Rozmery obrobku sú $60 \times 60 \times 15 \text{ mm}$. Bližšie podrobnosti o obrobku sa nachádzajú v prílohe A výrobnom výkrese testovacieho vzorku.

8.3.2 Popis nástrojov

Na opracovanie testovacieho vzorku boli použité dva nástroje rôznych veľkostí:

- Fréza č.1: EC060B16-3C06.
- Fréza č.2: EC-A4 20-32C20E104 IC08.

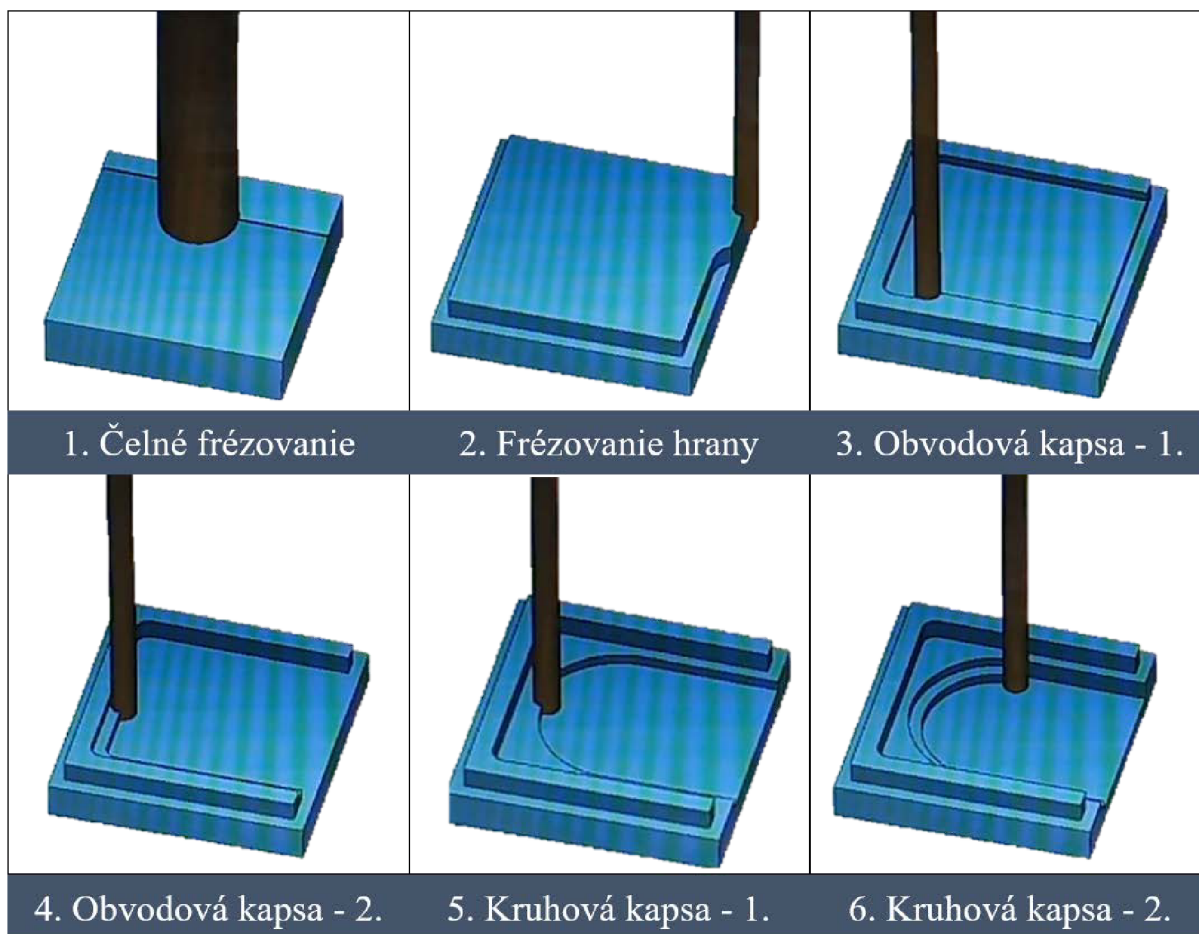
Detailnejší popis nástrojov je zobrazený v tab 9).

Tab 9) Základné technické dáta použitých upínacích nástrojov [40]

Nástroj	Rezný priemer [mm]	Max. hĺbka rezu [mm]	Celková dĺžka [mm]	Počet drážok [mm]	Upínanie	Min. f_z [mm]	Max. f_z [mm]
Fréza č.1	6	16	57	3	C - oválne	0,03	0,07
Fréza č.2	20	32	104	4	C - oválne	0,05	0,13

8.3.3 Popis obrábania

Frézovanie obrobku spočívalo v 6 úkonoch. Prvá fáza obrábania bola čelné frézovanie frézou č.2. Po tomto úkone bol nástroj zmenený na frézu č.1, ktorá bola používaná už až do konca obrábania testovacieho vzorku. Ďalším krokom bolo vonkajšie frézovanie hrany. Nasledovalo frézovanie prvej vrstvy obvodovej kapsy, potom frézovanie druhej vrstvy obvodovej kapsy. A na záver frézovanie prvej a druhej vrstvy kruhovej kapsy. Grafické znázornenie tohto popisu je zobrazené na obr. 18).



Obr. 18) Grafické znázornenie obrábania testovacieho vzorku

8.4 Analýza signálu

Získané dáta z online diagnostických systémov od SKF aj od NI boli analyzované v software ARM. Moja analýza sa skladá z:

1. Porovnania prvého merania s druhým meraním z dát od SKF.
2. Porovnania prvého merania s druhým meraním z dát od NI.

8.4.1 ARM software

Analysis and Reporting Manager v skratke ARM je podporná aplikácia od firmy SKF, slúži na prenos, zobrazovanie a analyzovanie nameraných dát. ARM poskytuje moduly ako napríklad vyvažovanie, záznamník dát, Bump Test, funkcia frekvenčnej odozvy, kontrola zhody.

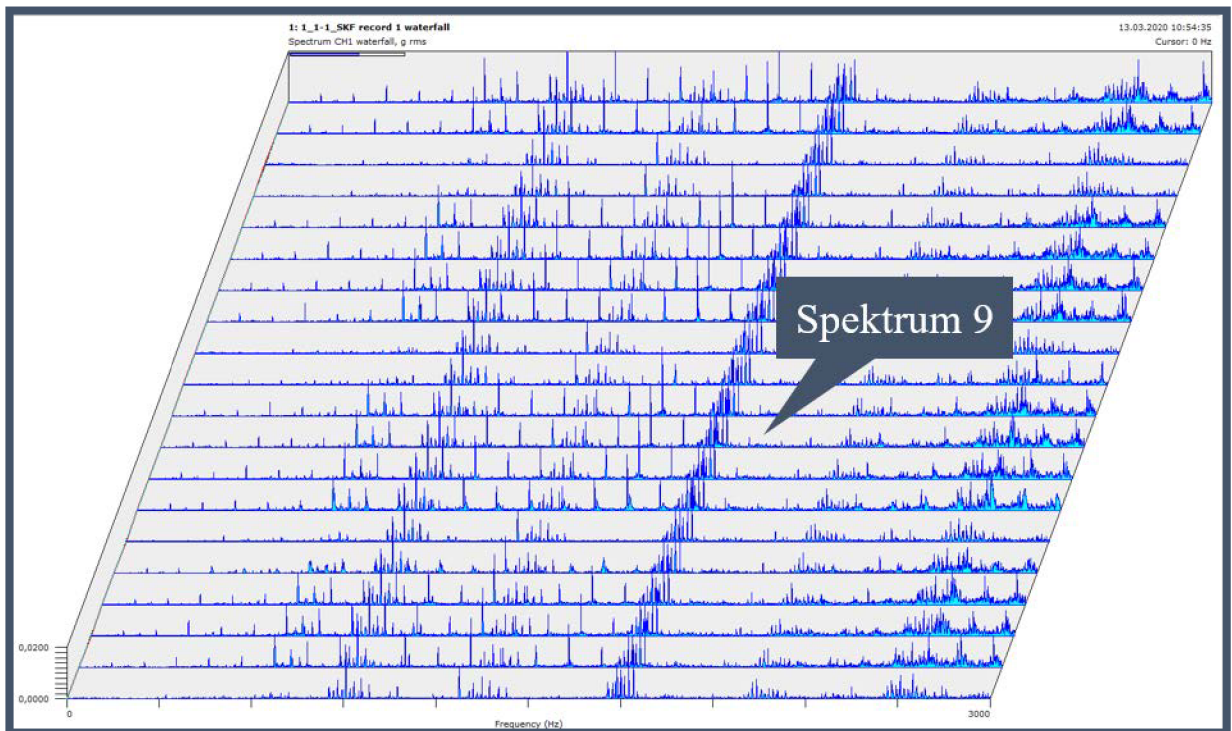
V programe sa dajú časové dáta vyhodnotiť pomocou FFT do spektier alebo vodopádových grafov. [28]

8.4.2 Postup analýzy signálu

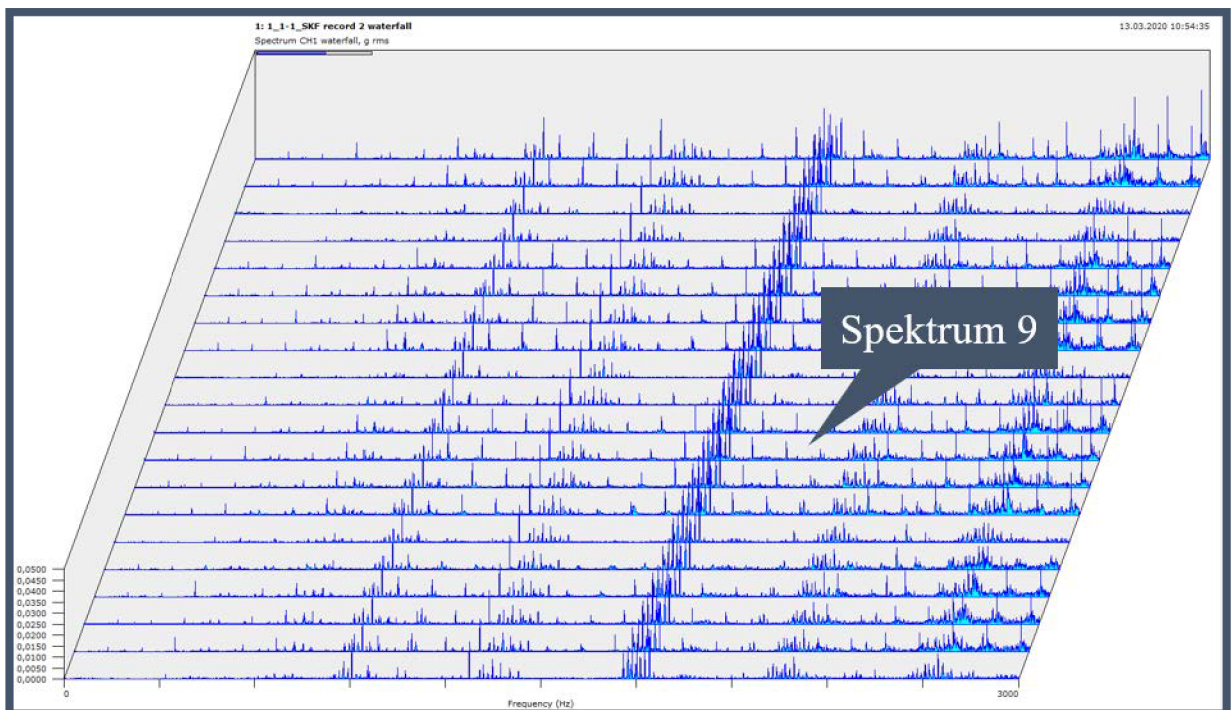
Namerané dáta z meracej jednotky IMx-8 a meracej karty NI 9234 som importovala do programu ARM, kde sa automaticky zobrazili v časovom grafe. Pomocou funkcií popísaných v dokumentácii v prílohe B som spracovala údaje o časových priebehoch do vodopádových grafov vo frekvenčnej oblasti. Z vodopádových grafov kanálov osy x a y som vybrala najčastejšie opakujúce sa spektrum s časovým rozhraním 1,28 s pre dáta od SKF a s časovým rozhraním 0,4 s pre dáta od NI. Dĺžka nameraných signálov jednotkou IMx-8 bola 58,9 s. Čas jedného merania u jednotky NI 9234 bol približne 0,498 s. Namerané dáta z osy z som nebrala do úvahy, z dôvodu veľmi nízkych vibrácií a z dôvodu, že obrábacie nástroje sa pohybovali v osy x a y.

Pre vzorové zobrazenia postupu som si vybrala dáta od SKF z prvého merania, čelného obrábania. Analýzu som robila vo frekvenčnej oblasti do 3000 Hz. Z vodopádových grafov osy x a y som si vybrala spektrum č. 9 (viď obr. 19) a 20). Kvalita obrázkov vychádza zo softvérového nastavenia programu ARM. Ostatné grafy vo frekvenčnej oblasti sa nachádzajú v elektronickej prílohe. Po zobrazení spektra č. 9 som zvýraznila dotykovú frekvenciu zubu nástroja o obrobok $f_d = 318,3 \text{ Hz}$ a jej násobky. Na obr. 21) sú tieto frekvencie výrazne viditeľnejšie. Dáta zo spektra som exportovala do formátu Microsoft Excel Worksheet (.xlsx).

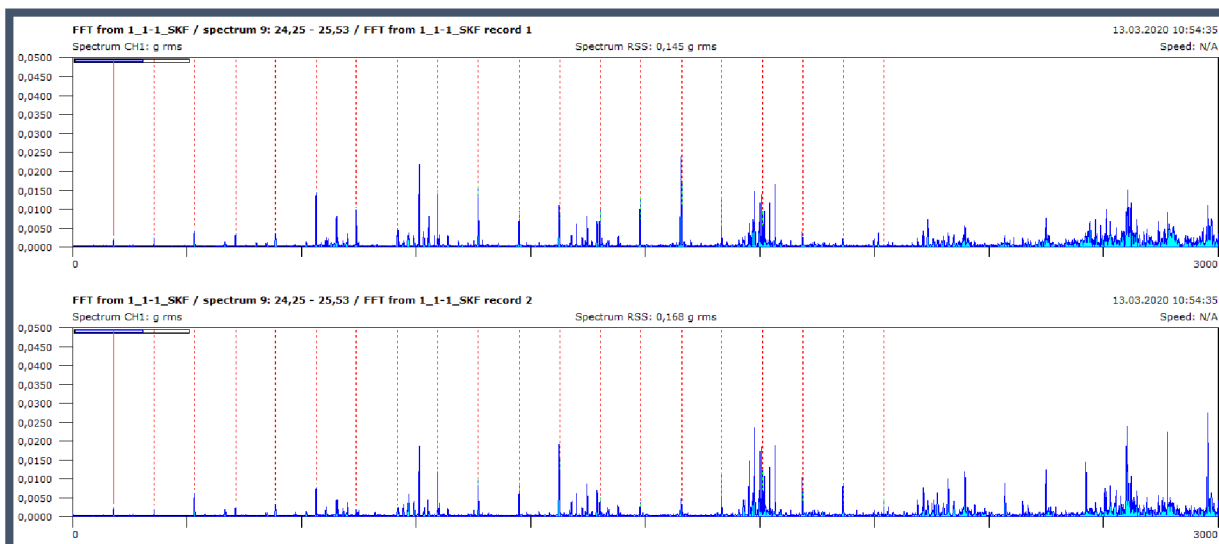
Jednotlivé porovnania som robila na základe energií spektier v stanovených frekvenčných pásmach. Určila som si lineárne 6 frekvenčných pásiem po 500 Hz v rozmedzí od 0 po 3000 Hz. V týchto pásmach som sčítala všetky amplitúdy a navzájom porovnávala. Tento postup som realizovala u každého merania.



Obr. 19) Vodopádový graf osy x (1. meranie, čelné obrábanie, SKF)



Obr. 20) Vodopádový graf osy y (1. meranie, čelné obrábanie, SKF)



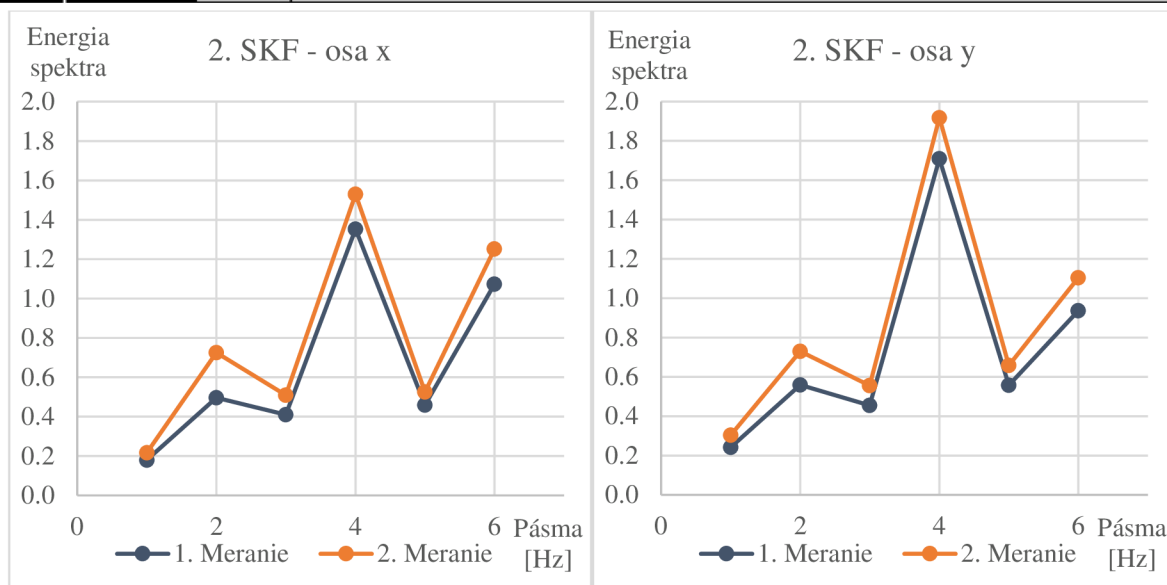
Obr. 21) Spektrum 9 vo frekvenčnej oblasti (1. meranie, čelné obrábanie, SKF)

8.4.3 Porovnanie nameraných dát od SKF

V tejto kapitole porovnáam prvé meranie s druhým meraním z dát získaných z online diagnostického systému od SKF. Každú operáciu frézovania reprezentuje jedna tabuľka rozdelená na prvé a druhé meranie podľa frekvenčných pásiem a dva grafy osy x a y, kde je znázornené porovnanie prvého merania s druhým (viď tab 10) a obr. 22). Ostatné tabuľky a grafy sa nachádzajú v prílohe C.

Tab 10) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany

2. Frézovanie hrany							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,179890	0,241575	0,216458	0,303491	0,036569	0,061916
2	500 - 1000	0,496747	0,559115	0,725516	0,729639	0,228769	0,170523
3	1000 - 1500	0,410603	0,455151	0,509233	0,555759	0,098630	0,100608
4	1500 - 2000	1,352560	1,709276	1,529234	1,918450	0,176674	0,209174
5	2000-2500	0,458323	0,557918	0,525798	0,657840	0,067475	0,099922
6	2500-3000	1,073044	0,937203	1,251897	1,103900	0,178853	0,166697
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,131162	0,134807



Obr. 22) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany

Porovnanie podľa obrábacích operácií:

1. Čelné frézovanie

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním je približne 0,07. Vo frekvenčnom pásme od 500 – 1000 Hz je pre obe osy energia spektier druhého meranie približne o 0,1 vyššia. Rozdiel medzi druhým a prvým meraním u ostatných frekvenčných pásiem je kladný.

2. Frézovanie hrany

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním je približne 0,13. Vo všetkých frekvenčných pásmach vychádza energia spektier prvého meranie nižšia ako druhého.

3. Frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je 0,02 a u osy y 0,03. U osy x je energia spektier pri prvom meraní prevažne vyššia. Energia spektier osy y pri prvom meraní je vo všetkých pásmach nižšia.

4. Frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je 0,07 a u osy y 0,13. Vo všetkých frekvenčných pásmach vychádza energia spektier prvého meranie nižšia ako u druhého.

5. Frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je 0,06 a u osy y 0,15. Vo frekvenčnom pásme od 2500 – 3000 Hz je pre osu x energia spektier druhého meranie približne o 0,3 vyššia. Rozdiel medzi druhým a prvým meraním u ostatných frekvenčných pásiem je kladný. Pri ose y sú všetky pásma energie spektier u prvého merania nižšie.

6. Frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva

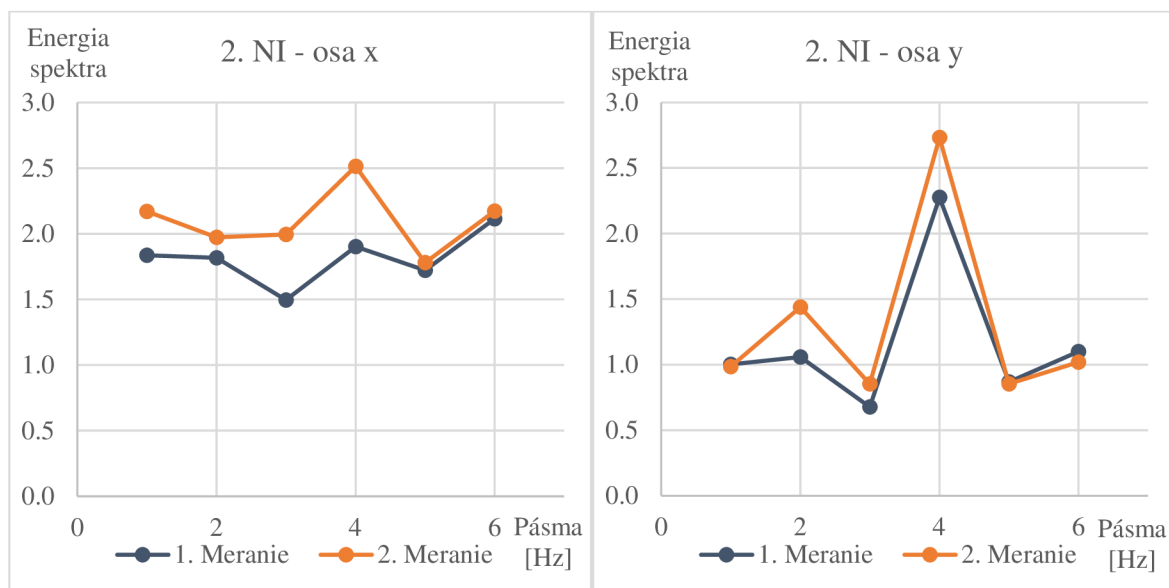
- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je 0,07 a u osy y 0,13. Vo všetkých frekvenčných pásmach vychádza energia spektier prvého meranie nižšia ako druhého.

8.4.4 Porovnanie nameraných dát od NI

V tejto kapitole sa nachádza porovnanie prvého merania s druhým meraním z dát získaných z online diagnostického systému od NI. Každú operáciu frézovania reprezentuje jedna tabuľka rozdelená na prvé a druhé meranie podľa frekvenčných pásiem a dva grafy osy x a y, kde je znázornené porovnanie prvého merania s druhým (viď tab 11) a obr. 23). Zvyšné tabuľky a grafy sa nachádzajú v prílohe D.

Tab 11) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany

2. Frézovanie hrany							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,835541	1,003474	2,170100	0,986521	0,334559	-0,016953
2	500 - 1000	1,816234	1,057865	1,972900	1,439958	0,156666	0,382093
3	1000 - 1500	1,495767	0,677453	1,996012	0,852744	0,500245	0,175291
4	1500 - 2000	1,901036	2,275625	2,513912	2,732008	0,612876	0,456383
5	2000-2500	1,722145	0,868720	1,780315	0,853081	0,058170	-0,015639
6	2500-3000	2,114706	1,100067	2,173100	1,018902	0,058394	-0,081165
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,286818	0,150002



Obr. 23) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany

Porovnanie podľa obrábacích operácií:

1. Čelné frézovanie

- Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je 0,18 a u osy y 0,05. Vo frekvenčnom pásme od 500 – 1000 Hz je pre osu x energia spektier druhého merania približne o 0,05 vyššia. Rozdiel medzi druhým a prvým meraním u ostatných frekvenčných pásiem je kladný. U osy y je pri troch pásmach energia spektier prvého merania vyššia ako druhého a pri troch je nižšia.

2. Frézovanie hrany
 - Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je $0,28$ a u osy y $0,15$. U osy x vo všetkých frekvenčných pásmach vychádza energia spektier prvého merania nižšia ako druhého. U osy y je to naopak.
3. Frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva
 - Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je $-0,12$ a u osy y $0,15$. Pri ose x sú všetky pásma energie spektier u prvého merania vyššie ako u druhého. A u osy y je to presne naopak.
4. Frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva
 - Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je $0,14$ a u osy y $0,24$. Vo frekvenčnom pásme od $1000 - 1500 \text{ Hz}$ je pre osu x energia spektier druhého merania vyššia. Rozdiel medzi druhým a prvým meraním u ostatných frekvenčných pásiem je kladný. Energia spektier prvého merania osy y je vo všetkých pásmach nižšia.
5. Frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva
 - Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je $-0,01$ a u osy y $0,11$. Rozdiel energií spektier medzi druhým a prvým meraním pri ose x je vo frekvenčnom pásme od $0 - 2000 \text{ Hz}$ záporný. Pri ose y je tento rozdiel záporný v pásmach od $0 - 1000 \text{ Hz}$.
6. Frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva
 - Priemerný rozdiel energie spektier medzi druhým a prvým meraním u osy x je $-0,09$ a u osy y $-0,19$. U osy x aj y sú energie spektier prvého merania skoro vo všetkých pásmach vyššie ako druhého merania.

8.4.5 Vyhodnotenie online vibrodiagnostickej analýzy

Z jednotlivých energií spektier a mnou stanovených frekvenčných pásiem nie je medzi prvým a druhým meraním jednoznačne viditeľný rozdiel, na základe ktorom by som ďalej stanovila medznú hodnotu pre alarmovanie zlého obrobku. Pri online vibrodiagnostickom systéme od SKF je celková energia spektier od $0 - 3000 \text{ Hz}$ pri prvom meraní vždy nižšia ako pri druhom, čo ale nemôžeme tvrdiť pri online vibrodiagnostickom systéme od NI.

Môj predpoklad viditeľne zvýšených vibrácií pri druhom meraní sa nenaplnil. Po meraní som zistila, že sú medzi meraniami len malé rozdiely, a aj to nie vždy zvýšené vibrácie u druhého merania. Z tejto analýzy mi vychádza, že zhoršené obrábacie podmienky pri druhom meraní nemali veľký vplyv na zvýšenie vibrácií.

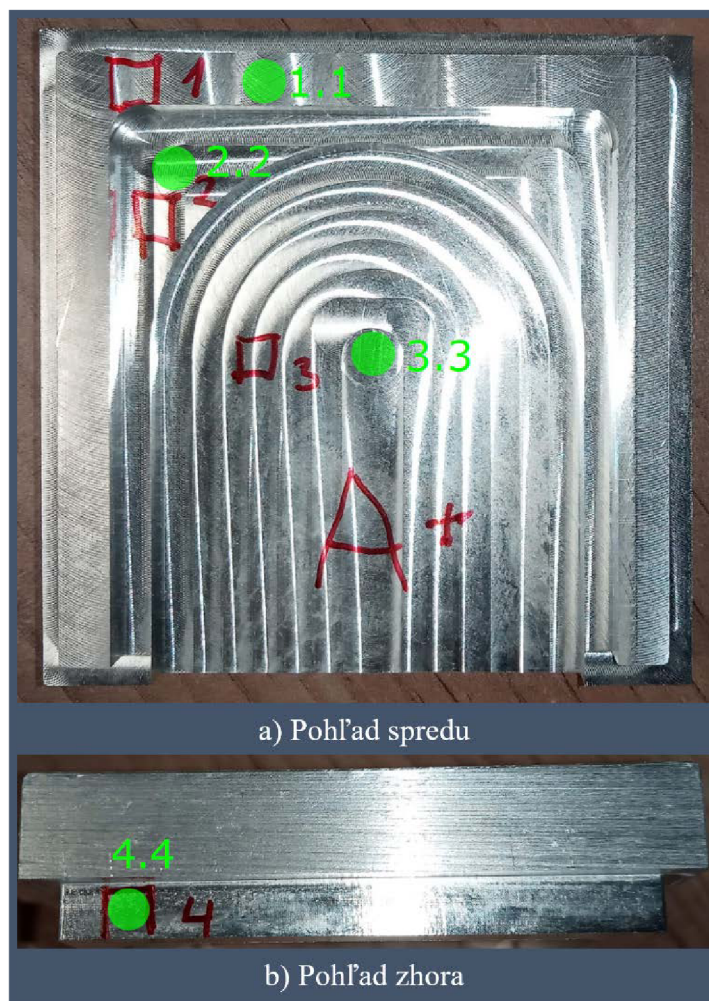
Najvyššie vibrácie vo všetkých prípadoch boli namerané pri frézovaní hrany. Obrábalo sa bokom nástroja, čo je najviac náchylné na rozkmitanie v dôsledku rezonancie. Čelné frézovanie spôsobilo rádovo nižšie vibrácie, a to vďaka väčšej tuhosti sústavy stroj- nástroj – obrobok.

9 ANALÝZA TEXTÚRY POVRCHU

Praktické meranie bolo taktiež realizované bez mojej prítomnosti, kvôli mimoriadnemu opatreniu ministerstva zdravotníctva, konkrétne zákazu osobnej prítomnosti študentov na školách. Namerané dáta a fotodokumentácia mi bola poskytnutá mojím vedúcim práce.

9.1 Popis merania

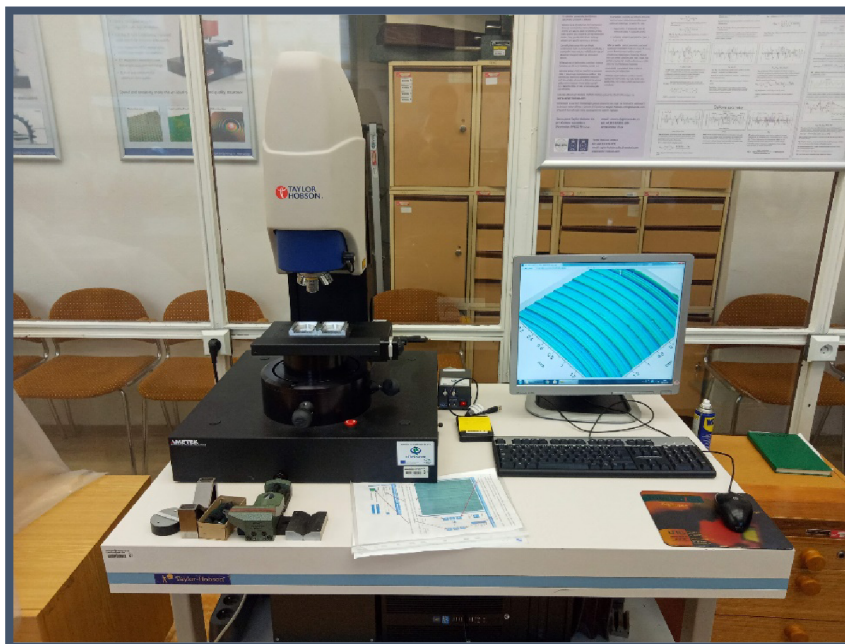
Meranie bolo realizované na dvoch obrobkoch, vyrobených pri online vibrodiagnostickej analýze z predchádzajúcej kapitoly. Na každom obrobku boli dopredu stanovené štyri totožné miesta určené pre meranie. Vybrané body merania sú zakreslené zelenými bodkami na obr. 24).



Obr. 24) Zakreslené body merania [39]

9.1.1 Optický profilometer Talysurf CCI Lite

Merania boli vykonané na optickom profilometri Talysurf CCI Lite od firmy Taylor Hobson. Firma je na trhu od roku 1886 a zaoberá sa navrhovaním, vývojom a dodávkami presných metrologických zariadení.



Obr. 25) Talysurf CCI Lite [39]

Jedná sa o bezkontaktné, optické, 3D, meracie zariadenie. Používa patentovaný korelačný algoritmus na nájdenie koherenčného vrcholu a fázovej polohy interferenčného obrazca. Profilometer má snímač obrazu s rozlíšením 1024×1024 pixelov a tri objektívy Mirau so zväčšením $10x$, $20x$ a $50x$. Tieto objektívy vyhodnocujú obrazce o ploche približne $1,65 \times 1,65 \text{ mm}$, $0,825 \times 0,825 \text{ mm}$ a $0,33 \times 0,33 \text{ mm}$. Na merania v tejto práci bol použitý objektív so zväčšením $10x$ v predom definovaných miestach vzoriek. [41]

Zariadenie je dostupné v laboratóriu VUT na fakulte FSI. Posledná kalibrácia bola vykonaná v roku 2019.

9.2 Analýza nameraných dát

Získané dáta z TalyMap Gold programu som ďalej analyzovala v programe MS Excel. Analýza je založená na porovnaní dvoch obrobkov vzniknutých pri predchádzajúcej analýze, ktorá bola rozobratá v predchádzajúcich kapitolách.

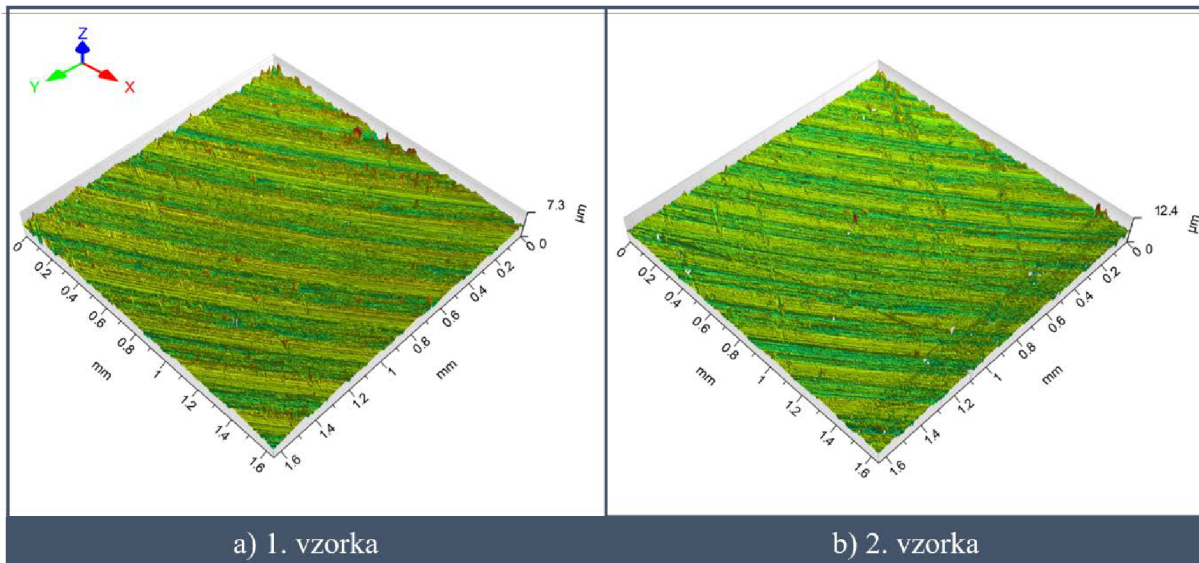
9.2.1 TalyMap Gold software

Namerané dáta sú spracované v software TalyMap Gold. V programe boli vytvorené 2D a 3D modely analyzovaného povrchu. Program disponuje rôznymi funkciami pre úpravu modelu povrchu, ako napríklad vyrovnanie povrchu, odstránenie tvaru, interpolácia nameraných bodov a vyhodnocovanie parametrov textúry povrchu podľa noriem.

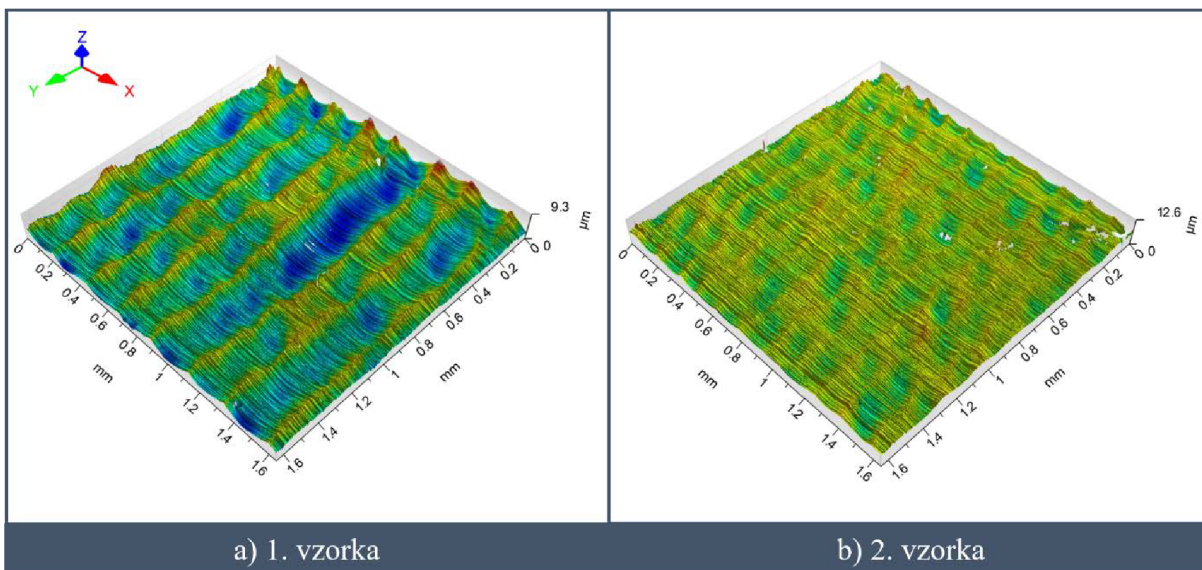
9.2.2 Postup analýzy nameraných dát

Po spracovaní nameraných dát v TalyMap Gold software na 2D a 3D modely analyzovaného povrchu som sa rozhodla použiť v diplomovej práci plošné výškové parametre, na základe ktorých som vykonala porovnanie prvého a druhého obrobku. Pre predstavu pridávam 3D detaily vzorku bodu číslo 1.1 a bodu číslo 4.4. Základný rozdiel medzi nimi je ten, že stopy po frézovaní na obr. 26) sú vytvorené čelom frézy a na obr. 27) sú stopy vytvorené bokom nástroja pri frézovaní hrany. Z týchto obrázkov je na prvý pohľad vidieť rozdiely medzi prvou a druhou vzoriek v počte vyfrézovaných pruhov, a to z dôvodu zvýšenej rýchlosti.

Kompletné správy každého bodu z merania textúry povrchu sa nachádzajú v elektronickej prílohe.



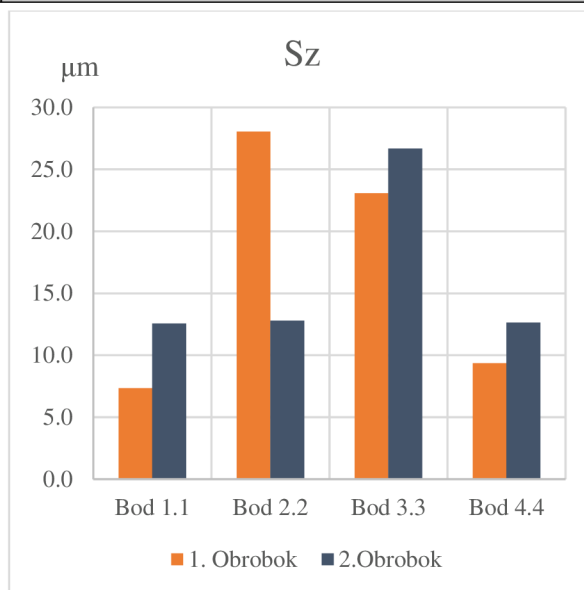
Obr. 26) 3D detail bodu 1.1 [39]



Obr. 27) 3D detail bodu 4.4 [39]

9.2.3 Porovnanie obrobkov pomocou plošných parametrov

V tejto kapitole sa budem zaoberať porovnaním prvého obrobku s druhým obrobkom na základe výškových plošných parametrov stanovených bodov. Každý obrobok reprezentuje tabuľka s výškovými plošnými parametrami prislúchajúcich bodov. Každý výškový parameter v príslušných bodoch som pre grafické porovnanie dala do histogramu vid' obr. 28). Tabuľky a ostatné grafy sa nachádzajú v prílohe E.



Obr. 28) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sz

Porovnanie podľa bodov posudzovaného povrchu:

1. Bod 1.1
 - Druhý obrobok má v tomto bode všetky výškové parametre vyššie ako obrobok prvý, až na šikmosť Ssk posudzovaného povrchu, tá je nižšia.
2. Bod 2.2
 - V tomto bode sú posudzované parametre povrchu prvého obrobku vyššie ako parametre druhého obrobku, okrem špicatosti Sku , tá je v tomto prípade nižšia.
3. Bod 3.3
 - V bode 3.3 je to obdobne ako v bode 1.1 jediná šikmosť Ssk je u prvého obrobku vyššia ako u druhého. Priemerná aritmetická výška Sa je u oboch obrobkoch skoro rovnaká.
4. Bod 4.4
 - Prvý obrobok má parametre Sq , Ssk a Sa vyššie ako obrobok druhý, ostatné parametre má nižšie.

9.2.4 Vyhodnotenie analýzy povrchu

Najväčšie rozdiely sú pri výškových parametroch Sp , Sv a Sz u ostatných parametroch sú rozdiely v rádoch desiatín a nižšie. Špicatosť posudzovaného povrchu Sku je jediný plošný parameter, ktorý je v každom bode u druhého obrobku vyšší ako u prvého.

Môj predpoklad viditeľne zvýšených plošných parametrov pri druhom obrobku sa nie celkom naplnil. Rozdiely sú nepatrné a dokonca v bode 2.2 sú skoro všetky hodnoty pri druhom obrobku nižšie ako pri prvom. Z tejto analýzy mi vychádza, že druhý obrobok u ktorého boli zhoršené podmienky obrábania nemali, tak veľký účinok na kvalitu povrchu.

10 ZHRNUTIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Z dôvodu mimoriadnych opatrení ministerstva zdravotníctva, kvôli vírusu covid-19 bolo realizované len jedno online vibrodiagnostické meranie, pri ktorom vznikli dva obrobky. Diplomová práca obsahuje dve rôzne analýzy založené na porovnaní dvoch obrobkov vyrobených v odlišných podmienkach. V kapitole 8.3 sú tieto podmienky bližšie popísané. Nakoľko sa operátor stroja bál o poruchu nástroja zhoršené podmienky neboli dostatočné na plnohodnotné porovnanie a vyhodnotenie rozdielov medzi prvým a druhým spôsobom obrábania. Pre kvalitnejšiu analýzu a vyhodnotenie by som potrebovala zopakovať meranie viac krát s vyššou rýchlosťou a otáčkami vretena.

Zhoršené obrábacie podmienky pri druhom meraní boli signalizované zvýšeným hlukom a mierne vyššími vibráciami. Vibrácie boli merané súčasne dvoma online diagnostickými systémami. Porovnanie som vykonala na základe energie spektier v stanovených frekvenčných pásmach. Rozdiel medzi obrábaním v ideálnych podmienkach a zhoršených nebol dostatočne veľký nato, aby sa dala jasne stanoviť medzná hodnota pre alarmovanie zlého obrobku. Z analýzy dát nameraných diagnostickým systémom od SKF je celková energia spektier v pásme od $0 - 3000 \text{ Hz}$ vždy nižšia pri ideálnych podmienkach ako pri zhoršených. Toto tvrdenie nepotvrdila analýza dát z diagnostického systému od NI, v niektorých prípadoch je celková energia v tomto pásme vyššia pri zhoršených podmienkach obrábania. Najvyššie vibrácie vo všetkých prípadoch boli namerané pri frézovaní hrany. Obrábalo sa bokom nástroja, čo je najviac náchylné na rozkmitanie v dôsledku rezonancie. Čelné frézovanie spôsobilo rádovo nižšie vibrácie, a to vďaka väčšej tuhosti sústavy stroj-nástroj – obrobok.

Na kvalite povrchu sa zhoršené podmienky obrábania nepreukázali viditeľne. Z analýzy povrchu na základe plošných parametrov sú rozdiely medzi prvým a druhým obrobkom nepatrné. Z 3D detailov vzoriek je možné vidieť, že zvýšené otáčky a rýchlosť pri druhom meraní spôsobili zvýšený počet rýh po frézovaní, a tým pádom aj rozdielnu vzdialenosť medzi jednotlivými rýhami.

10.1 Odporúčenie pre prax

Odporúčam vykonať na základe tejto diplomovej práce ďalšie merania pri postupne zvyšujúcich sa otáčkach vretena a rýchlosti posuvu. Vďaka väčšiemu počtu nameraných dát pri rozličných podmienkach, by sa dala stanoviť medzná hodnota pre signalizovanie nekvalitného obrábania na obrábacom centre MCV 754 Quick, pomocou online vibrodiagnostického systému. Postup popísaný v mojej diplomovej práci je možné aplikovať na akomkoľvek obrábacom stroji. Po dôkladnej analýze a určení medzných hodnôt by online vibrodiagnostický systém vždy upozornil na prekročenie medznej hodnoty, a tým by sa minimalizovala až eliminovala výroba chybných výrobkov.

Vďaka analýze povrchu je možné s postupne zvyšujúcimi otáčkami a rýchlosťou posuvu určiť optimálne podmienky pre výrobu obrobkov, čo najrýchlejšie bez toho, aby bola znížená kvalita povrchu.

S vyššou rýchlosťou pohybu a zvýšenými otáčkami vretena sú na nástroj kladené vyššie nároky. Nástroj je v tomto prípade viac namáhaný, rýchlejšie sa opotrebuje, a tým pádom je

potrebná jeho výmena. Ale na druhej strane rýchlosť výroby vzrastie, a v dôsledku toho sa zvýši výkonnosť firmy.

Postupy analýz z mojej diplomovej práce sa dajú jednoducho integrovať do firiem s výrobou v súlade s princípmi priemyslu 4.0. Pomocou nich dokážu efektívne riadiť výrobu bez toho, aby bola znížená kvalita. Pri zavedení online diagnostického systému je potrebná vyššia investícia, na zakúpenie online diagnostického systému a preškolenie obsluhy.

11 ZÁVER

Diplomová práca je zameraná na identifikovanie nekvalitného obrábania pomocou online diagnostiky obrábacieho stroja MCV 754.

Prvá časť práce je zameraná na vysvetlenie problematiky v teoretickej rovine. Na začiatku je stručné vysvetlenie obrábacích strojov a konkrétnej obrábacej metódy frézovania. Hlavné ciele každej výrobnej firmy sú nízke náklady na výrobu, včasné dodanie a vysoká kvalita výrobkov. Pre dosiahnutie týchto cieľov je potrebná adekvátne údržba. Najvyšší stupeň údržby je proaktívna a prediktívna údržba podľa technického stavu. K aplikovaní týchto stupňov údržby je potrebná technická diagnostika, ktorá pomocou bezdemontážnych a nedeštruktívnych prostriedkov a metód stanoví technický stav stroja. Súčasťou technickej diagnostiky je vibrodiagnostika, ktorá je v teórii podrobnejšie popísaná spolu s online diagnostickými systémami vibrácií. Súčasťou je popis použitých online vibrodiagnostických zariadení a porovnanie online diagnostického systému od SKF s vybranými výrobcami na základe technických parametrov.

Duhá časť práce je rozdelená na dve spolu súvisiace analýzy na online vibrodiagnostickú analýzu a analýzu textúry povrchu. Na obrábacom centre MCV 754, ktoré je bližšie popísané v kapitole 8.1 bola vykonaná podstatnejšia časť meraní. Podrobnejšie sú popísané použité snímače spolu s ich umiestnením na objímke, ktorá bola primontovaná na vreteno stroja. Pomocou dvoch online diagnostických systémov od firmy SKF a NI boli namerané vibrácie pri frézovaní dvoch obrobkov v ideálnych podmienkach a v podmienkach zhoršených. Zhoršené podmienky spočívali v zvýšenej rýchlosti pohybu obrábania a v zvýšených otáčkach vretena pri použití druhého nástroja. Analýza nameraného signálu z tohto merania bola rozdelená na porovnanie nameraných dát v ideálnych a zhoršených podmienkach z online diagnostického systému od SKF, a na to isté porovnanie z dát nameraných systémom od NI. Zhoršené obrábacie podmienky boli signalizované zvýšeným hlukom a mierne vyššími vibráciami. Rozdiel medzi obrábaním v ideálnych podmienkach a zhoršených nebol dostatočne veľký nato, aby sa dala jasne stanoviť medzná hodnota pre alarmovanie zlého obrobku. Postup použitých programov v spojení s touto analýzou je krok po kroku popísaný v prílohe B.

Analýza textúry povrchu bola realizovaná na obrobkoch vytvorených pri online diagnostike vibrácií spomenutých vyššie. Na každom obrobku boli dopredu stanovené štyri totožné miesta určené pre meranie plošných parametrov textúry. Z prevedenej analýzy založenej na porovnaní kvality povrchu obrobku vyrobenom v ideálnych a v zhoršených podmienkach som zistila, že zhoršené podmienky sa na kvalite povrchu viditeľne nepreukázali.

Výsledky oboch analýz sú graficky znázornené v prílohách C,D a E. Prínosy tejto diplomovej práce sú:

- systematické popísanie problematiky v teoretickej rovine,
- vykonanie online vibrodiagnostickej analýzy pri obrábaní výrobku v ideálnych a zhoršených podmienkach,
- vykonanie analýzy textúry na základe plošných parametroch,
- porovnanie výsledkov analýz u obrobku vyrobenom v ideálnych a zhoršených podmienkach,
- znázornenie výsledkov graficky.

12 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] VAVŘÍK, Ivan, Petr BLECHA a Josef HAMPL. *Výrobní stroje a zařízení: Syllabus přednášek pro kombinované bakalářské studium*. 1.vydání. 2002.
- [2] VELÍŠEK, Karol. *Obrábacie stroje*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2001. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1498-4.
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [4] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2008. ISBN 978–80–248–1822–1.
- [5] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN isbn978-80-248-2755-1.
- [6] ČSN EN 13306.: *Údržba - Terminologie údržby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2013. ISBN 9788024830285.
- [8] ČERVEŇAN, Andrej. *Systém údržby*. 1.vydanie. Bratislava: CKV Consult s r.o., 2015. ISBN 978-80-971986-0-2.
- [9] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [10] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [11] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001586.
- [12] *Technická diagnostika a spolehlivost: materiály z 45. setkání odborné skupiny pro spolehlivost, Praha, listopad 2011 : [sborník přednášek]*. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. ISBN isbn978-80-02-02352-4.
- [13] HELEBRANT, František. *Technická diagnostika a spolehlivost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1690-6.
- [14] MOBLEY, R. *Vibration fundamentals*. Boston: Newnes, 1999. ISBN 978-0-7506-7150-7.
- [15] NESLUŠAN, Miroslav a Mária ČILLIKOVÁ. *Teória obrábania*. Vyd. 1. V Žiline: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2007. ISBN 978-80-8070-790-3.

- [16] MIŠUN, Vojtěch. *Dynamika výrobních strojů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN isbn80-214-2534-2.
- [17] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2010, **2010**(1), 32.
- [18] BRÜEL a KJÆR. *Vibration Transducers and Signal Conditioning* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z:
<http://contents.kocw.net/KOCW/document/2016/wonkwang/wondaehee4/6.PDF>
- [19] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky. *Automa*. 2019, **2009**(10), 10.
- [20] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Analýza nejistot ve vibrodiagnostice: Uncertainties analysis in vibrodiagnostic*. 2009.
- [21] ZUTH, Daniel. *Analýza nejistot ve vibrodiagnostice*. Brno, 2009. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce František Vdoleček.
- [22] Vibration Measurement and Analysis. In: *Reins* [online]. Brüel & Kjær | B&K | Sound and Vibration Measurement, 1998 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z:
http://www.reins.co.za/gallery/945f54579be89e989e27bc3d1bf25420_ent_and_Analysis_-_BA767612.pdf
- [23] ZATLOUKAL, Jan a Lukáš HEISIG. Snímače a měřicí technika: On-line vibrační diagnostika obráběcích strojů. *Automa*. 2013, **2013**(8-9), 1-3.
- [24] *Adash* [online]. Czech Republic: Adash spol. s r.o, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z:
<https://adash.com>
- [25] Uživatelský manuál: A3716, A3800 On-Line monitorovací systémy. In: *Adash* [online]. Czech Republic: Adash spol. s r.o, b.r. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z:
https://adash.com/documents/A3800/A3716_A3800_man_cz.pdf
- [26] *Prüftechnik* [online]. Germany: PRÜFTECHNIK Dieter Busch GmbH, b.r. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.pruftechnik.com/com/>
- [27] Catalog: VIBTONET Signalmaster. In: *Lamikappa* [online]. Czech Republic: LAMI KAPPA, spol. s r.o., b.r. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: http://www.lamikappa.cz/download-eshop.php?soubor=2012_vibronet_signalmaster_catalog_en.pdf
- [28] *SKF* [online]. Sweden: SKF Group Headquarters, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z:
<https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems>
- [29] User Manual. In: *SKF* [online]. Sweden: SKF Reliability Systems, 2014 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://www.skf.com/binary/87-158307/0901d19680326e0b-Aptitude-Observer-v9_1-User-Manual.pdf
- [30] *National Instruments* [online]. Austin, TX, b.r. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z:
<https://www.ni.com/>
- [31] NI 9234: Datasheet. In: *National Instruments* [online]. Austin, TX, b.r. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf

- [32] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu I: Prednáška*. Brno: VUT, b.r.
- [33] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [34] RÓBERT, Jankových. *Metrologie textury povrchu VI: Plošné parametry textury povrchu*. Prednáška. Brno: VUT, b.r.
- [35] *Kovosvit MAS* [online]. Czech Republic: KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s., b.r. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz>
- [36] *Návod k používání vertikálního obráběcího centra MCV 754 QUICK*. Česká republika: KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s., b.r.
- [37] *CTC* [online]. USA: Connection Technology Center, Inc, b.r. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z:
https://www.ctconline.com/ctc_100_mv_g_small_size_accelerometers.aspx?prd=AC244
- [38] *PCB* [online]. USA: PCB Piezotronics, Inc., b.r. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z:
<https://www.pcb.com/products?model=356b18>
- [39] ZUTH, Daniel. *Fotodokumentácia poskytnutá vedúcim práce*. VUT FSI, 2020.
- [40] *Iscar: Cutting tools* [online]. Tefen, Israel, b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z:
<https://www.iscar.com/>
- [41] *Talysurf CCI - Lite Non-contact 3D Profiler* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://cutt.ly/Talysurf-CCI-Lite->

13 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

13.1 Zoznam tabuliek

Tab 1) Technické parametre meracej jednotky A3716 [25].....	41
Tab 2) Technické parametre meracej jednotky VIB 5.802 [27].....	43
Tab 3) Prehľad IMx systémov od SKF [28].....	44
Tab 4) Technické parametre meracej jednotky VIB 5.802 [28].....	46
Tab 5) Technické parametre meracej jednotky NI 9234 [31]	47
Tab 6) Základné technické dáta obrábacieho stroja MCV 754 QUICK [35].....	52
Tab 7) Popis prvého merania.....	54
Tab 8) Popis druhého merania.....	54
Tab 9) Základné technické dáta použitých upínacích nástrojov [40].....	55
Tab 10) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany	58
Tab 11) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany	60

Tabuľky z príloh

Tab 1) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – čelné frézovanie.....	93
Tab 2) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany	93
Tab 3) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva	93
Tab 4) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva	94
Tab 5) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva.....	94
Tab 6) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva.....	94
Tab 7) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – čelné frézovanie.....	99
Tab 8) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany	99
Tab 9) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva	99
Tab 10) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva	100
Tab 11) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva	100
Tab 12) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva	100

Tab 13) Výškové plošné parametre 1. obrobku	104
Tab 14) Výškové plošné parametre 2. obrobku	104

13.2 Zoznam obrázkov

Obr. 1) Rozdelenie údržby [7].....	21
Obr. 2) Rozdelenie signálu [13]	25
Obr. 3) Kmitanie budené harmonickou budiacou silou - vytvorenie obr. podľa [5]	28
Obr. 4) Kmitanie budené impulznou budiacou silou - vytvorenie obr. podľa [5]	28
Obr. 5) Kmitanie budené silou náhodného priebehu - vytvorenie obr. podľa [5].....	29
Obr. 6) Časový priebeh výchylky vlastných kmitov - vytvorenie obr. podľa [15].....	29
Obr. 7) Časový priebeh výchylky vynútených kmitov - vytvorenie obr. podľa [15].....	30
Obr. 8) Fázové porovnanie zrýchlenia, rýchlosti a výchylky - vytvorenie obr. podľa [7]32	
Obr. 9) Senzor zrýchlenia (tlakový typ) [5]	34
Obr. 10) Vplyv spôsobu pripevnenia snímača na jeho amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku [18]	35
Obr. 11) Popis harmonického pohybu veličinami [5].....	36
Obr. 12) Princíp frekvenčnej analýzy [22].....	37
Obr. 13) Logická architektúra Softwaru Adash Server [25]	40
Obr. 14) Logická architektúra @ptitude Observer [29]	45
Obr. 15) Prvok profilu	48
Obr. 16) Zobrazenie základných pojmov plošnej metódy - upravenie obr. podľa [34]..	51
Obr. 17) Umiestnenie a popísanie osí snímačov na objímke [39]	53
Obr. 18) Grafické znázornenie obrábania testovacieho vzorku	55
Obr. 19) Vodopádový graf osy x (1. meranie, čelné obrábanie, SKF).....	57
Obr. 20) Vodopádový graf osy y (1. meranie, čelné obrábanie, SKF).....	57
Obr. 21) Spektrum 9 vo frekvenčnej oblasti (1. meranie, čelné obrábanie, SKF)	58
Obr. 22) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany	59
Obr. 23) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany	60
Obr. 24) Zakreslené body merania [39]	62
Obr. 25) Talysurf CCI Lite [39]	63
Obr. 26) 3D detail bodu 1.1 [39].....	64
Obr. 27) 3D detail bodu 4.4 [39].....	64
Obr. 28) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sz.....	65
Obr. 1) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – čelné frézovanie	95
Obr. 2) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany.....	95

Obr. 3) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva.....	96
Obr. 4) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva.....	96
Obr. 5) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva	97
Obr. 6) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva	97
Obr. 7) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – čelné frézovanie	101
Obr. 8) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany	101
Obr. 9) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva.....	102
Obr. 10) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva.....	102
Obr. 11) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva	103
Obr. 12) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva	103
Obr. 13) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_q	104
Obr. 14) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_{sk}	105
Obr. 15) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_{ku}	105
Obr. 16) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_q	106
Obr. 17) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_v	106
Obr. 18) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_z	107
Obr. 19) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra S_a	107

14 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A Výrobný výkres testovacieho vzorku

Príloha B Dokumentácia k použitému systému

Príloha C Spracované dáta od SKF

Príloha D Spracované dáta od NI

Príloha E Spracované dáta k analýze povrchu

Elektronické prílohy

Príloha 1 FFT analýza - 1. meranie, SKF

Príloha 2 FFT analýza - 2. meranie, SKF

Príloha 3 FFT analýza - 1. meranie, NI

Príloha 4 FFT analýza - 2. meranie, NI

Príloha 5 Analýza textúry povrchu - 1. Vzorka - bod 1.1 - 10x

Príloha 6 Analýza textúry povrchu - 1. Vzorka - bod 2.2 - 10x

Príloha 7 Analýza textúry povrchu - 1. Vzorka - bod 3.3 - 10x

Príloha 8 Analýza textúry povrchu - 1. Vzorka - bod 4.4 - 10x

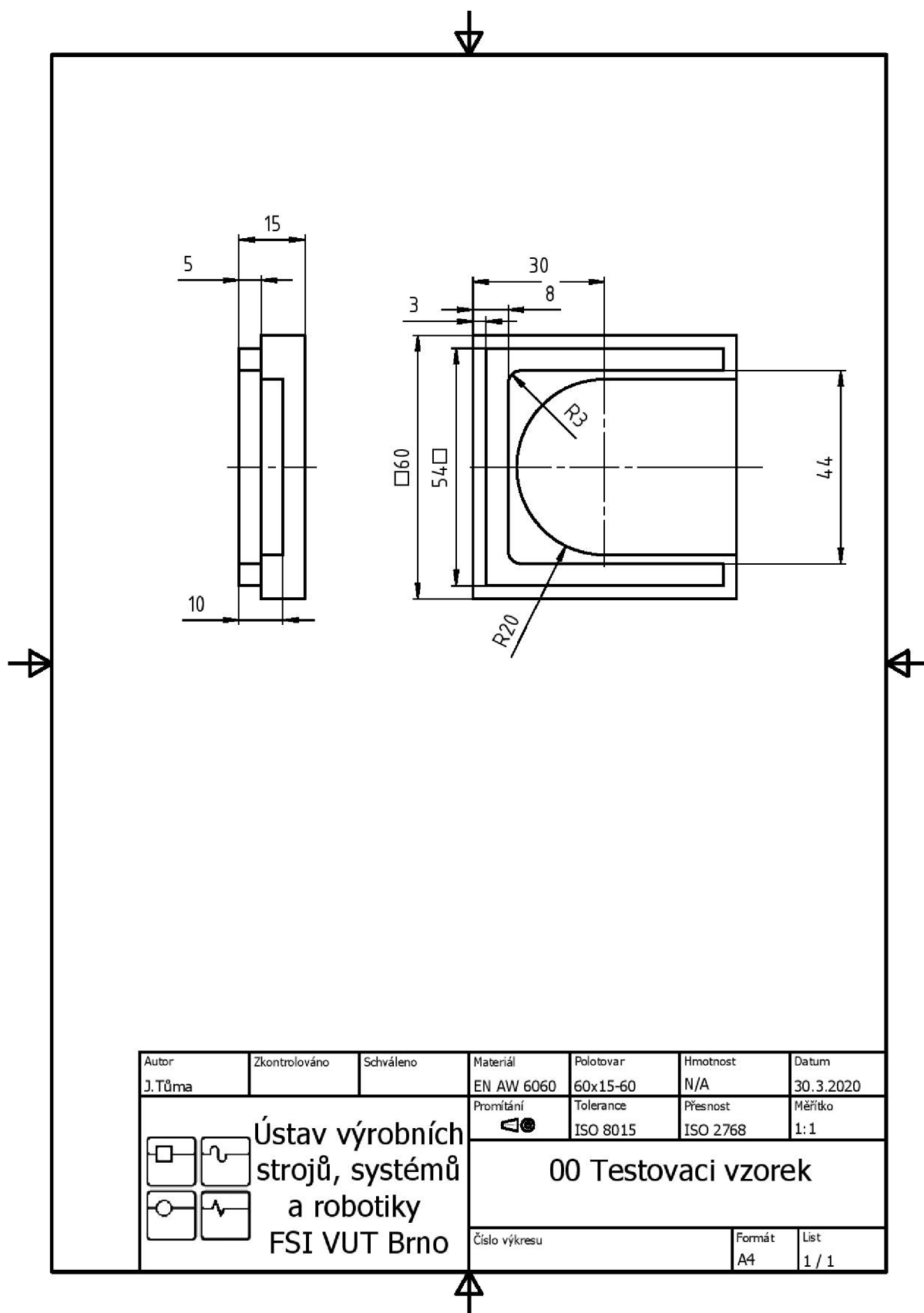
Príloha 9 Analýza textúry povrchu - 2. Vzorka - bod 1.1 - 10x

Príloha 10 Analýza textúry povrchu - 2. Vzorka - bod 2.2 - 10x

Príloha 11 Analýza textúry povrchu - 2. Vzorka - bod 3.3 - 10x

Príloha 12 Analýza textúry povrchu - 2. Vzorka - bod 4.4 - 10x

A VÝROBNÝ VÝKRES TESTOVACIEHO VZORKU



Autor	Zkontrolováno	Schváleno	Materiál	Polotovár	Hmotnost	Datum
J. Tůma			EN AW 6060	60x15-60	N/A	30.3.2020
 Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT Brno			Promítání	Tolerance	Přesnost	Měřítko
				ISO 8015	ISO 2768	1:1
00 Testovací vzorek						
Číslo výkresu					Formát	List
					A4	1 / 1

B DOKUMENTÁCIA K POUŽITÉMU SYSTÉMU

14.1 @ptitude observer

Verzia: @ptitude Observer 10.5.0 (Build 77)

1. Pripojenie jednotky

- On-line > IMs/MasCon jednotky > Vytvoriť novú jednotku > Vybrať typ jednotky IMx > Vypísať potrebné informácie vid' obrázok

IMx

Obecný

Počet: 1 (1-9999)

Jméno: Multilog_frezka

Model: IMx-8

Aktivováno:

Identifikace

Výrobní číslo: 1484

MAC adresa: 00-01-B9-66-85-CC

Vymazat Nastavit detekované zařízení

Časové preference

Referenční čas: 1:00:00

Poznámka-prodleva: 0 Minuty

Interval pro spojení: 0 Hodiny

Časový server (NTP server)

Stejně, jako server monitoru (implicitní)

Stejně jako IEC server

Použít IP adresu: 147.229.9.11

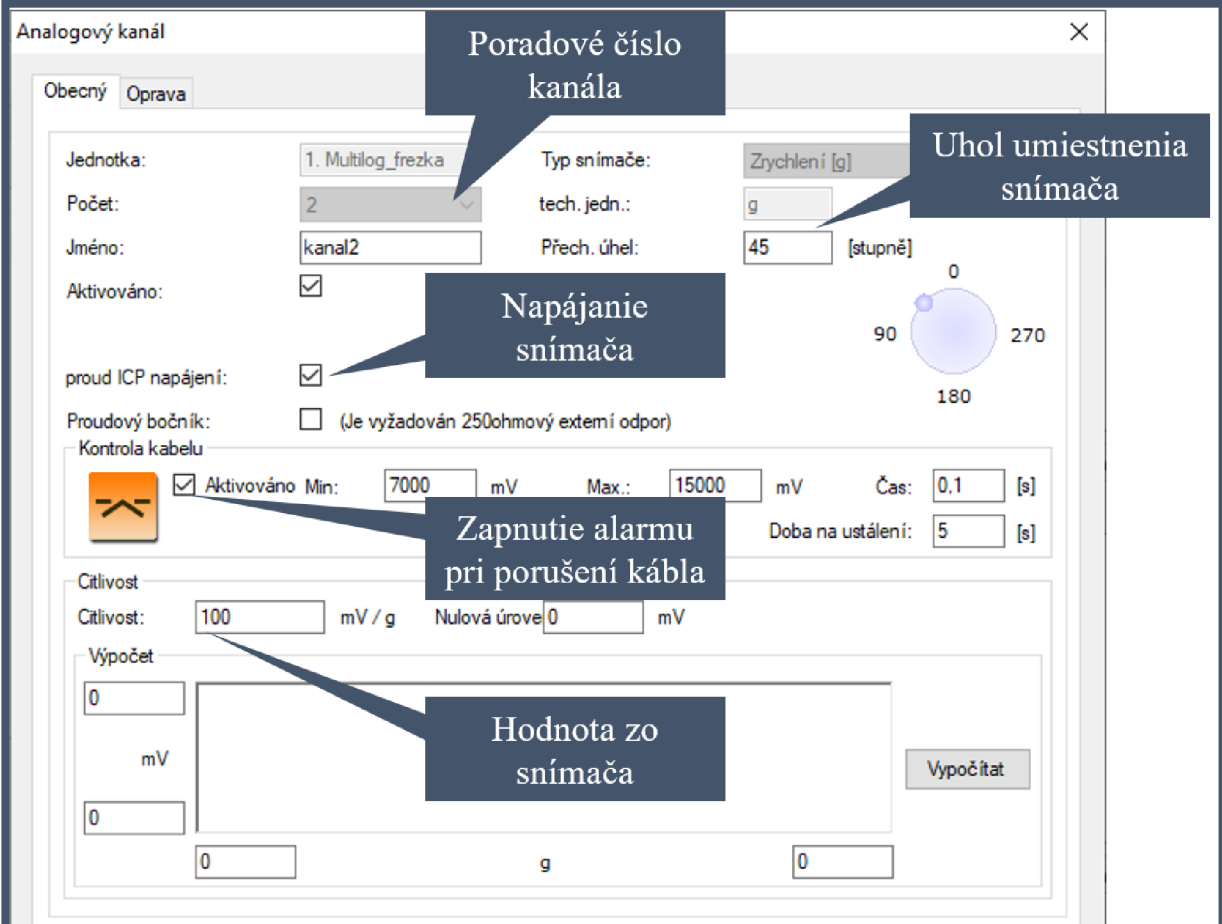
Externí komunikace

Typ: Žádná

Systém protokol OK Storno

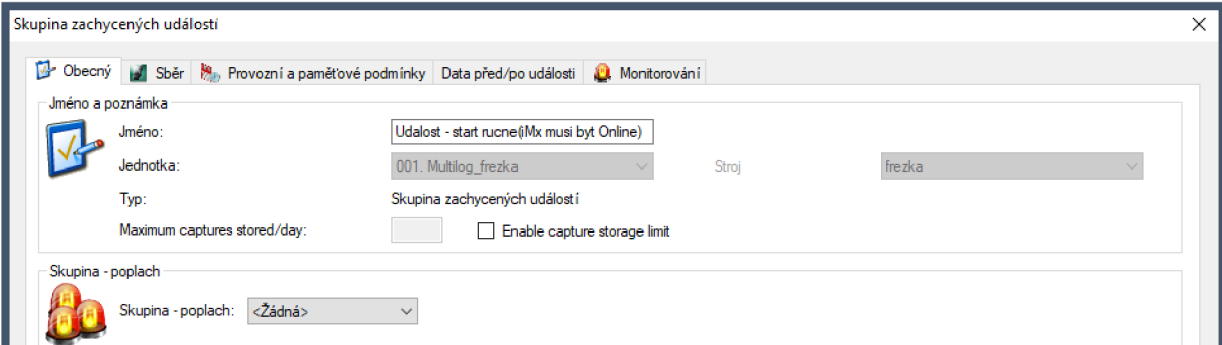
2. Definovanie kanálov

- Definované tu môžu byť vstupy a výstupy podľa toho, čo jednotka obsahuje
- On-line > IMs/MasCon jednotky > Vytvoriť nový analógový signál > Vypísať potrebné informácie vid' obrázok



3. Vytvorenie udalosti

- Na jednu jednotku je možné vytvoriť len jednu udalosť so všetkými kanálmi.
- Pravým tlačidlom myši kliknúť na stroj > Pridať > Skupina zachytených udalostí vypísať potrebné informácie vid' nasledujúce obrázky



- Počet vzoriek a frekvenčný rozsah sa musí nastaviť pred použitím podľa charakteru záznamu. V prípade rýchlej udalosti sa nastaví vysoké vzorkovanie. V prípade pomalej udalosti sa nastaví menšie vzorkovanie, čo znamená dlhší čas zaznamenaného signálu.

Skupina zachycených událostí

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Data před/po události Monitorování

Sběr

Typ sběru: Konst. frekvence Faktor trvání: 0,32 s

Počet vzorků: 4096

Frekvenční rozsah: 0 - 5 kHz, 0 - 300 000 cykly/min

Přidružená měření

Měření otáček: <Žádná>

Měř. procesu: <Žádná>

Digit. měření: <Žádná>

Skupina zachycených událostí

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Data před/po události Monitorování

Provozní podmínka

Typ: Vše

Typ: Vše

Skupina zachycených událostí

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Data před/po události Monitorování

Data před/po události

Uživatelsky specifikovaná doba zachycení

Před událostí (Pre-event): 0,64 [s]

Po události (Post-event): 5,12 [s]

Minimální "Po události": 5,12 s

Skutečná doba zachycení (omezená zařízením)

Před událostí (Pre-event): 0,64 [s]

Po události (Post-event): 5,12 [s]

Celková doba zachycení: 5,76 [s]

Aktuální nastavení skupiny

Velikost vzorku: 4096 Max. doba pro zachycení: 120 s

Fmax: 5000 Hz

Faktor trvání: 0,32 s

Počet bodů: 3

Skupina zachycených událostí

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Data před/po události Monitorování

režim detekce havárie

Aktivováno

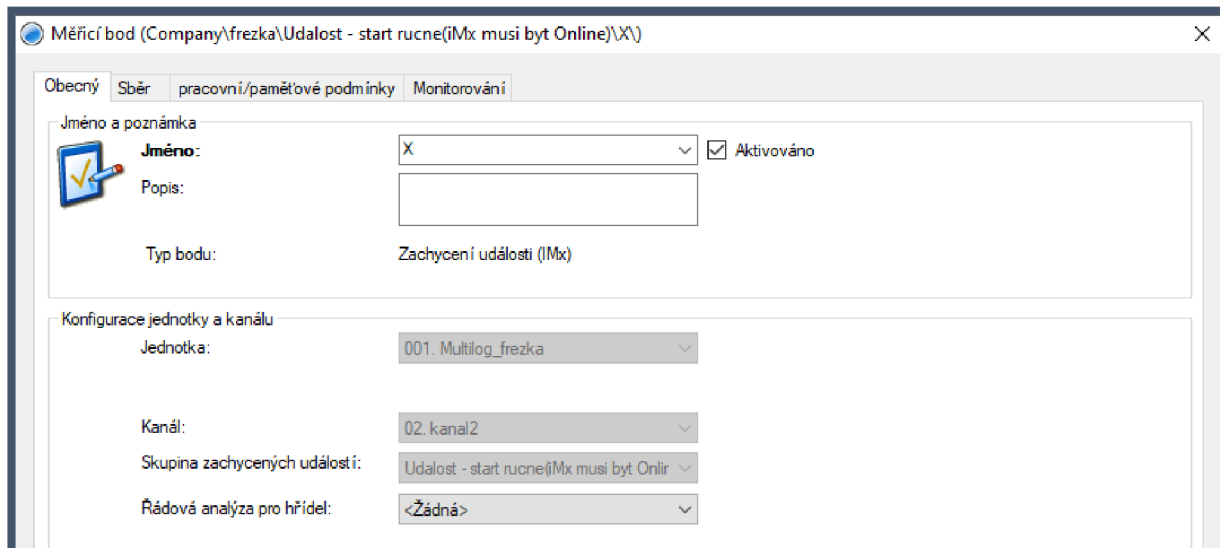
Poznámka: Při aktivaci režimu detekce havárie budou všechny měřicí body skupiny konfigurovány se skutečnou špičkou.

Interní relé jednotky

Poplachové relé: Žádná

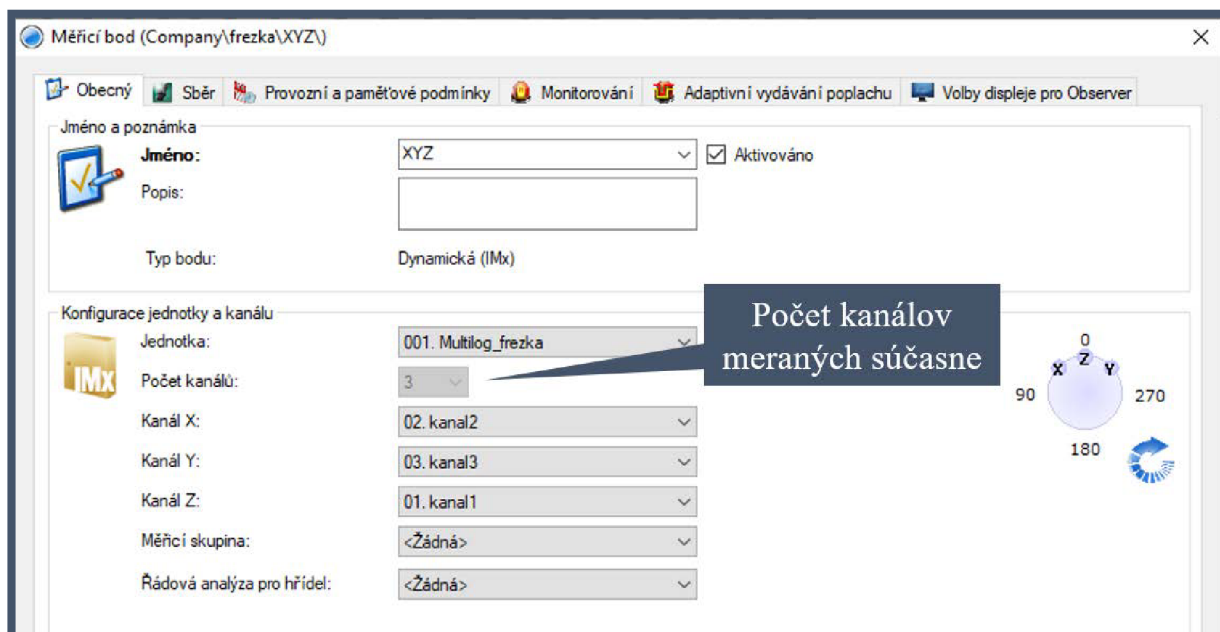
4. Vytvorenie meracieho bodu v udalosti

- Pravým tlačidlom myši kliknúť na udalosť > Pridať > Merací bod > Vypísať meno a vybrať kanál vytvorený v kroku 2. vid' nasledujúci obrázok
- Nastavenie takto vytvorených kanálov vychádza z nastavenia celej udalosti.



5. Vytvorenie meracieho bodu nezávislého na udalosti

- Služí na vytváranie dlhodobých záznamov.
- Pravým tlačidlom myši kliknúť na stroj > Pridať > Merací bod > Dynamická > vypísať potrebné informácie vid' nasledujúce obrázky > Aktivovať uloženie dynamických dát
- Pri novo vytvorenom kanály sa nám zobrazí otáznik, zmizne po tom ako sa nové informácie synchronizujú s jednotkou.



Měřicí bod (Company\frezka\XYZ)

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Monitorování Adaptivní vydávání poplachu Volby displeje pro Observer

Sběr

Předběžné zpracování: [None]

Typ sběru: Konst. frekvence Spoušť

Počet čar: 3200

Frekvenční rozsah: 0 - 5 kHz, 0 - 300 000 cykly/min

Okno: Hanning

Doba měření: 0,64 s

dolní mezní frekvence spektr 0 [Hz]

Rozlišení: 1,5625 Hz/Čára

Uložit: Časová vlna

Počet vzorků: 8192

Doporučeným nastavením pro optimální výkonnost je uložit pouze časovou vlnu (FFT se počítá v software, pokud je potřeba), pokud nepotřebujete průměrování ve frekvenční oblasti.

Konfigurace trendu

Počet čar: Totéž jako spektr

tech. jedn.: g Aplikace měřítka: Špička

Exponenc. průměrování: 0% Rychle

Přidružená měření

Měření otáček: <Žádná>

Měř. procesu: <Žádná>

Digit. měření: <Žádná>

Měřicí bod (Company\frezka\XYZ)

Obecný Sběr Provozní a paměťové podmínky Monitorování Adaptivní vydávání poplachu Volby displeje pro Observer

Provozní podmínka

Typ: Vše

Typ: Vše

Platný měřicí rozsah

Aktivováno Min.: 0,003 [g P] Max.: 10 [g P]

Platí pro hodnoty v celkovém pásmu

Plánované uložení trendu

Aktivováno

Filtr "Spike"

Aktivováno 0 g PtP

Uložení plánovaných dynamických dat

Aktivováno


Typ: Stejně jako provozní podmí

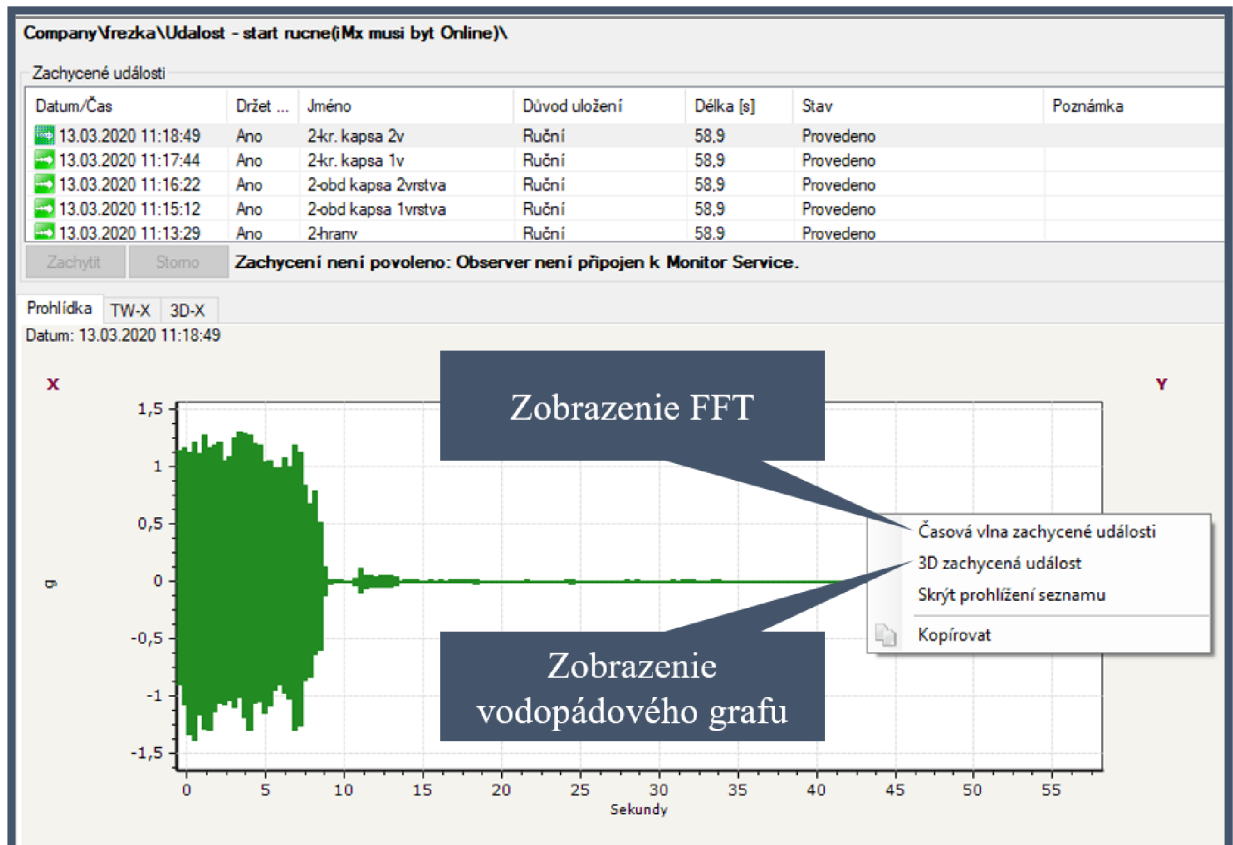
Typ: Stejně jako provozní podmí

Průměr: Frekvence Počet: 1

Interval: 1 Dny Intervalový poplach: 1 Dny

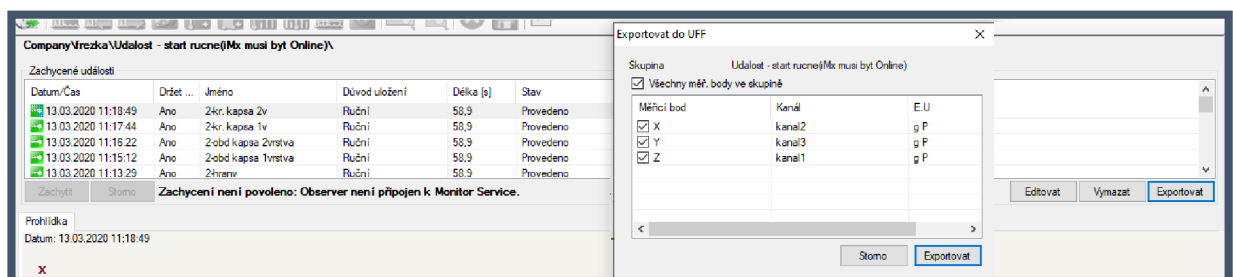
6. Náhľad na zachytené udalosti

- Umožňuje prezeranie jednotlivých udalostí
- Označiť udalosť, prípadne kanál > Pohľad na zachytenú udalosť  > Kliknúť, zvoliť zachytenú udalosť > Kliknúť pravým tlačidlom myši na časový graf zvoleného kanála > Vybrať spôsob zobrazenia vid' nasledujúci obrázok



7. Exportovanie nameraných dát

- Označiť udalosť, prípadne kanál > Pohľad na zachytenú udalosť > Kliknúť, zvoliť zachytenú udalosť > Exportovať > Zvoliť kanál > Exportovať vid' obrázok
- Namerané dáta sa exportujú do formátu UFF (Universal File Format files)

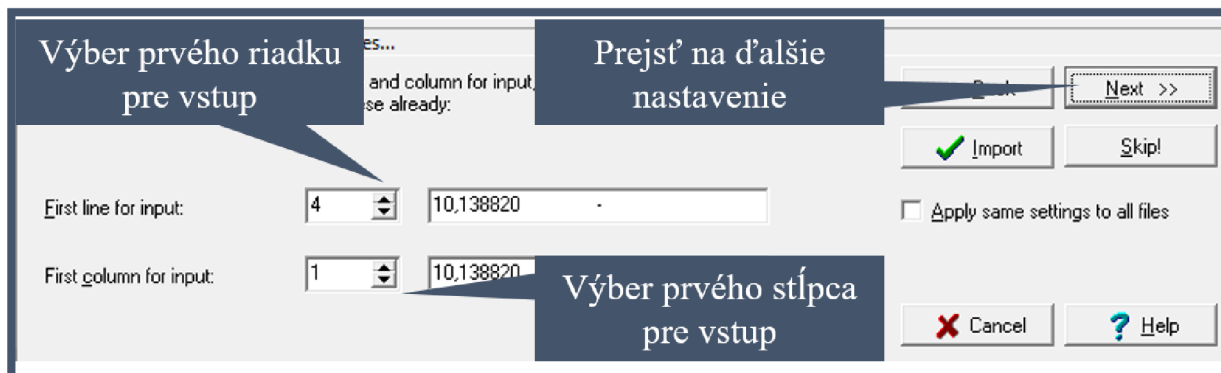
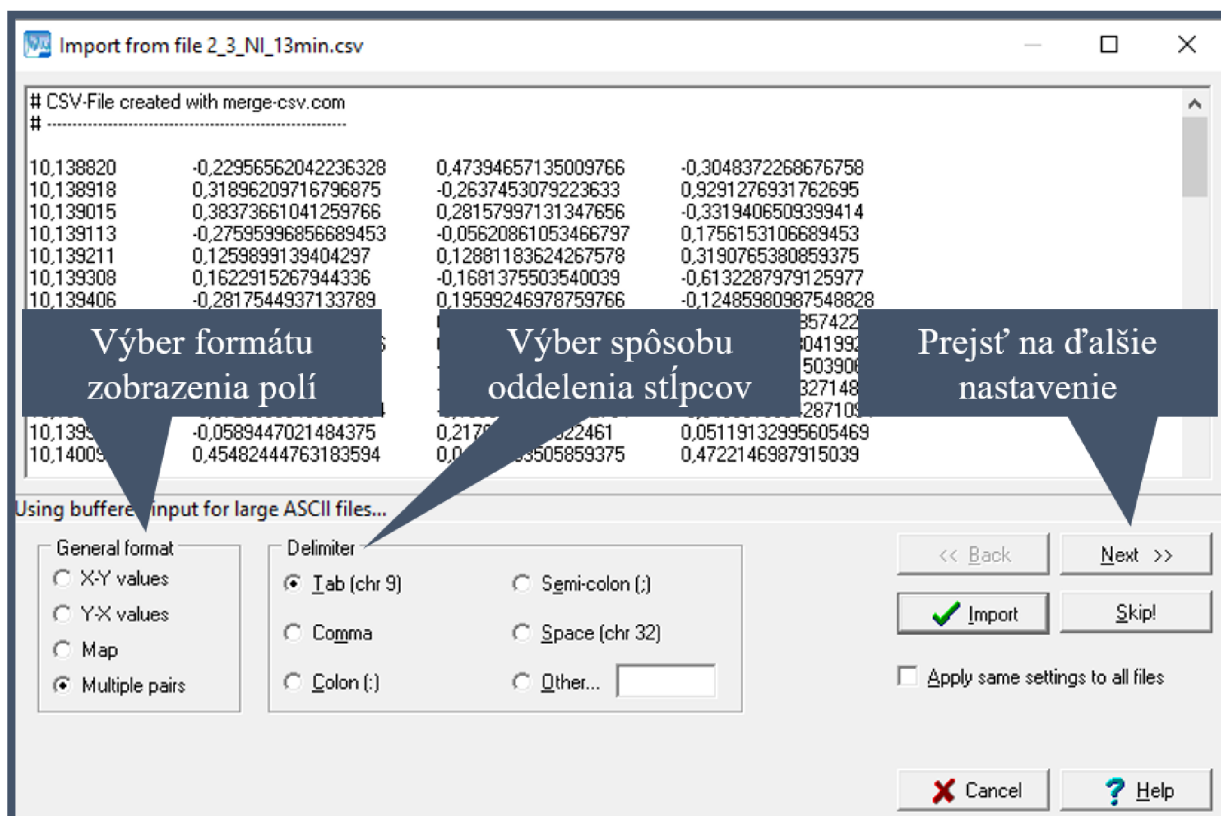


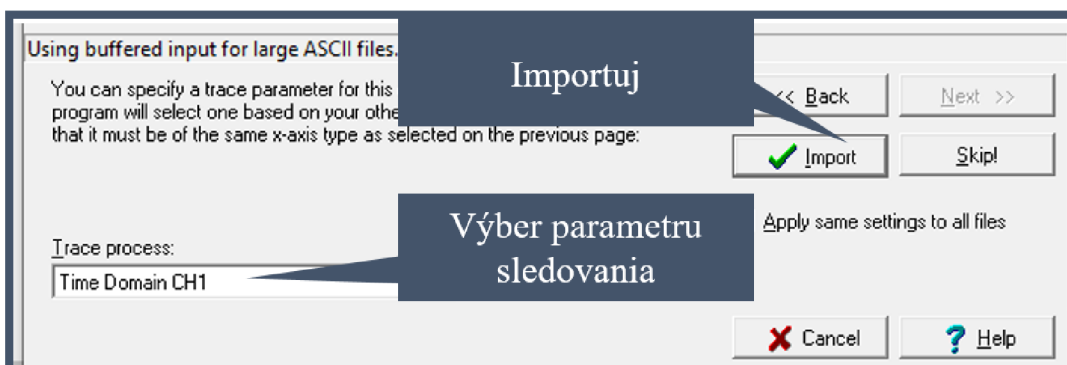
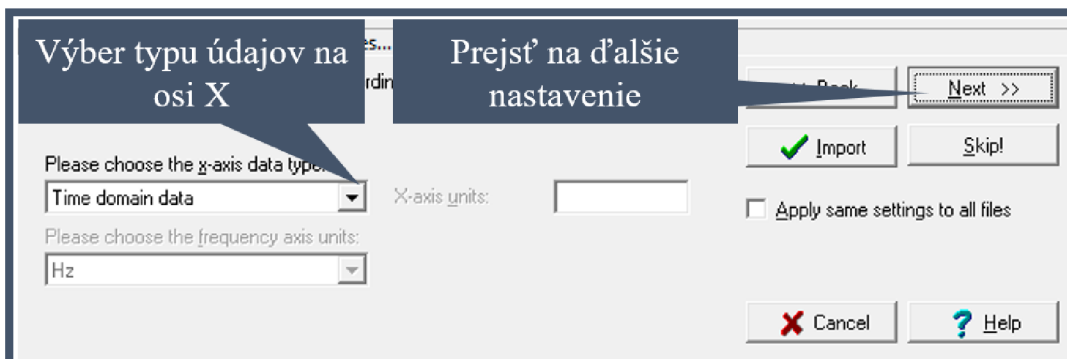
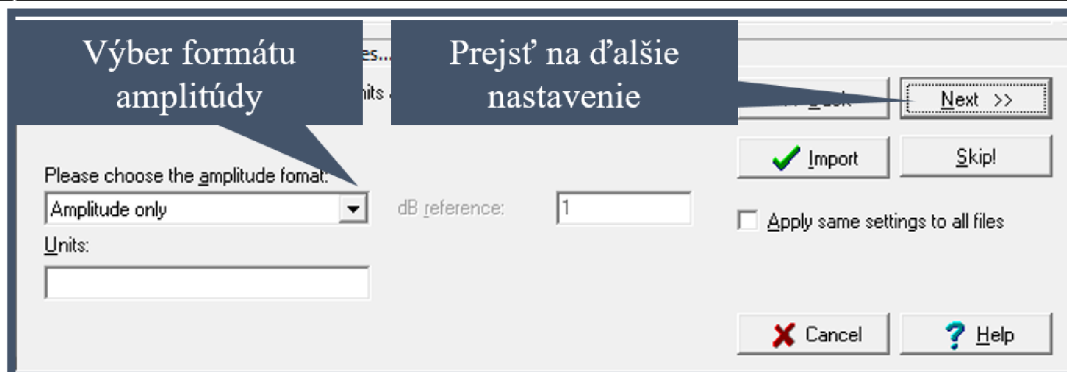
14.2 Analysis and Reporting Manager

Verzia: Analysis and Reporting Manager 2.3.6

1. Importovanie nameraných dát

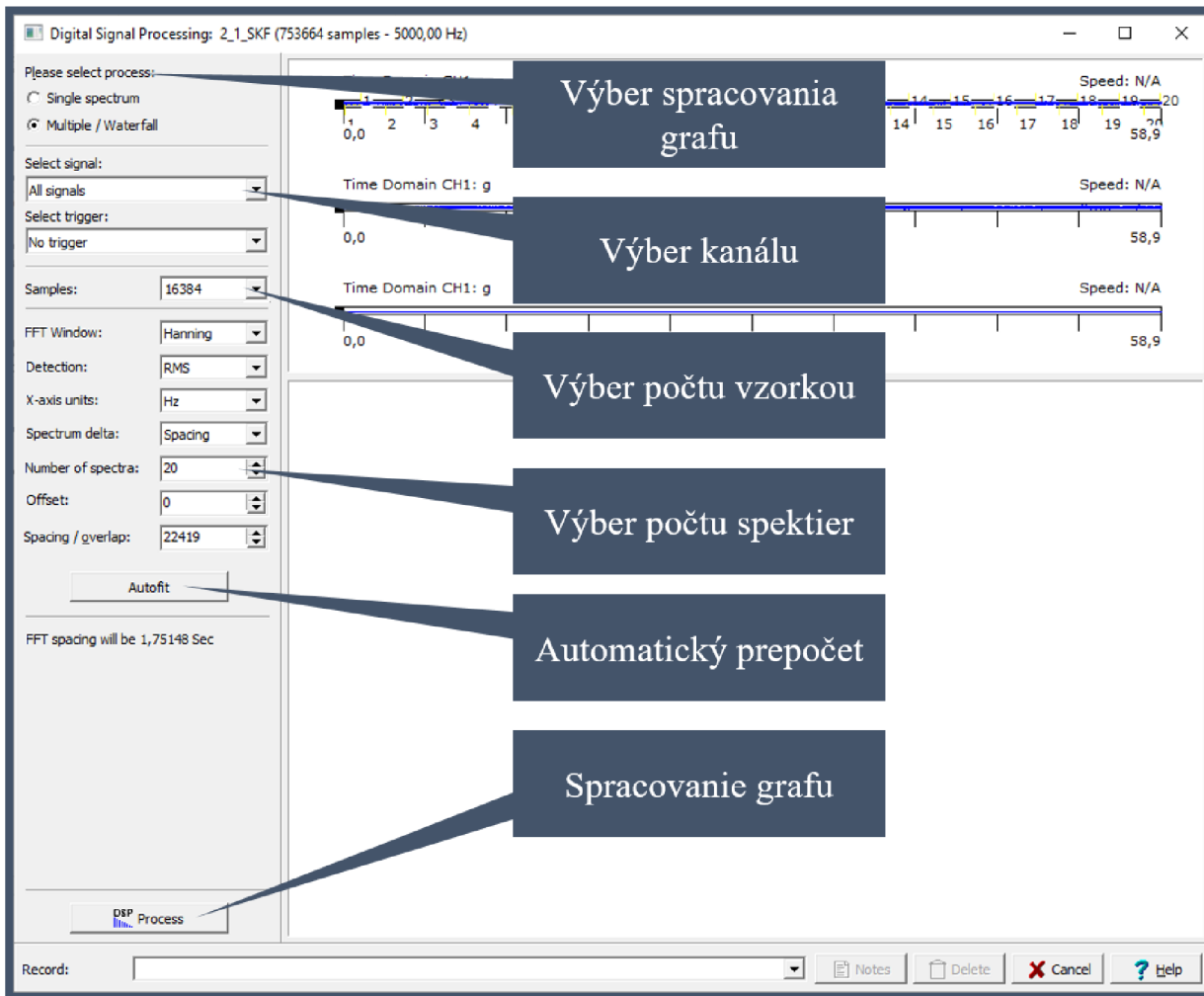
- Namerané dáta sa môžu importovať z rôznych formátov, ja som importovala súbory vo formáte UFF a CSV
- File > Open a data file > V poličku Files of type vybrať možnosť All files > Vybrať súbor na importovanie > Open
- V prípade CSV súboru vyskočí ďalšia tabuľka > Vyplniť tabuľku vid' nasledujúce obrázky > Po vypísaní tabuľky kliknúť na Import



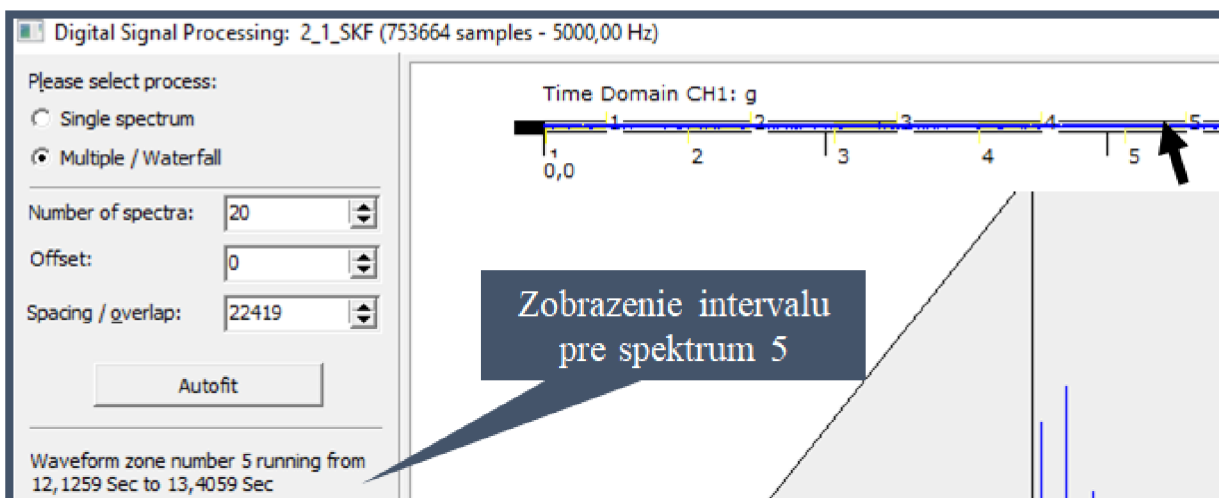


2. Spracovanie digitálnych signálov

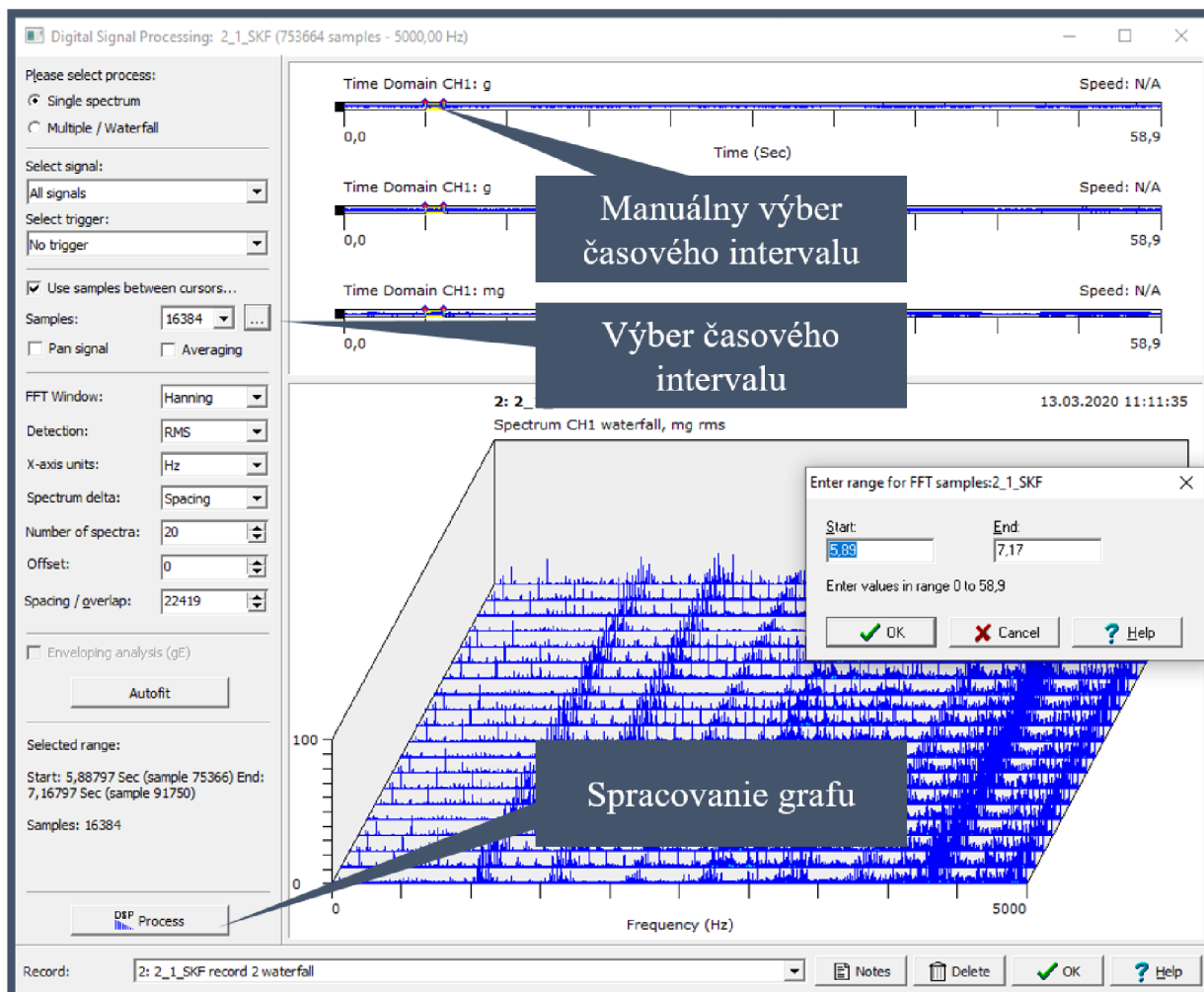
- Digitálne signály sa dajú spracovať pomocou DSP window (Digital Signal Processing window) Toto okno umožňuje spracovávať údaje pomocou FFT z časových priebehov do:
 - Jedného spektra (Single Spectrum) vytvoreného z celého priebehu.
 - Jedného spektra vytvoreného z časti časovej vlny.
 - Vodopádového grafu (Multiple / Waterfall spectrum) vytvoreného spracovaním postupných segmentov časovej vlny na spektrá.
 - Obálkové spektrum (gE spektrum) zo vstupného signálu.
- Označiť importovaný súbor v ľavom okne > DSP window > nastavenie tabuľky vid' nasledujúce obrázky > Process > OK



- Po spracovaní vodopádového grafu sa zobrazí v časovom priebehu číslovanie spektier, podľa predchádzajúceho výberu. Vďaka tomu je možné kurzorom zistiť časový interval jednotlivých spektier. Je potrebné nadísť kurzorom medzi dva rovnaké čísla, ktoré zobrazujú začiatok a koniec spektra. Zobrazené to je na nasledujúcom obrázku.



- Pri vytváraní jedného spektra je dôležitý výber časového intervalu. Je možné ho nastaviť manuálne v časovom priebehu pomocou tlačidla na klávesnici Ctrl a kurzorom, alebo vybrať časový interval a napísať jeho začiatočnú a konečnú hodnotu.



3. Exportovanie spracovaných dát

- Kliknúť pravým na FFT > Export > Vybrať formát
- Ja som exportovala FFT analýzy do Excelu, kde som s nimi ďalej pracovala.

C SPRACOVANÉ DÁTA OD SKF

Tab 1) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – čelné frézovanie

1. Čelné frézovanie							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,094208	0,095249	0,155456	0,155459	0,061249	0,060211
2	500 - 1000	0,466079	0,374790	0,369852	0,265373	-0,096227	-0,109417
3	1000 - 1500	0,413893	0,380743	0,563892	0,527416	0,149999	0,146673
4	1500 - 2000	0,625157	0,683385	0,684615	0,692811	0,059458	0,009426
5	2000-2500	0,414416	0,590250	0,458992	0,656034	0,044577	0,065784
6	2500-3000	1,295330	1,224545	1,491204	1,465984	0,195875	0,241439
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,069155	0,069019

Tab 2) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany

2. Frézovanie hrany							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,179890	0,241575	0,216458	0,303491	0,036569	0,061916
2	500 - 1000	0,496747	0,559115	0,725516	0,729639	0,228769	0,170523
3	1000 - 1500	0,410603	0,455151	0,509233	0,555759	0,098630	0,100608
4	1500 - 2000	1,352560	1,709276	1,529234	1,918450	0,176674	0,209174
5	2000-2500	0,458323	0,557918	0,525798	0,657840	0,067475	0,099922
6	2500-3000	1,073044	0,937203	1,251897	1,103900	0,178853	0,166697
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,131162	0,134807

Tab 3) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva

3. Frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,187350	0,270036	0,178146	0,274583	-0,009204	0,004547
2	500 - 1000	0,444099	0,453416	0,438187	0,526028	-0,005911	0,072612
3	1000 - 1500	0,428117	0,488545	0,410936	0,493354	-0,017181	0,004809
4	1500 - 2000	1,238291	1,636108	1,326479	1,645343	0,088188	0,009235
5	2000-2500	0,401153	0,552157	0,401090	0,561078	-0,000063	0,008921
6	2500-3000	0,962760	0,876905	1,019176	0,945398	0,056416	0,068493
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,018707	0,028103

Tab 4) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva

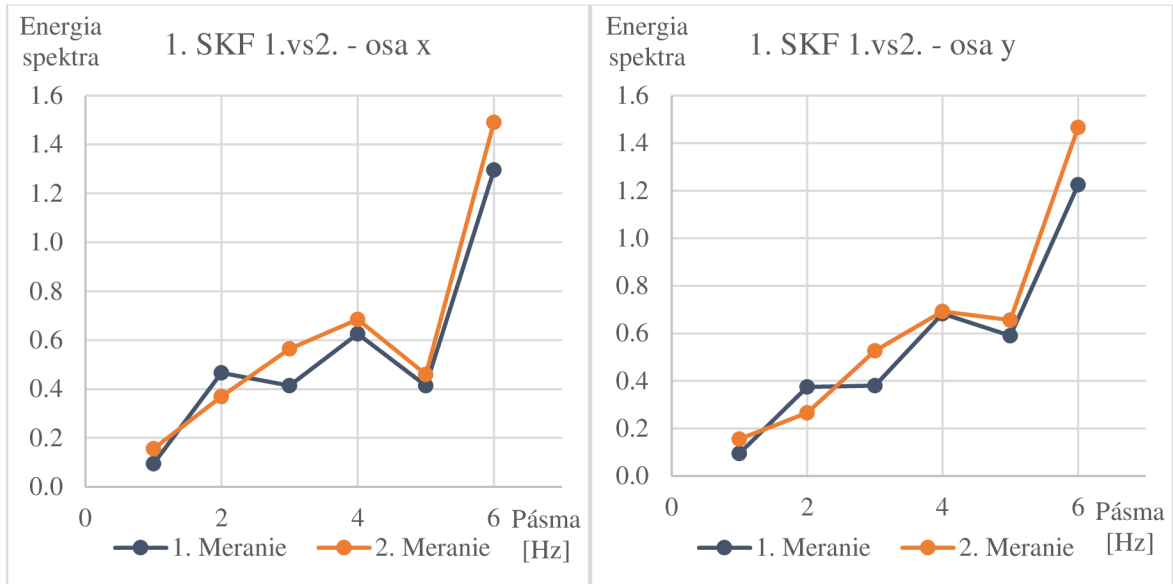
4. Frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,196431	0,285212	0,202275	0,318303	0,005844	0,033091
2	500 - 1000	0,421802	0,451013	0,496410	0,588650	0,074608	0,137638
3	1000 - 1500	0,434715	0,483697	0,505857	0,596138	0,071142	0,112441
4	1500 - 2000	1,285583	1,653960	1,481570	1,870291	0,195987	0,216331
5	2000-2500	0,403771	0,585318	0,451162	0,676375	0,047391	0,091057
6	2500-3000	1,011681	0,900688	1,048208	1,062109	0,036527	0,161421
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,071916	0,125330

Tab 5) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva

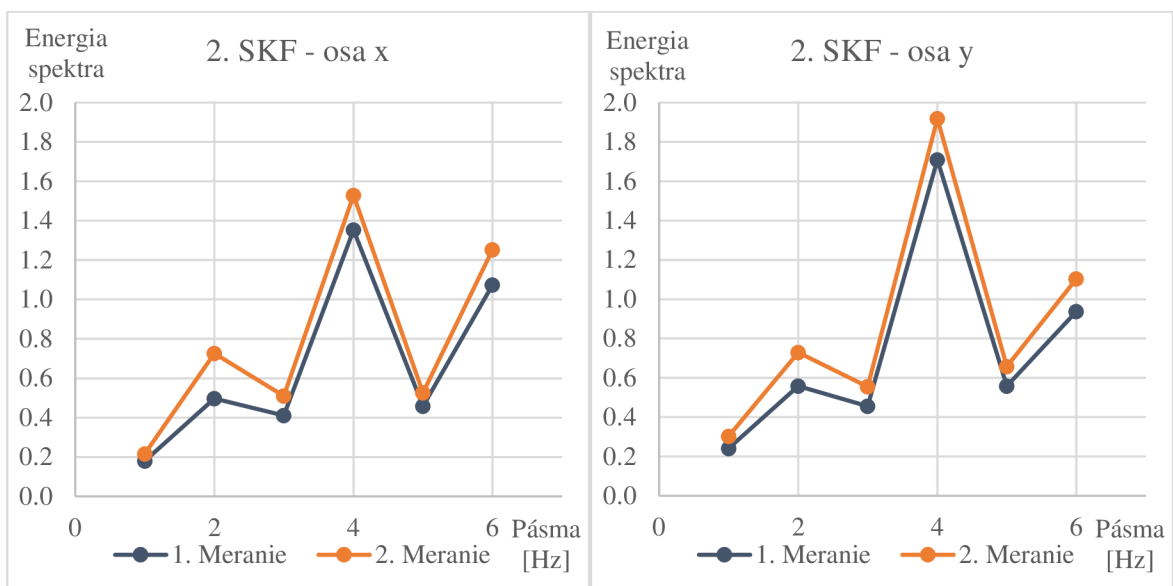
5. Frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,194020	0,270843	0,259892	0,359397	0,065872	0,088554
2	500 - 1000	0,417988	0,373551	0,539778	0,635537	0,121790	0,261986
3	1000 - 1500	0,428227	0,387203	0,488101	0,553435	0,059874	0,166232
4	1500 - 2000	1,327129	1,604402	1,439440	1,770901	0,112311	0,166499
5	2000-2500	0,421221	0,506640	0,436205	0,628164	0,014983	0,121524
6	2500-3000	1,172442	0,991745	1,139876	1,101846	-0,032566	0,110101
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,057044	0,152483

Tab 6) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva

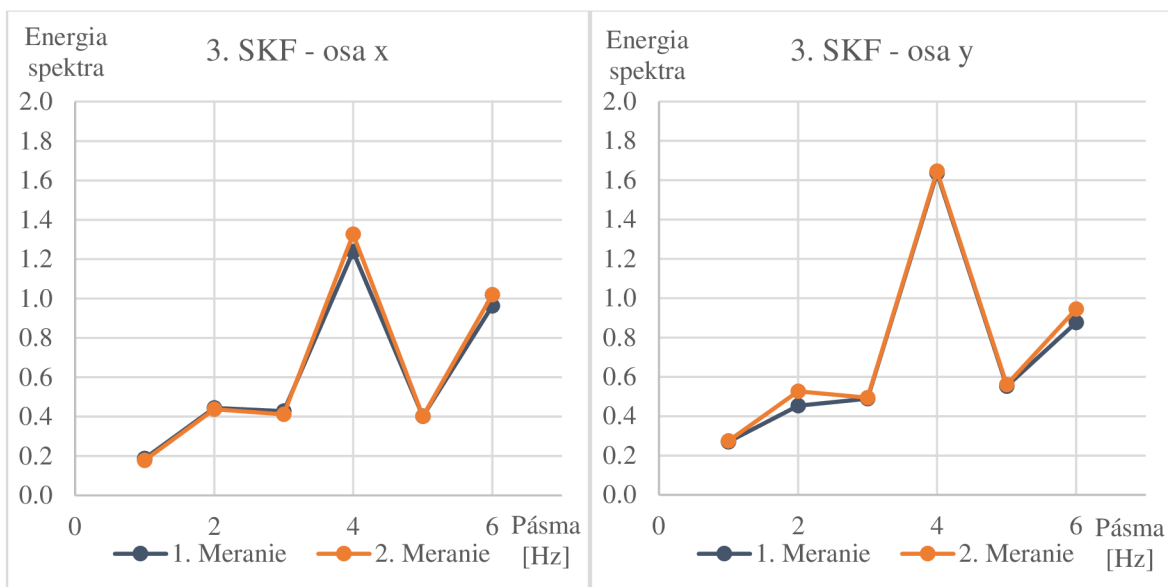
6. Frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,196727	0,277475	0,203091	0,318605	0,006363	0,041130
2	500 - 1000	0,480379	0,515799	0,490607	0,591953	0,010228	0,076154
3	1000 - 1500	0,451633	0,417764	0,493299	0,559809	0,041666	0,142045
4	1500 - 2000	1,279005	1,634991	1,467534	1,851187	0,188529	0,216196
5	2000-2500	0,420277	0,545321	0,451400	0,656544	0,031123	0,111223
6	2500-3000	1,086892	1,023091	1,146705	1,101178	0,059813	0,078087
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,056287	0,110806



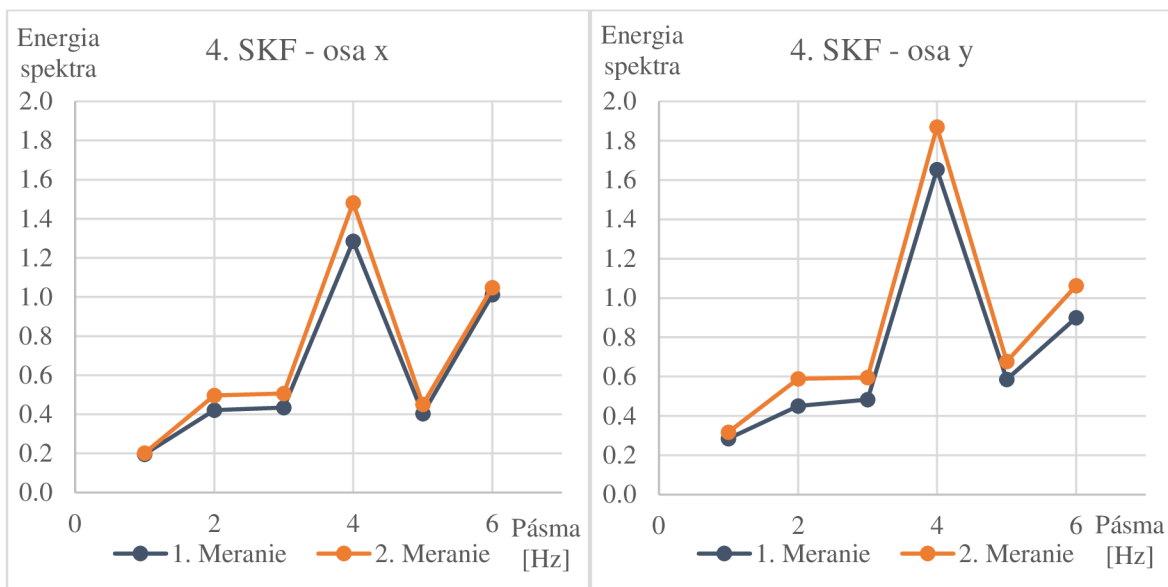
Obr. 1) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – čelné frézovanie



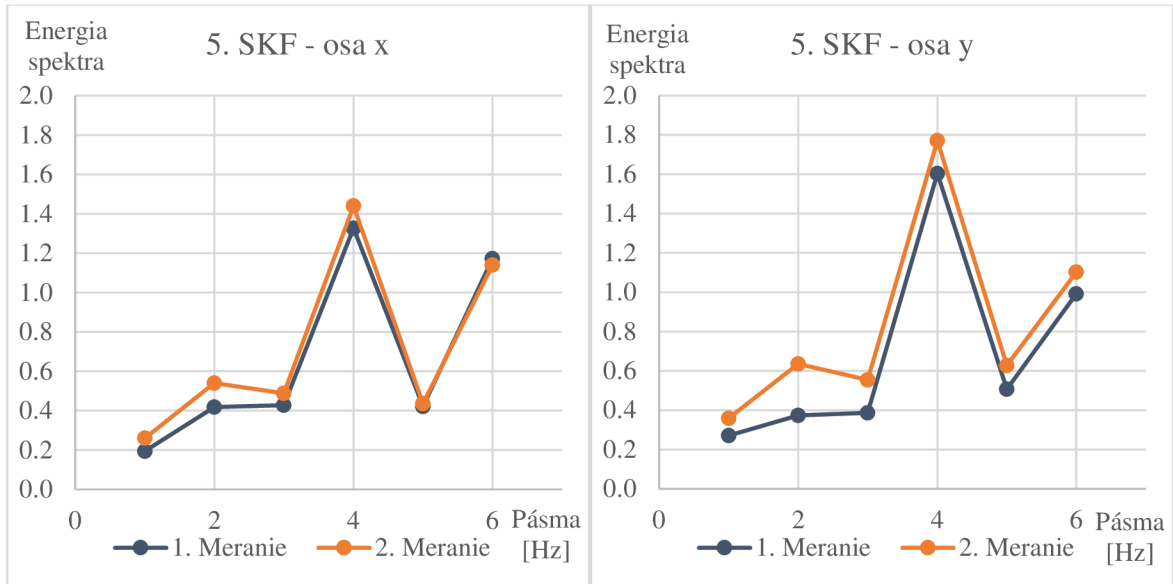
Obr. 2) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany



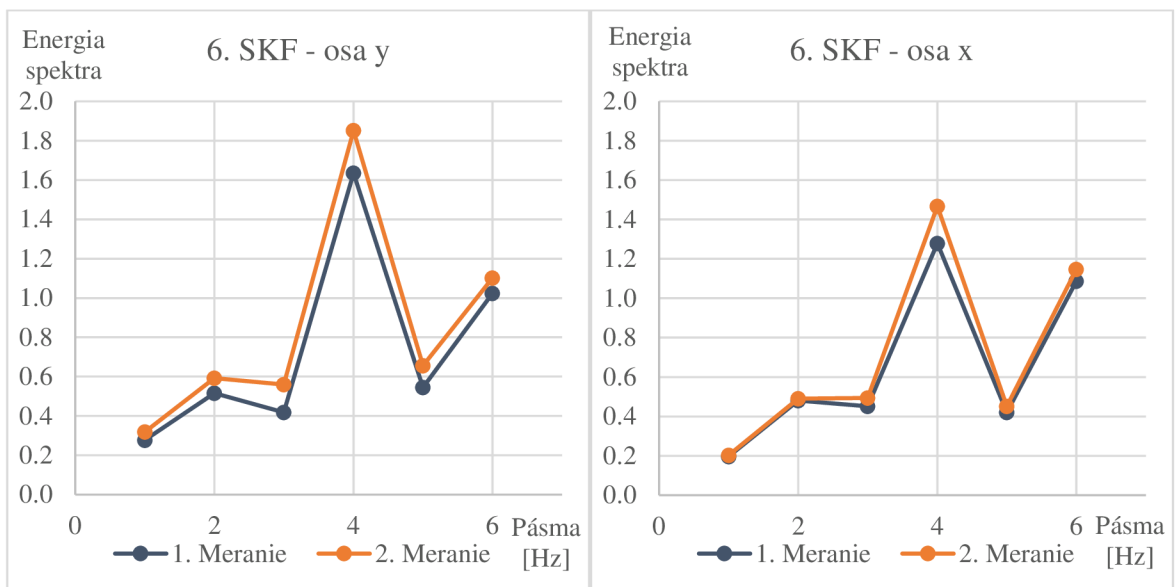
Obr. 3) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva



Obr. 4) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva



Obr. 5) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva



Obr. 6) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva

D SPRACOVANÉ DÁTA OD NI

Tab 7) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – čelné frézovanie

1. Čelné frézovanie							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	0,246443	0,183941	0,368435	0,138583	0,121992	-0,045357
2	500 - 1000	0,397682	0,575886	0,345667	0,456546	-0,052015	-0,119340
3	1000 - 1500	0,382699	0,553414	0,547096	0,800087	0,164397	0,246673
4	1500 - 2000	0,390566	1,011843	0,486815	0,957525	0,096249	-0,054318
5	2000-2500	0,515669	0,607237	0,673697	0,625379	0,158028	0,018142
6	2500-3000	1,050423	0,698831	1,641388	0,998580	0,590965	0,299749
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,179936	0,057591

Tab 8) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie hrany

2. Frézovanie hrany							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,835541	1,003474	2,170100	0,986521	0,334559	-0,016953
2	500 - 1000	1,816234	1,057865	1,972900	1,439958	0,156666	0,382093
3	1000 - 1500	1,495767	0,677453	1,996012	0,852744	0,500245	0,175291
4	1500 - 2000	1,901036	2,275625	2,513912	2,732008	0,612876	0,456383
5	2000-2500	1,722145	0,868720	1,780315	0,853081	0,058170	-0,015639
6	2500-3000	2,114706	1,100067	2,173100	1,018902	0,058394	-0,081165
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,286818	0,150002

Tab 9) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva

3. Frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,870142	1,309104	1,625279	1,413293	-0,244863	0,104189
2	500 - 1000	1,467086	0,970948	1,340757	1,092729	-0,126329	0,121781
3	1000 - 1500	1,498173	0,977065	1,334098	0,995407	-0,164075	0,018342
4	1500 - 2000	1,863460	2,312921	1,777213	2,623683	-0,086247	0,310762
5	2000-2500	1,608318	0,788099	1,295025	0,873751	-0,313293	0,085652
6	2500-3000	1,687648	0,960557	1,907831	1,214421	0,220183	0,253864
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						-0,119104	0,149098

Tab 10) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva

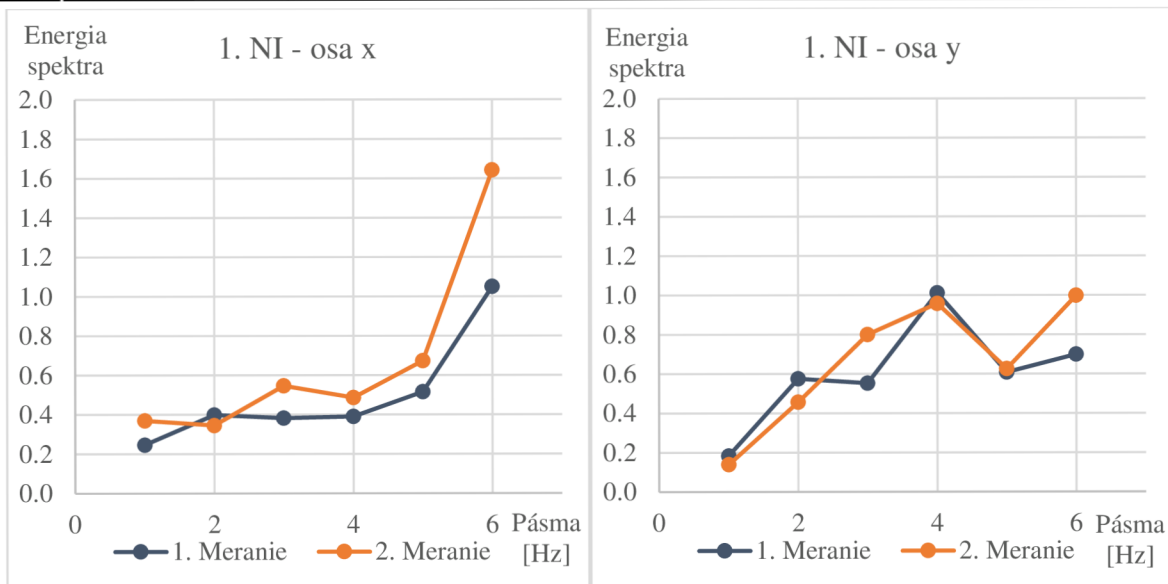
4. Frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,371497	1,162618	1,621814	1,345160	0,250317	0,182542
2	500 - 1000	1,320423	0,918369	1,421878	1,265957	0,101455	0,347588
3	1000 - 1500	1,376434	0,773678	1,329169	0,922052	-0,047265	0,148374
4	1500 - 2000	1,699582	2,268751	1,845691	2,654359	0,146109	0,385608
5	2000-2500	1,260015	0,721470	1,425356	0,897074	0,165341	0,175604
6	2500-3000	1,707900	0,997556	1,944589	1,200094	0,236689	0,202538
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						0,142108	0,240376

Tab 11) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva

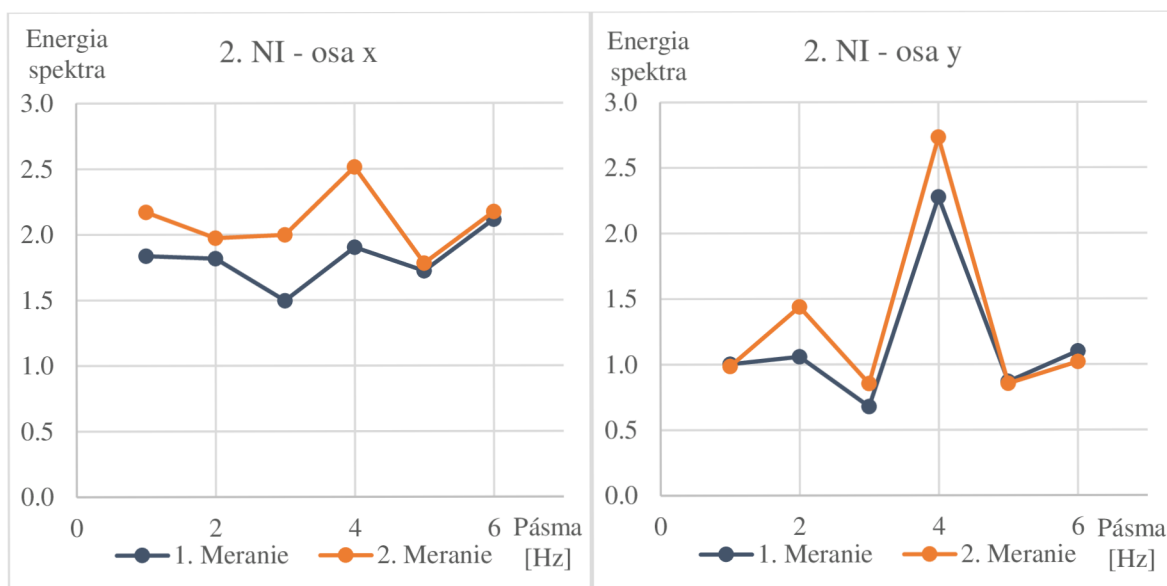
5. Frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,622225	1,293391	1,428541	1,237450	-0,193684	-0,055941
2	500 - 1000	1,273809	0,994266	1,245500	0,985878	-0,028309	-0,008388
3	1000 - 1500	1,227280	0,753389	1,183531	0,880879	-0,043749	0,127490
4	1500 - 2000	1,834233	2,149153	1,643507	2,384279	-0,190726	0,235126
5	2000-2500	1,242647	0,744897	1,264979	0,921465	0,022332	0,176568
6	2500-3000	1,541610	0,999153	1,896713	1,177187	0,355103	0,178034
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						-0,013172	0,108815

Tab 12) Energia spektier podľa frekvenčných pásiem – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva

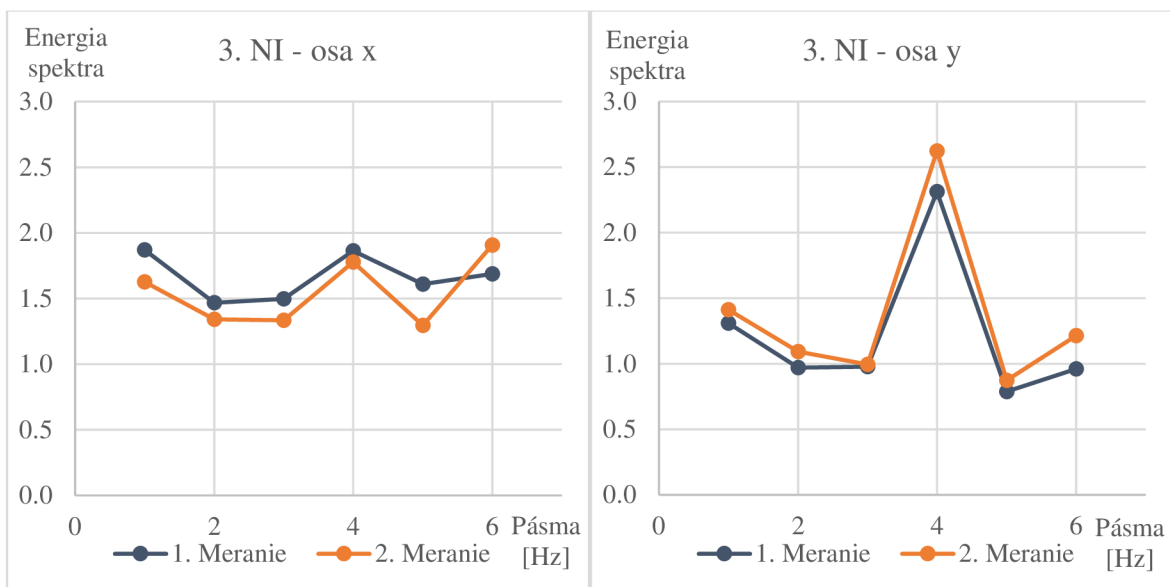
6. Frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva							
Č. Pásma	Pásma [Hz]	1. Meranie		2. Meranie		Rozdiel 2.-1.	
		x	y	x	y	x	y
1	0 - 500	1,464860	1,241142	1,610551	1,230397	0,145691	-0,010745
2	500 - 1000	1,432900	1,176233	1,276046	1,029840	-0,156854	-0,146393
3	1000 - 1500	1,348504	0,923171	1,283874	0,753130	-0,064630	-0,170041
4	1500 - 2000	2,028922	3,187876	1,840122	2,516701	-0,188800	-0,671175
5	2000-2500	1,434495	0,854861	1,284552	0,867319	-0,149943	0,012458
6	2500-3000	1,859146	1,157348	1,718269	1,019598	-0,140877	-0,137750
Priemerná hodnota rozdielu 2. merania a 1. merania						-0,092569	-0,187274



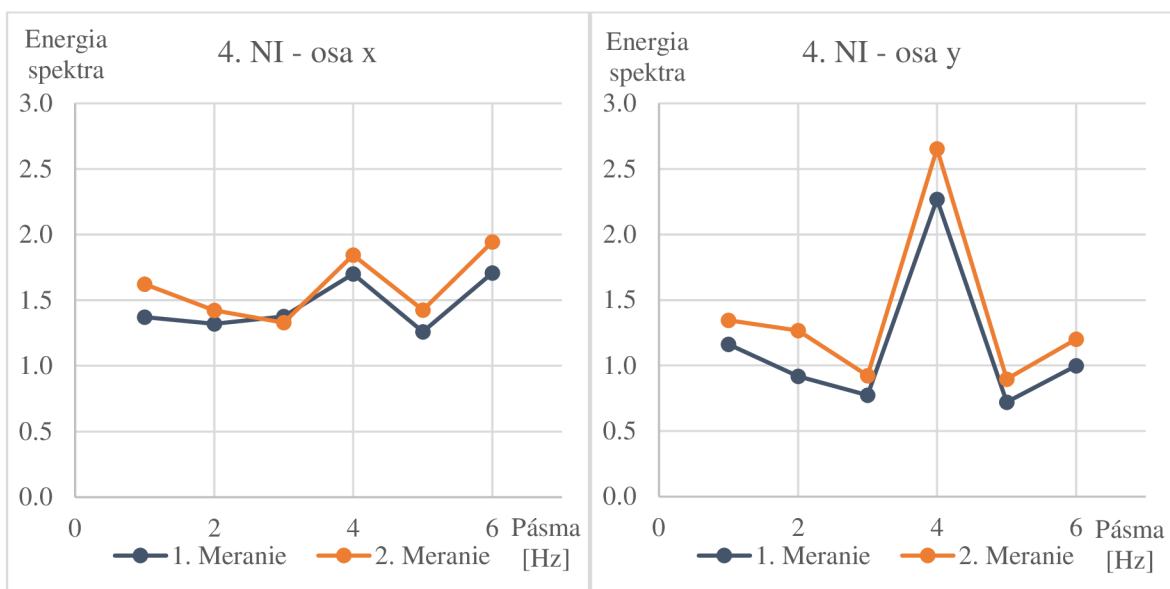
Obr. 7) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – čelné frézovanie



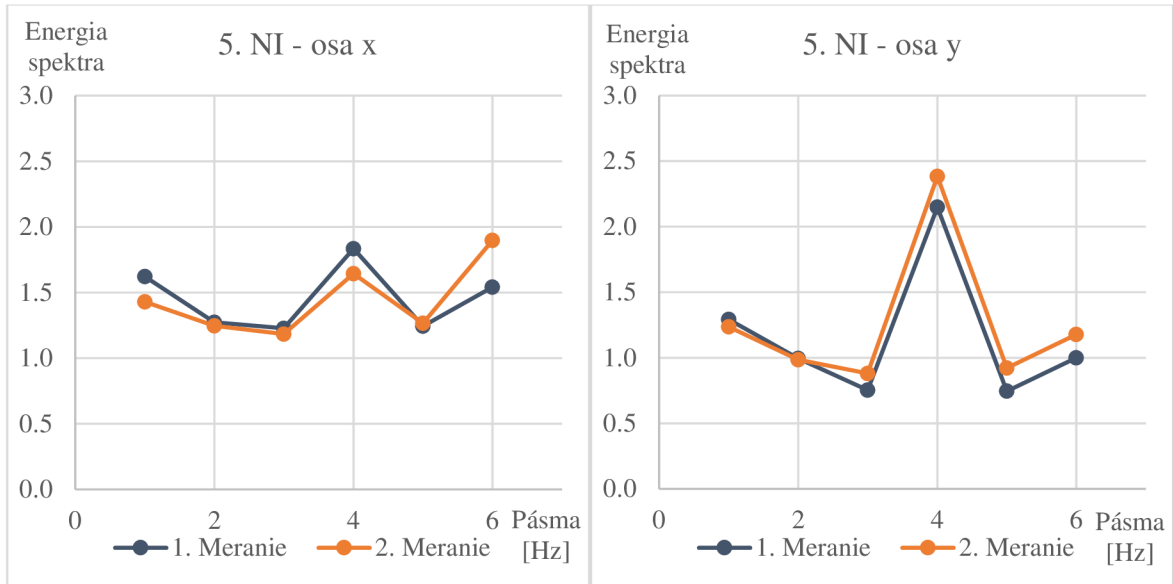
Obr. 8) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie hrany



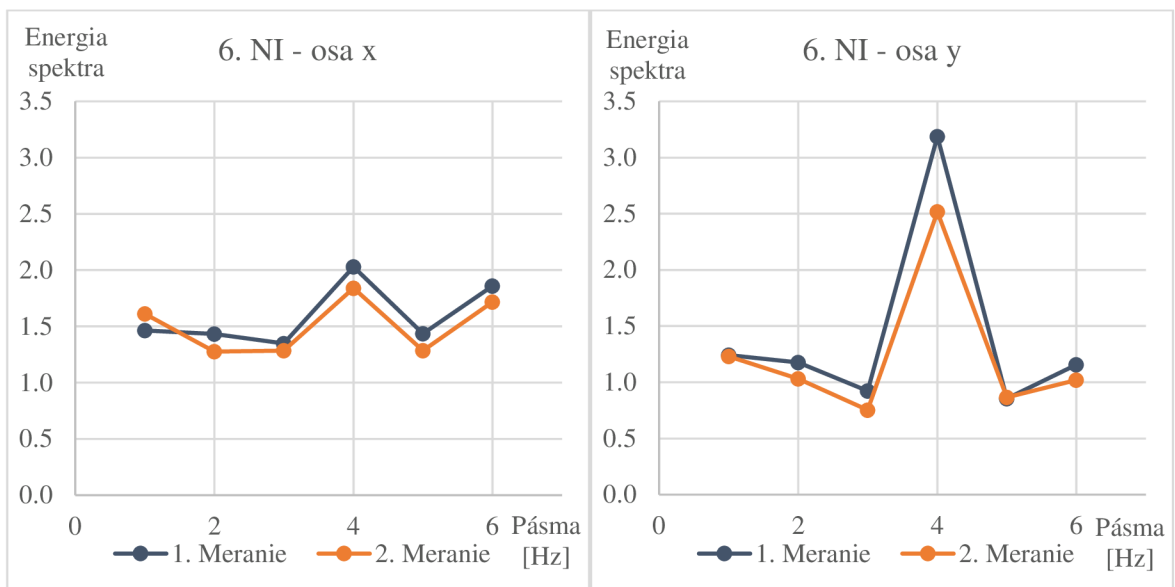
Obr. 9) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 1.vrstva



Obr. 10) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie obvodovej kapsy 2.vrstva



Obr. 11) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 1.vrstva



Obr. 12) Porovnanie energií spektier v závislosti na pásmach – frézovanie kruhovej kapsy 2.vrstva

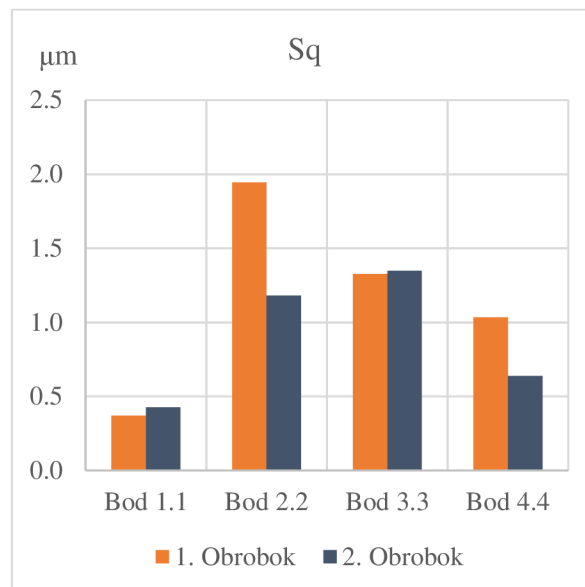
E SPRACOVANÉ DÁTA K ANALÝZE POVRCHU

Tab 13) Výškové plošné parametre 1. obrobku

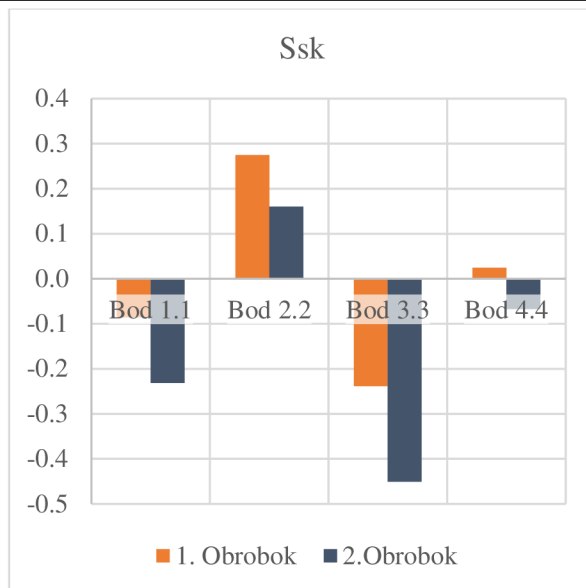
1. Obrobok					
Parameter	Bod 1.1	Bod 2.2	Bod 3.3	Bod 4.4	Jednotka
Sq	0,37155	1,94420	1,32850	1,03480	μm
Ssk	-0,08597	0,27452	-0,23860	0,02439	-
Sku	5,42200	2,78780	4,00340	2,96540	-
Sp	3,73830	19,21300	15,47000	5,73490	μm
Sv	3,60730	8,84930	7,61310	3,62540	μm
Sz	7,34560	28,06200	23,08300	9,36030	μm
Sa	0,28648	1,63550	1,10400	0,83189	μm

Tab 14) Výškové plošné parametre 2. obrobku

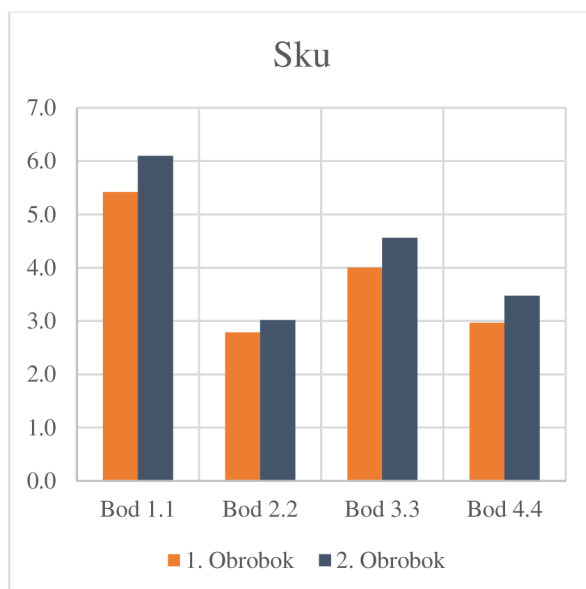
2. Obrobok					
Parameter	Bod 1.1	Bod 2.2	Bod 3.3	Bod 4.4	Jednotka
Sq	0,42614	1,18010	1,35010	0,63877	μm
Ssk	-0,23130	0,15991	-0,45083	-0,06746	-
Sku	6,10000	3,02160	4,55980	3,47760	-
Sp	6,66200	7,05880	18,67700	6,31370	μm
Sv	5,90240	5,72760	8,01220	6,33650	μm
Sz	12,56400	12,78600	26,68900	12,65000	μm
Sa	0,33432	0,95950	1,10410	0,50804	μm



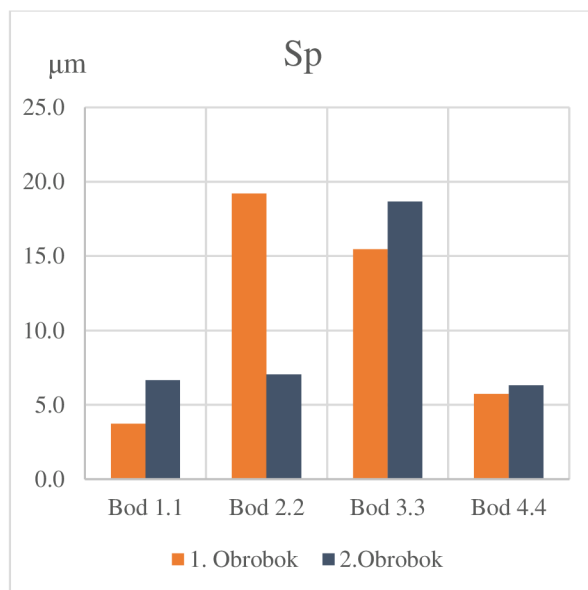
Obr. 13) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sq



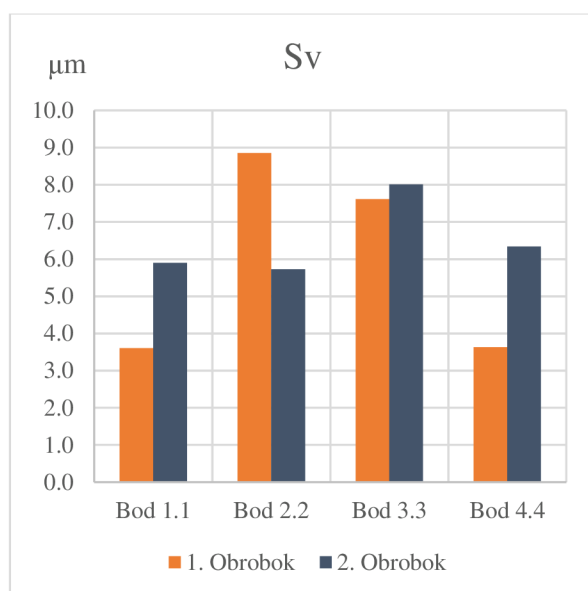
Obr. 14) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Ssk



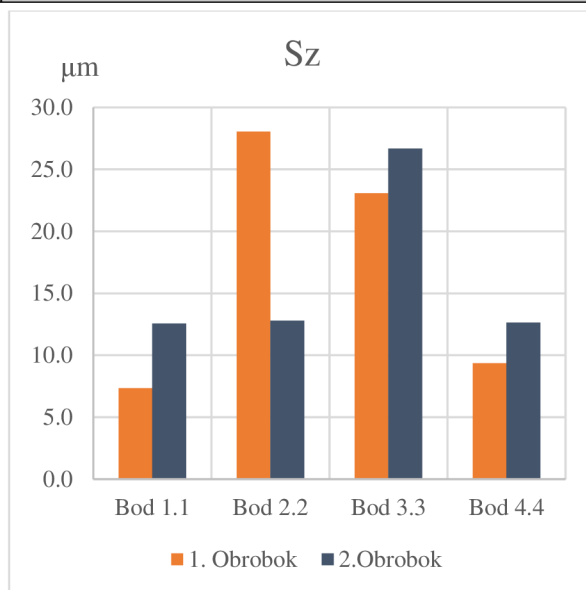
Obr. 15) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sku



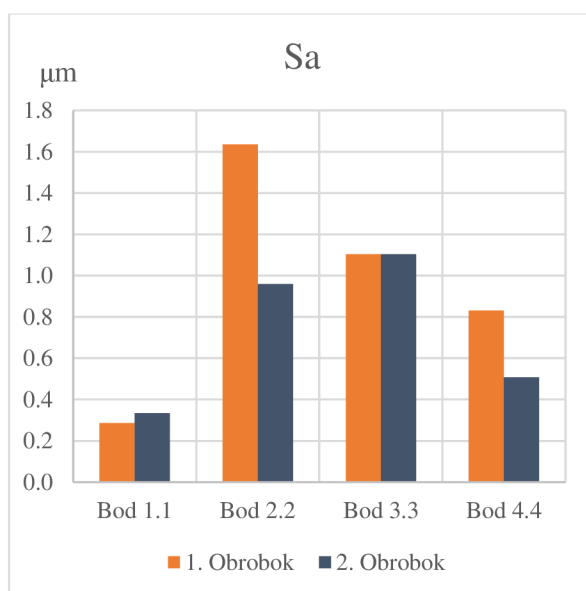
Obr. 16) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sq



Obr. 17) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sv



Obr. 18) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sz



Obr. 19) Histogram zobrazujúci porovnanie parametra Sa