

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti zvukové analýzy procesu obrábění a její využití

Autor: Bc. Jan Lerch
Vedoucí práce: Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali svými radami či materiálně při tvorbě této bakalářské práce. Především děkuji vedoucímu této práce Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D, který byl zároveň mým konzultantem. Dále bych rád poděkoval Doc. Ing. Josefu Formánkovi, Ph.D, za cenné rady.

V Plzni 22. 5. 2012

Jan Lerch

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Lerch	Jméno Jan		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „ Strojírenská technologie-technologie obrábění“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Vyšata, Ph.D	Jméno Jiří		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Možnosti zvukové analýzy procesu obrábění a její využití			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	59	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se především věnuje kontrole stability procesu obrábění pomocí analýzy akustické emise. Práci lze rozdělit na dvě hlavní části. V první části je popsán výzkum, který byl proveden pro potřeby této práce. Dále jsou v této části popsány zjištěné skutečnosti vyplývající z provedeného výzkumu. V druhé části jsou popsány zásady pro záznam a vyhodnocování akustické emise s ohledem na stabilitu procesu obrábění.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Akustická emise (AE), Frekvenční charakteristika, Windowing, Fourierova transformace (FT), Krátkodobá Fourierova transformace (FFT), Audacity, Frekvenční analýza, Vyšší harmonické frekvence</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Lerch	Name Jan		
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing processes-Technology of metal cutting“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Vyšata, Ph.D	Name Jiří		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete hen not applicable	
TITLE OF THE WORK	Possibilities of acoustic analysis of machining process and its use			

FAKULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	59	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma work is mainly devoted to check the stability of the machining process using acoustic emission analysis. The works is consists of two main parts. The first part describes research that was conducted for the purpose of this diploma work. In addition, this section describes the findings resulting from the research. The second section describes the principles for recording and evaluation of acoustic emission with respect the stability of the machining process.</p>
KEY WORDS	<p>Acoustic emission (AE), Frequency response, Windowing, Fourier transform (FT), Short-term Fourier transform (FFT), Audacity, Frequency analysis, Higher Harmonics</p>

Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Stanovení cílů řešení	1
2	Analýza současněho stavu.....	3
3	Zvolené nástroje a postupy pro záznam a analýzu AE.....	5
3.1	Použitá nahrávací zařízení	5
3.1.1	ZOOM H4 rekordér	5
3.1.2	Yoga EM-070	6
3.2	Program pro vyhodnocování AE.....	6
3.3	Převod zvuku do programu k jeho zpracování	7
3.4	Výběr zpracovávaného okna (Windowing)	7
3.5	Zpracování vybraného okna.....	10
3.6	Frekvenční charakteristika	11
4	Zjištěné skutečnosti	13
4.1	Získávání zvukových vzorků	13
4.2	Parametry nahrávání	13
4.3	Umístění nahrávacích zařízení	14
4.4	Získávání zvukových vzorků	15
4.5	Zvukové vzorky z průmyslu	16
4.5.1	Hranice stability.....	18
5	Analýza zvukových vzorků.....	20
5.1	Odečtení ruchu pozadí	20
5.1.1	Odečítat ruch pozadí?	20
5.2	Intenzita ruchu blízko k intenzitě zvuku procesu obrábění.....	22
5.2.1	Jak odečítat ruchy pozadí	24
5.3	Vykreslení frekvenční charakteristiky	27
5.3.1	Algoritmus	28
5.3.2	Funkce	28
5.3.3	Velikost.....	29
5.3.4	Osa.....	30
5.4	Zesílení zvukových vzorků	31
5.5	Vyhodnocení výsledků z frekvenční charakteristiky.....	32
6	Jednotlivé zásady.....	34
6.1	Získávání zvukových vzorků	34
6.1.1	Nahrávací kvalita.....	34

6.1.2	Úprava pracovního prostoru stroje	34
6.1.3	Umístění nahrávacího zařízení	34
6.1.4	Předzesílení.....	35
6.1.5	Vlastní záznam zvukových vzorků.....	36
6.2	Vyhodnocování výsledků z frekvenční charakteristiky.....	37
6.2.1	Příprava zvukového vzorku	37
6.2.2	Přejmenování zvukové stopy.....	38
6.2.3	Odečtení ruchů pozadí	38
6.2.4	Vykreslení frekvenční charakteristiky.....	40
6.2.5	Nastavení míry rozlišení a určení výsledku.....	42
7	Další zjištění skutečnosti.....	44
7.1	Ruchy z okolí stroje	44
7.2	Posun frekvenční charakteristiky	44
7.3	Vyšší harmonické frekvence.....	45
7.4	Bellovy laboratoře.....	45
7.5	Náhodné tóny a jejich původ	46
7.6	Ruchy pozadí	47
7.7	Ruch pozadí silnější než zvuk obrábění.....	47
7.8	Další zajímavé nástroje programu Audacity.....	47
7.8.1	Časová frekvenční charakteristika.....	47
7.8.2	Rozdělení stereo záznamu na dva mono záznamy	48
8	Závěr.....	49
9	Seznam použité literatury.....	51
10	Seznam příloh	52

1 Úvod

Již od počátku, kdy člověk začal používat obráběcí stroje, byl zvuk hlavním ukazatelem pro obsluhu, zda řezný proces probíhá správně. Na základě poslechu zvuku měnila obsluha parametry obrábění. U modernějších NC strojů upravuje obsluha alespoň posuv a otáčky.

Do budoucna je možné, zvukovou analýzu využívat při adaptivním řízení stroje procesu obrábění. Zvuková analýza může indikovat různé okolnosti provázející proces obrábění jako například nadměrné opotřebení nástroje a vibrace, které jsou při řezném procesu nežádoucí. Zvukovou analýzu lze do budoucna použít i pro vyhodnocování experimentů například opotřebení břitových destiček, obrobitelnost materiálů, odhalení ztráty stability atd. Zdá se tedy, že zvuková analýza by mohla mít široké využití.

Hardwarový a softwarový výkon dnešních počítačů by měl být dostatečný, aby bylo možno zvukovou analýzu procesu obrábění realizovat, což lze usuzovat z existence aplikací pro analýzu řeči lidí, hlasů živočichů, diagnostiku ložisek atd., které například umožňují rozpoznat člověka podle řeči bez vizuální identifikace nebo rozpoznat závadu v ložiskách hned v jejím zárodku. Pro tyto účely je třeba udělat náležitou studii, která by uvedla do vztahu jednotlivé vzorky zvuku a jim příslušející charaktery obrábění.

V této diplomové práci se budou řešit možnosti analýzy akustické emise, která vzniká při obrábění. Dále se tato diplomová práce bude zabývat získáváním a rozбором zvukových vzorků několika druhů obrábění. Rozbor bude spočívat v hledání zvukových projevů typických pro určité situace v řezném procesu. Metodou rozboru bude frekvenční analýza a případné další metody, jejichž nalezení je možným dílčím cílem práce.

1.1 Stanovení cílů řešení

Cílem této práce je prozkoumat možnosti analýzy akustické emise, která vzniká při obrábění a její přínosy pro praxi. Výzkum byl prováděn na pořízených zvukových vzorcích procesu obrábění. Ve vzorcích je třeba hledat takové charakteristiky, které by byly příznačné pro určitou situaci obrábění a pokud možno eliminovaly ostatní vlivy.

Největší pozornost však bude věnována stabilitě řezného procesu. Pro splnění tohoto cíle bude potřeba definovat stabilitu řezného procesu vztaheného k charakteristikám, které lze najít v akustické emisi. Dnes se stabilita definuje pomocí jevů, které jsou spojeny s procesem obrábění jako např.: drsnost povrchu, rozkmit sil, vibrace atd. Stabilitu je možno definovat pomocí energetických bilancí s důrazem na utlumování energie (teplo atd.). Dokud se energie řezného procesu přesouvá do neuspořádaných procesů, je možné řezný proces označit za stabilní. Ve chvíli, kdy se energie začne přesouvat do uspořádaných procesů (tón, uspořádaná drsnost atd.), začíná docházet ke ztrátě stability. Toto tvrzení lze doložit na soustavě tlumení, kde tlumič pohlcuje energii právě prostřednictvím jejího převodu na neuspořádaný pohyb.

Dalším dílčím cílem je navrhnout zásady pro získávání zvukových vzorků a vyhodnocování akustické emise tak, aby přiřadila konkrétnímu vzorku zvuku odpovídající charakter obrábění a stabilitu řezného procesu.

K těmto účelům je zapotřebí vybrat vhodné zařízení na měření akustické emise a software, kterým bude možno tuto akustickou emisi analyzovat. Dále je potřeba získat vhodné zvukové vzorky, na kterých bude proveden výzkum. U vzorků určených pro analýzu budou zaznamenávány technologické podmínky, při kterých byla zvuková emise naměřena a případně další skutečnosti (opotřebení nástroje, drsnost povrchu, typ stroje, nástroj atd.), které

by mohly napomoci najít hledané charakteristiky v akustické emisi. Zvukové vzorky budou měřeny tak:

- 1) Aby při postupném zvyšování technologických podmínek, obrábění překročilo mez stability.
- 2) Aby bylo možné porovnat akustické projevy jednotlivých zvukových vzorků.
- 3) Aby bylo možné prozkoumat samotnou hraniční oblast stability.

Také je žádoucí vyzkoušet, jaký vliv mají různá umístění (vzdálenost, úhel atd.) snímacího zařízení od místa, kde dochází k řeznému procesu, případně vliv zapnutého chlazení a dalších činitelů, které mohou ovlivňovat námi měřenou akustickou emisi.

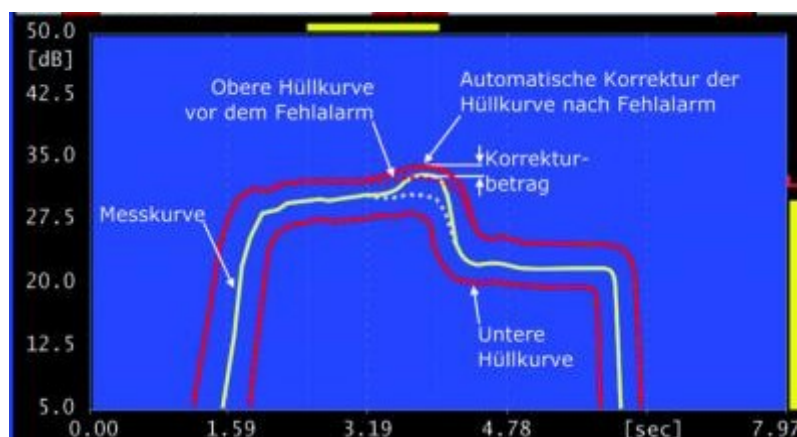
2 Analýza současněho stavu

Jak už bylo řečeno „zkušená“ obsluha obráběcího stroje dokáže rozpoznat, zda řezný proces probíhá správně, právě díky tomu, že vyhodnocuje akustickou emisi vznikající při obrábění. Dalo by se říci, že obsluha disponuje technickými prostředky biologického původu, které jí umožňují provádět analýzu akustické emise.

Ve chvíli, kdy se v obrábění objeví tón, který svou intenzitou převyšuje ostatní tóny, obsluha pozná, že řezný proces neprobíhá zcela správně (tedy, že řezný proces ztratil svou stabilitu). V některých případech je obsluha schopna rozpoznat příčinu problému a změnit parametry obrábění tak, aby se řezný proces stal opět stabilním. Z toho lze usuzovat, že vhodnými nástroji pro analýzu akustické emise (která by eliminovala co nejvíce vliv člověka), by mělo být možné získat metodu, která bude moci s vysokou objektivitou (člověk přináší určitou subjektivitu) posoudit stabilitu procesu obrábění. Případně bude možné rozpoznat příčinu jeho nestabilního průběhu a tím dát impuls adaptivnímu řízení, které by úpravou technologických parametrů obrábění vrátilo řeznému procesu jeho stabilitu, přímo při vlastním obrábění.

Poučit se můžeme z dosavadních výzkumů akustické emise procesu obrábění. Výzkumy akustické emise procesu obrábění se dnes zaměřují hlavně na kontrolu opotřebení nástroje či na aktivní kontrolu procesu obrábění.

Aktivní kontrolou procesu obrábění je myšleno, že stroj hlídá, zda určený proces obrábění probíhá správně přímo při vlastním obrábění (publikace [3]). To se realizuje tak, že je obrobena první součást a naměříme si akustickou emisi. Experimentálně bylo zjištěno, o kolik procent se může tato akustická emise lišit při výrobě dalších součástí, při zachování požadované přesnosti a tím dostaneme horní a dolní mezní křivku viz Obr. 1, mezi kterými by měl proces obrábění probíhat. V případě, kdy akustická emise překročí dané meze, stroj přeruší proces obrábění a upozorní obsluhu (je ovšem možné naprogramovat jiný úkon dle naší potřeby).



Obr. 1 Aktivní kontrola AE

S kontrolou opotřebení nástroje pomocí analýzy akustické emise jsou už jisté zkušenosti (publikace [1]). Ze závěrů můžeme usuzovat, že z akustické emise lze poznat stav opotřebení řezného nástroje. Bylo zjištěno například: „Toto opotřebení je nejlepší sledovat ve frekvenčním pásmu od 300 kHz do 1MHz, na vyhodnocování akustické emise používat

metodu amplitudové analýzy, s rostoucím opotřebením nástroje roste rozptyl amplitud, klesá hodnota jejich frekvencí atd.“ [1]. Bohužel i přes všechny výzkumy, brzdí nasazení této metody do praxe působení negativních vlivů, jako jsou například obtížné přenesení výsledků z laboratorních podmínek do rušného prostředí praxe, experimenty jsou prováděny jen pro úzkou skupinu materiálu a zkušební vzorky jsou tvarově nenáročnými součástmi. Praxe naproti tomu pracuje s velmi rozmanitým sortimentem materiálů a výrobky jsou často tvarově složitější atd.

Je zapotřebí zmínit, že všeobecným problémem při kontrole akustické emise procesu obrábění je hlučné prostředí, ve kterém většinou obráběcí stroje pracují. V tomto prostředí se vyskytuje mnoho náhodných tónů (frekvencí), které značně komplikují získání čistého zvukového záznamu, který by mohl být spolehlivě analyzován. Negativně může působit i chlazení či ofukování nebo spouštění pomocných pohonů atd.

Dalším problémem je tvar pracovních prostorů strojů, které dnes nejsou ideální z hlediska měření akustické emise. Z poznatků, které nabyli zvukaři, můžeme konstatovat, že rovnoběžné stěny (pracovní prostor stroje je většinou kvádr) nejsou z hlediska čistoty akustické emise příznivé. To je hlavně způsobeno dlouhým dozvukem, který způsobují rovnoběžné stěny. Dlouhý dozvuk způsobí, že se vzorek akustické emise znečistí doznívajícími zvuky.

Analýza akustické emise by mohla mít širší uplatnění, než kontrolu procesu obrábění. Můžeme například uvést diagnostiku stroje. Na začátku, po „zaběhnutí“ nového stroje, naměříme jeho akustickou emisi při práci naprázdno. Po nějaké době, když budeme chtít vědět, zda je vše se strojem v pořádku, naměříme aktuální akustickou emisi (je zapotřebí dát pozor, abychom měřili za stejných podmínek jako na začátku, každá odlišnost jako například použití jiného nástroje, by mohla negativně ovlivnit výsledek zkoušky). Díky existenci nástrojů pro odstranění ruchu pozadí, lze od emise naměřené po zaběhnutí stroje odečíst aktuální akustickou emisi. Tím zjistíme, zda se emise liší. Pokud se akustické emise budou lišit, je pravděpodobné, že je něco v nepořádku (například opotřebené ložisko ve vřetenu). Podle intenzity odlišnosti, by mělo být možné říci, jak vážná je závada.

Závěrem této kapitoly lze říci, že jisté zkušenosti v oblasti analýzy AE procesu obrábění, již existují. Z těchto poznatků je možno čerpat v této práci. Přesto nejsou zmínky o tom, že by tyto metody analýzy AE procesu obrábění, byly používány v praxi. Metody analýzy AE procesu obrábění jsou zatím spíše ve stadiu laboratorních pokusů. Důvodem jsou již zmíněné obtížné přenesení výsledků z relativně klidných podmínek laboratorních do rušného prostředí praxe [1], [3], [10].

3 Zvolené nástroje a postupy pro záznam a analýzu AE

Z rozboru současného stavu analýzy AE a ze stanovených cílů této práce, o kterých pojednává kapitola 1., lze vyvodit závěry, že bude zapotřebí hledat takové nástroje a postupy pro analýzu zvuku, aby:

- Poloha mikrofonů pokud možno částečně nebo úplně eliminovala vliv rušivých vlivů v akustické emisi (dále jen AE) procesu obrábění (nevhodný tvar obráběcího prostoru stroje, chlazení, hluky okolí atd.).
- Nástroje pro analýzu AE procesu obrábění umožňovaly odečtení ruchů pozadí ze zvuku procesu obrábění (například hluk ostatních strojů, chlazení, rotujícího nástroje).
- Z analýzy AE byla patrná stabilita procesu obrábění v určitém časovém intervalu.
- Získávání a vyhodnocování AE nevyžadovalo příliš drahé nástroje a nečinilo tak z analýzy AE těžko dostupnou metodu pro kontrolu procesu obrábění.

3.1 Použitá nahrávací zařízení

Záznam zvukového signálu vzorků byl pořizován pomocí dvou nahrávacích zařízení. První z nich je zařízení s označením ZOOM H4 Rekordér viz Obr. 2. Druhý je monofonní elektretový mikrofon s označením Yoga EM-070, který byl připojen k počítači. Tyto nahrávací zařízení má vedoucí této diplomové práce k dispozici. Dalším důvodem, proč byly zvoleny tyto dvě nahrávací zařízení, je možnost průzkumu, zda analýzu zvukového signálu procesu obrábění, lze praktikovat s běžně dostupnými nástroji nebo bude třeba použít speciální nástroje.

Obě zařízení disponují elektretovými mikrofony. Elektretový mikrofon je speciálním druhem kondenzátorového mikrofonu. Kondenzátorové mikrofony jsou díky svým vlastnostem považovány za nejlepší existující druh mikrofonů, tomu odpovídá jejich vysoká cena. I přes jejich vysokou cenu patří mezi nejpoužívanějších mikrofony v nahrávacích studiích. Elektretový mikrofon má natolik horší vlastnosti, že se v nahrávacích studiích nepoužívá, ale pro technické účely jsou jeho vlastnosti dostačující. Je zapotřebí také brát v úvahu, že sériová výroba elektretových mikrofonů umožňuje, že elektretové mikrofony jsou cenově dostupnější než kondenzátorové mikrofony. Je tedy možné říci, že poměr ceny a výkonu je u elektretových mikrofonů lepší než u kondenzátorových.

3.1.1 ZOOM H4 rekordér



Obr. 2 ZOOM H4 Rekordér

Použité nahrávací parametry:

Vzorkovací kmitočet - 96kHz

Hloubka - 24bitů to odpovídá rozlišovací schopnosti 144dB

3.1.2 Yoga EM-070



Obr. 3 Monofonní elektretový mikrofon Yoga EM-070

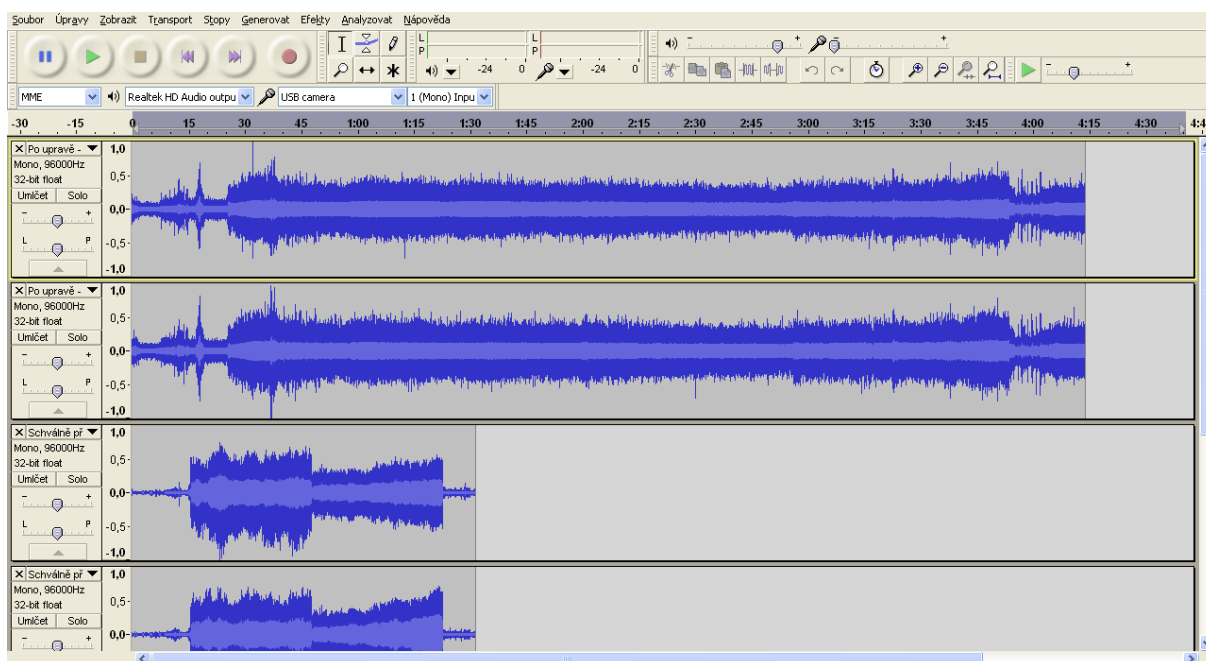
Použité nahrávací parametry:

Vzorkovací kmitočet - 96kHz

Hloubka - 32bitů

3.2 Program pro vyhodnocování AE

Akustickou emisi budeme zkoumat v programu s názvem „Audacity“ (Obr. 4). Tento program byl zvolen kvůli své dostupnosti ve volné licenci GPL a jeho mnoha nástrojům pro zpracování zvuku (vykreslení frekvenční charakteristiky, odečtení ruchů pozadí, zesílení zvukového signálu, rozdělení stereo záznamu na dvě stopy atd).



Obr. 4 Audacity

3.3 Převod zvuku do programu k jeho zpracování

Zvukový signál (analogový), který získáme, je zapotřebí převést do digitální formy, aby bylo možno jej dále zpracovávat počítačem. K tomu slouží tzv. A/D (analogově/digitální) převodníky. Ty provádí dva kroky při přeměně signálu z analogového do digitálního tvaru a to vzorkování a kvantizaci s kódováním. Je jedno, v jakém pořadí jsou tyto operace prováděny. Takto zpracovaný zvukový vzorek lze dále digitálně zpracovávat.

Zvukový vzorek v digitální formě není nutné zpracovávat bezprostředně po převodu do digitální formy. Je možné jej uložit na disk a vrátit se k jeho zpracování později.

Dále jsou některé vybrané metody zpracování zvuku, které by mohly být použity v této práci.

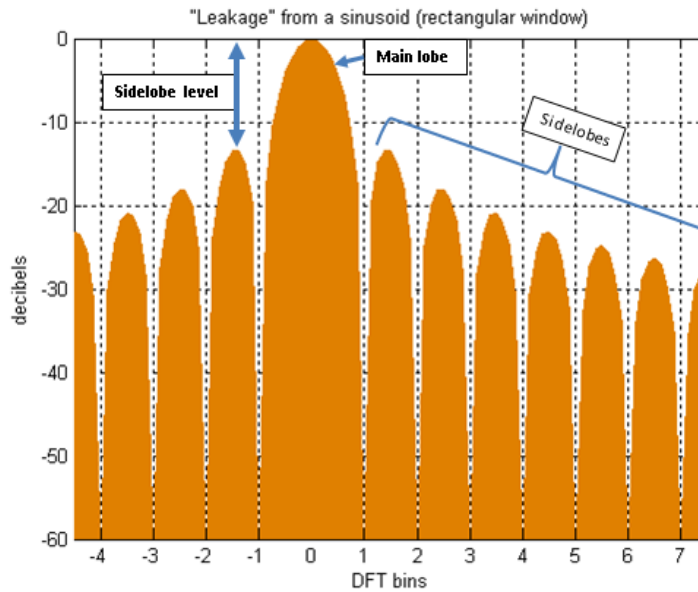
3.4 Výběr zpracovávaného okna (Windowing)

Pod pojmem „Okno“ si můžeme představit přesně ohraničenou oblast čtyřúhelníkového tvaru. Na ose x je ohraničena dobou trvání (časem) a na ose y je ohraničena intenzitou akustické emise (dB).

Nejdříve je důležité vybrat oblast (časový úsek), který bude analyzován. Bezprostředně po vybrání oblasti ji vážeme na některé z následujících oken, které ještě upravují vstupní data pro analýzu: Pravoúhlé okno, Hammingovo okno, Bartlettovo okno (trojúhelníkové), Hanningovo okno, Blackmanovo okno, Gaussovo okno, Blackman-Harissovo okno, Obdélníkové okno.

Důvodem proč signál ještě upravovat je ten, že signál může obsahovat v konečném intervalu (okně), určité zkreslení spektra (zákmity) ve Fourierově Transformaci. Zákmity (postranní laloky) vznikají díky zákmitům spektra pravoúhlého okénka. Z těchto důvodů je signál ještě před aplikací Diskrétní Fourierovi transformace (DFT) vynásobena okénkem (váhovou funkcí). To zabrání nebo minimalizuje zkreslení signálu. Z důvodu zlepšení přesnosti výpočtů, okna rozdělují signál na N vzorkovaných úseků. Sousední úseky se mohou libovolně překrývat. Dále se budou vyskytovat výrazy hlavní a vedlejší lalok, proto je na obrázku (Obr. 5) ukázka.

Na ose y je znázorněna intenzita v decibelech a na ose x jsou znázorněny diskrétní frekvence (jednotky těchto frekvencí jsou „*DFT bins*“, indexy se často označují k , $k-1$, $k+1$ atd.). Skutečná frekvence (hlavní lalok) je na ose x označena indexem 0. Všechny ostatní indexy označují nepravé frekvence (vedlejší lalok).

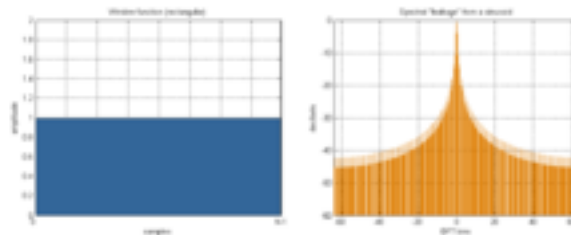


Obr. 5 Windowing

V ideálním případě by hlavní lalok byl úzký a vysoký, zatím co postranní laloky by byly nízké a málo početné. Tyto požadavky ve většině případů vylučují. Platí, čím je hlavní lalok širší, tím je menší „ostrost“ (menší rozlišovací schopnost frekvenční analýzy) spektra a méně falešných frekvencí (postranních laloků). Čím je hlavní lalok okenní funkce užší, tím je více falešných frekvencí ve spektru (postranních laloků).

Obdélníkové okno

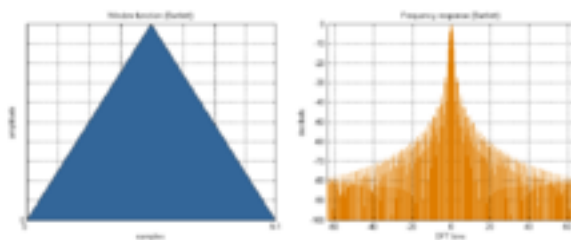
Snímaný signál je násoben v celé své délce jedničkou (tedy signál nijak neupravuje, to vede k nespojitosti na koncích, s výjimkou, kdy vstupní signál přesně pasuje do délky okna). To odpovídá situaci přímého výpočtu Fourierovi transformace. Zobrazuje stav výsledného spektra bez vážení. Toto je dobrá volba pro analýzu spojitého signálu. Zvukový signál je většinou nespojitý signál.



Obr. 6 Obdélníkové okno

Barlettovo okno

Může být chápáno jako konvoluce dvou polovičních obdélníkových oken. Hlavní lalok má dvojnásobnou šířku než u obdélníkového okna a tím menší „ostrost“. Toto okno rozdělí signál na N vzorkovaných úseků, které se nepřekrývají.



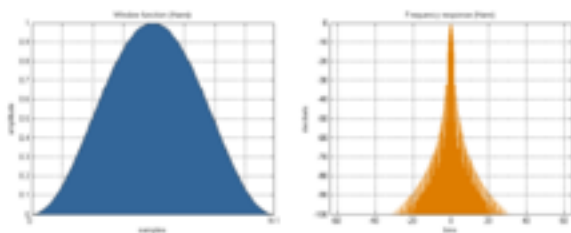
Obr. 7 Barlettovo okno

Welchovo okno

Liší se od trojúhelníkového okna tím, že snižuje intenzitu signálu výměnou za větší potlačení postraních laloků. Tuto metodu lze s výhodou použít pro detekci frekvencí, nacházejících se blízko sebe. Princip je takový, že signál je rozdělen na k překrývajících se N vzorkovaných úseků (překrytí (D) úseků bývá $D=50-75\%$). Každý úsek je násoben N vzorkovacím oknem $w(n)$ kvůli omezení vzniku falešných frekvencí.

Hanningovo (Hannovo) okno

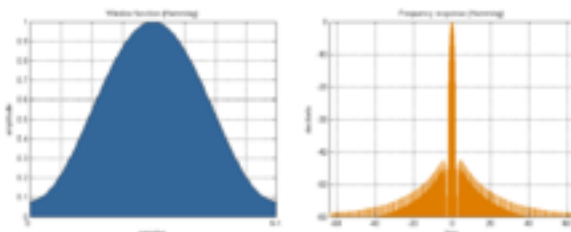
Vlastnosti tohoto okna umožňují, že spektrum má dobrou „ostrot“, ale rovněž dobře potlačuje nepravé frekvence. Je možno říci, že je to kompromis mezi ostrotí spektra a potlačením vedlejších frekvencí. Vyznačuje se úzkým hlavním lalokem a malými postraními laloky. Vzorkované úseky mají překrytí $D=50\%$.



Obr. 8 Hanningovo okno

Hammingovo okno

Vychází z Hanningova okna. Má tedy podobné vlastnosti, ale více potlačuje postranní laloky. Má širší hlavní lalok a tím menší „ostrot“. Při přechodu z časové do frekvenční charakteristiky se neprojeví šum vzniklý „vyříznutím“ časového intervalu. Opět rozděluje signál na N vzorkovaných úseků a používá 50% překrytí těchto úseků.

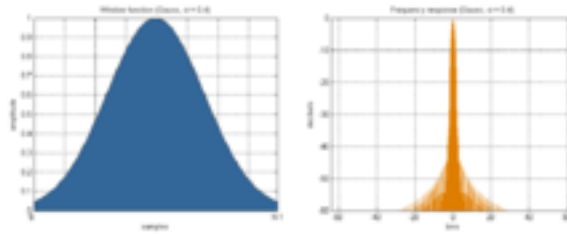


Obr. 9 Hammingovo okno

Gaussovo okno

Funkce Gaussova okna odstraňuje postranní pásma, protože Fourierova transformace Gaussiánu je Gaussián. Gaussovo okno lze parametrizovat. To umožní, že jsme schopni

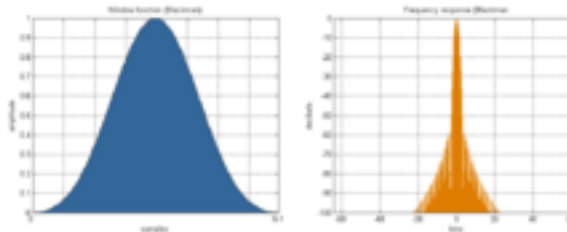
Gaussovo okno optimalizovat například pro analýzu pomalu měnící se signály, ustálené děje nebo naopak pro analýzu signálů, které se mění velmi rychle nebo skokově.



Obr. 10 Gaussovo okno

Blackmanovo okno

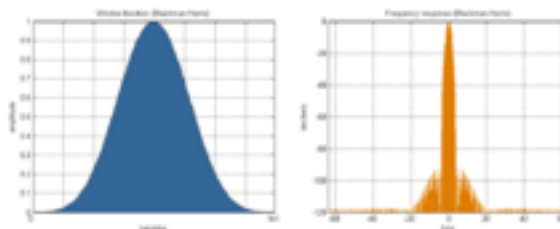
Má velmi dobré potlačení vedlejších laloků. Vyznačuje se širším hlavním lalokem a tím vzniklou malou „ostrot“. Vzorkovací úseky mají přesah $D=40\%$.



Obr. 11 Blackmanovo okno

Blackman-Harrisovo okno

Toto okno má širší hlavní lalok a více potlačuje nepravé frekvence. Z toho vyplývá, že jeho spektrum je méně „ostré“. Signál je rozdělen na N vzorkovacích úseků se přesahem $D=75\%$.



Obr. 12 Blackman-Harrisovo

Pro účely této práce bylo používáno Hanningovo okno. V programu Audacity bylo přímo doporučeno pro potřeby frekvenční charakteristiky. Přesto jsou k dispozici i další okna a není vyloučeno, že některé z nich by mohlo být vhodnější pro vyhodnocování AE, než to jaké bylo použito v této práci. Do budoucna lze doporučit, aby se studiem těchto oken zabývali další výzkumníci.

3.5 Zpracování vybraného okna

Fourierova transformace (FT)

„Fourierova transformace je vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů (sin, cos), obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Fourierova transformace

slouží pro převod signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční. Signál může být ve spojitém či diskretním čase.“ [6]. Tato transformace se ukázala jako vhodný nástroj na zpracování různých signálů, ve frekvenční oblasti. Nevýhoda Fourierovi transformace (dále jen FT) je, že nedává žádnou představu o časovém umístění jednotlivých frekvencí. Abychom získali představu i o časovém umístění frekvencí je nutné FT různě upravovat. V případě, že nebudeme uvažovat jen exponenciální funkce, ale libovolný systém funkcí, které splňují několik podmínek (hlavně úplnost), můžeme různě Fourierovu transformaci zobecňovat. Tyto zobecněné FT (Waweletova transformace) dále rozšiřují možnosti uplatnění Fourierovi transformace.

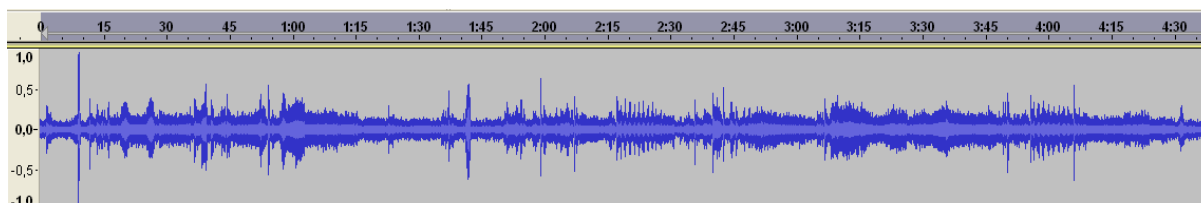
Protože zpracovaný zvukový signál v této práci je diskretní, je třeba použít tzv. diskretní Fourierovu transformaci (DFT). Nevýhodou této transformace je její časová náročnost, která se zvětšuje s velikostí zkoumaného intervalu. Z tohoto důvodu byl vypracován algoritmus, který značně snižuje dobu výpočtu. Tento algoritmus se nazývá „krátkodobá Fourierova transformace“ (FFT). Krátkodobá Fourierova transformace dává představu jak o frekvencích, tak i o jejich umístění v čase. Omezení je v tom, že nedostaneme konkrétní čas, ve kterém se frekvenční složky vyskytují, ale dostaneme časové intervaly, ve kterých se určité pásmo frekvencí vyskytuje. Čím delší bude sledovaný interval (při krátkodobé Fourierovi transformace je tento interval konstantní velikosti v celém průběhu vyhodnocování), tím přesnější informace dostaneme o frekvenčních složkách, ale horší informaci o jejich časovém umístění a naopak. Z tohoto důvodu se při aplikaci krátkodobé Fourierovi transformace musíme rozhodnout, zda je důležitější dobré rozlišení v čase nebo ve frekvenci a podle toho zvolit velikost sledovaného intervalu.

Do budoucna lze doporučit výzkum toho, jaké máme nástroje pro vyhodnocování signálů. V této práci byl použit program Audacity, který používá FFT. Je možné, že jiné programy, například Matlab, umožňující použít i jiné „nástroje“ pro analýzu signálů, budou vhodnější než program Audacity. Přesto tento program pro účely této práce, byl dostačující.

3.6 Frekvenční charakteristika

V této práci se často vyskytuje pojem frekvenční charakteristika, proto je vhodné tento pojem vysvětlit, pro lepší pochopení problematiky popsané v této práci.

V každém okamžiku slyšíme z okolí směsi různých frekvencí (všechny zvuky kolem nás). Na obrázku (Obr. 13) je vidět časový záznam zvukového signálu z našeho okolí.

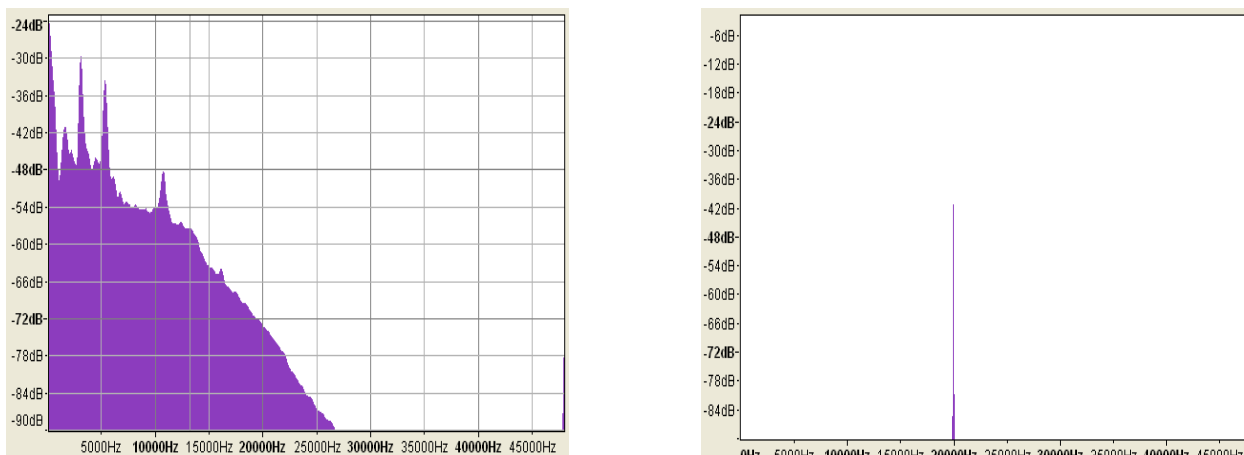


Obr. 13 Zvukový signál

Každá frekvence (tón) v něm obsažená má vlastní intenzitu. Křivka, která popisuje míru zastoupení jednotlivých frekvencí (tónů), se nazývá *Frekvenční charakteristika*.

Vlevo na obrázku (Obr. 14) je vidět frekvenční charakteristika zvukového signálu, který je na Obr. 13. Je patrné, že ve zvuku jsou zastoupeny hlavně hlubší tóny (nižší) do 6000 Hz. Směrem k vyšším tónům jejich intenzita a míra zastoupení klesá. Frekvence neboli tóny nad

25kHz se ve vzorku již téměř nevyskytují. Na obrázku (Obr. 14) vpravo je vidět frekvenční charakteristika jedné konkrétní frekvence (konkrétního tónu) o hodnotě 20kHz.



Obr. 14 Frekvenční charakteristika

4 Zjištěné skutečnosti

Při výzkumu, který byl proveden pro potřeby této práce, bylo dosažené následující skutečnosti:

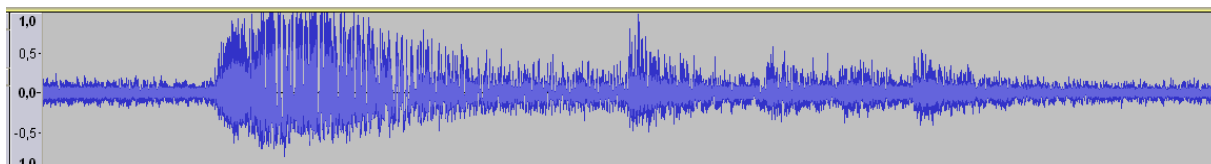
1. Jak připravit přístroje před vlastním nahráváním a jaké nastavit parametry nahrávání, přístrojů pro záznam AE.
2. Kam umístit nahrávací zařízení pro záznam AE, při získávání AE procesu obrábění.
3. Jak postupovat při vlastním měření AE.
4. Jak odečítat ruchy pozadí od zvuku obrábění
5. Jak upravovat zvukového vzorku před vlastním vyhodnocováním.
6. Jak provádět analýzu vzorku AE procesu obrábění.
7. Jak vyhodnocovat získané poznatky z frekvenční analýzy.

4.1 Získávání zvukových vzorků

Před začátkem záznamu zvukových vzorků bylo nutné udělat několik nezbytných rozhodnutí. Za prvé bylo potřeba rozhodnout o tom, jaké budou použity parametry nahrávání AE a za druhé zvolit umístění nahrávacích zařízení tak, aby byl vyzkoušen vliv různých umístění nahrávacích zařízení v pracovním prostoru stroje na zaznamenanou AE.

4.2 Parametry nahrávání

Parametry nahrávání byly voleny dva. Šlo o vhodný pracovní rozsah a kvalitu nahrávání. Pracovní rozsah (předzesílení) byl zvolen s ohledem na to, aby vzniklé zvuky svou intenzitou nepřekročily maximální povolenou hodnotu záznamu a nedošlo tak k přebuzení. Kdyby došlo k přebuzení, je pravděpodobné, že by vzorek AE měl malou vypovídající hodnotu a nemohl by tak být použit pro účely této práce a měření by muselo být opakováno. Ukázka přebuzeného signálu viz obrázek (Obr. 15).



Obr. 15 Zvukový signál

Parametry nahrávání byly zvoleny: vzorkovací kmitočet (frekvence) 96kHz a hloubku 24 bitů to odpovídá rozlišovací schopnosti 144dB. To znamená, že přístroj je schopný rozeznat tóny, které se budou lišit o 144dB (např.: přístroj je schopný rozeznat tón o intenzitě -5dB a zároveň v tom samém okamžiku tón o -145dB).

Jde o nadprůměrnou nahrávací kvalitu z hlediska toho, jaké nahrávací kvality je dnes možné dosáhnout. Například kvalitní záznam hudby na CD má parametry: Vzorkovací frekvenci 44.1 kHz a hloubku 16 bitů. Je tedy patrné, že pro potřeby této práce byla použita

dvojnásobná vzorkovací frekvence a o 8 bitů vyšší hloubka než jaká se používá pro kvalitní záznam hudby na CD. Bylo by možné nahrávat s větším vzorkovacím kmitočtem, ale k tomu by bylo zapotřebí dražší a kvalitnější nahrávací aparatury. Při vyšším vzorkovacím kmitočtu je možné analyzovat kratší časové úseky. Bylo vyzkoušeno, že při vzorkovací frekvenci 96 a nastavené velikosti 512 (více kapitola 5.3.3) je možné analyzovat časový úsek o délce pět tisíc sekund, to byla dostatečně krátká doba pro potřeby této práce. Zvětšení vzorkovací frekvence by pravděpodobně o hodně zvýšily náklady na měření AE (potřeba lepšího vyhodnocovacího přístroje a lepšího nahrávacího zařízení), ale přínosy pro analýzu akustické emise by už nemusely být tak výrazné. Přesto by zvýšení vzorkovací frekvence některé výhody přineslo. Například by bylo možné analyzovat větší intervaly frekvencí. To je způsobené tím, že nejvyšší frekvence, která se ještě zobrazí ve frekvenční charakteristice, má poloviční hodnotu vzorkovací frekvence (Shannonův teorém). To znamená, že v této práci mohl být zkoumán interval frekvencí (0 - 48 kHz).

Dalším důvodem proč není dobré volit zbytečně vysoké parametry nahrávání je to, že při zvyšujících se nahrávacích parametrech se zvyšují nároky na úložné místo. Například pro jedнокanálový (mono) záznam bychom potřebovali $H \times F \times T$ prostoru na disku v bitech (kde H je bitová hloubka, F vzorkovací frekvence v Hz a T je doba záznamu v sekundách). V našem případě pro $H=24$ bitů, $F=96\,000$ Hz a $T=60$ s, by bylo zapotřebí $24 \times 96\,000 \times 60 = 138\,240\,000$ bitů = 17 280 000 byte = cca 17 MB volného místa pro jedнокanálový záznam AE o délce jedné minuty. Pokud by záznam byl dvoukanálový (stereo) bylo by zapotřebí dvojnásobného místa na disku tedy 34 MB.

4.3 Umístění nahrávacích zařízení

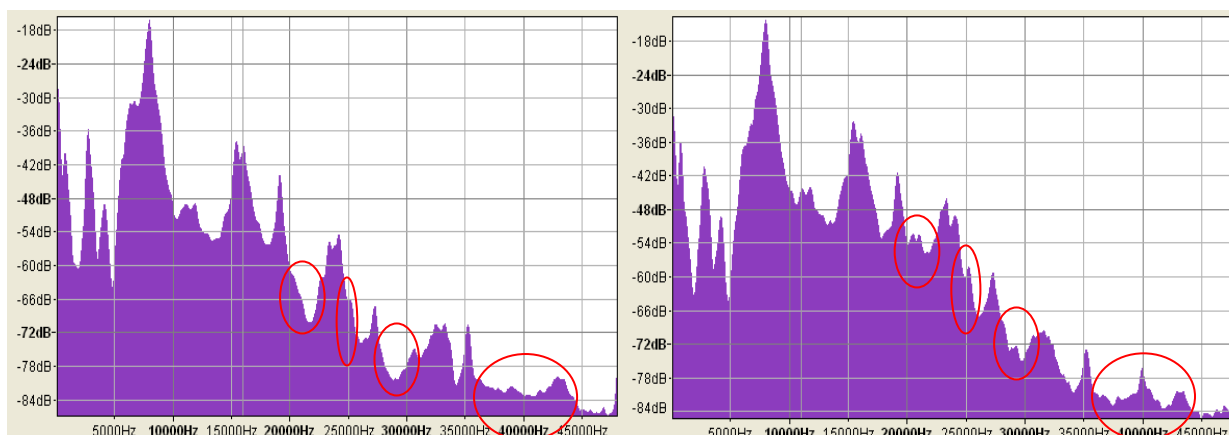
Záznam byl realizován třemi nahrávacími zařízeními. Každé nahrávací zařízení bylo umístěno v jiné vzdálenosti od místa řezu. Monofonní kondenzátorový mikrofon (Obr. 3) byl umístěn nejbližší řezu. Následoval Zoom H4 rekordér (viz Obr. 2) a nejdále byla umístěna USB kamera s integrovaným stereo mikrofonem. Je vhodné zdůraznit, že hlavním cílem této práce je určit stabilitu řezného procesu. Pokud bychom chtěli analyzovat nějaké jiné skutečnosti, nemusely by níže uvedené poznatky platit.

Kombinací méně kvalitního mikrofonu, polovičního vzorkovacího kmitočtu, špatného pracovního rozsahu a „velké“ vzdálenosti od místa řezu, nebylo možné záznam AE z USB kamery použít pro potřeby této práce. Je tedy možné říci, že vzorky nelze pořizovat s libovolnými nástroji v libovolné kvalitě, ale je třeba tomuto problému věnovat pozornost před začátkem měření AE.

Bylo zjištěno, že i přes klesající intenzitu AE se vzrůstající vzdáleností, frekvenční charakteristika neměnila svůj průběh. Tedy při jednom konkrétním přejezdu frézy, byly z různých vzdáleností naměřeny frekvenční charakteristiky, které se svým průběhem shodovaly (průběhy „základních“ frekvencí se shodovaly), jen mikrofony ve větší vzdálenosti zaznamenaly frekvenční charakteristiku s menší intenzitou. Z tohoto důvodu musely být tyto vzorky uměle zesíleny, abychom na nich mohli provádět výzkum. Zesílení zvukového signálu je popsáno v kapitole 6.1.4.

Mohlo by se tedy zdát, že na umístění mikrofonu v pracovním prostoru stroje nezáleží. Přesto bylo zjištěno, že nahrávací zařízení umístěná dále od místa řezu zaznamenaly jisté parazitní zvuky. To bylo pravděpodobně způsobeno nepříznivým tvarem pracovního prostoru (vodorovné stěny způsobují dlouhý dozvuk, který znečišťuje měřenou AE) a ruchy z okolí stroje. Vlevo na obrázku (Obr. 16) je vidět frekvenční charakteristika AE, která byla měřena mikrofonem umístěným blíže místu řezu. Vpravo se nachází frekvenční charakteristika AE,

kteřá byla měřena mikrofonom umístěným dále od místa řezu. Rozdíly mezi nimi jsou zvláště červeno. Je patrné, že vzorky se liší hlavně ve vyšších frekvencích a parazitní zvuky vyplňují hlavně místa, kde došlo k určitému poklesu intenzity frekvencí „základních“.



Obr. 16 Parazitní ruchy

Z toho lze tedy vyvodit závěr, že umístění nahrávacího zařízení blízko místa řezu umožňuje částečně nebo úplně eliminovat parazitní zvuky vznikající v okolí stroje. Vhodné umístění nahrávacího zařízení dále může zmírnit nebo odstranit nežádoucí parazitní zvuky v záznamu AE vznikající dlouhým dozvukem, který způsobují rovnoběžné stěny pracovního prostoru obráběcího stroje.

Obecně platí, že čím lepší budou podmínky pro měření AE, tím je měření méně náchylné na vzdálenost od místa obrábění. Při ideálních podmínkách by nebylo potřeba umísťovat nahrávací zařízení co nejbližší místu obrábění, ale mohlo by být umístěno tam, kde to bude nejvhodnější pro určitý obráběcí stroj. Ideálními podmínkami je myšleno: obráběcí prostor stroje by měl šikmé stěny, při obrábění by se nechlادilo, měření by probíhalo v klidném prostředí tak, aby obrábění bylo několikrát intenzivnější oproti ruchům okolí a ruchům vycházejícím ze samotného obrábění. Je pravděpodobné, že ideálních podmínek v praxi nikdy nedosáhneme.

Při umísťování mikrofónů jsou jistá omezení, která je zapotřebí dodržovat. Nahrávací zařízení by mělo být umísťováno tak, aby neomezovalo proces obrábění. Dalším omezením je, že nahrávací zařízení nesmí být umístěno tak, aby mezi místem obrábění a nahrávacím zařízením, byl umístěn nějaký objekt, který by úplně nebo částečně bránil volnému šíření AE. Dále je zapotřebí dbát na to, aby nahrávací zařízení byla alespoň částečně chráněna před poškozením. Poškození nahrávacím zařízením hrozí například od odcházející třísky, od zlomeného nástroje, také chladicí kapalina může způsobit poškození nahrávacího zařízení, i když lze předpokládat existenci nahrávacích zařízení, kterým chladicí kapalina neublíží. Existenci voděodolných nahrávacích zařízení lze usuzovat z existence například podvodních kamer a odolných mobilních telefonů, které nejsou náchylné na vlhkost.

4.4 Získávání zvukových vzorků

Záznam zvukových vzorků určených pro „pilotní“ analýzu, byl proveden na stroji MCV 570. Bylo provedeno čtyřiatřicet přejezdů, pěti nástroji o $\varnothing 10\text{mm}$ upnutých v tepelných upínačích. Nástroje i upínače byly vyrobeny v různých tolerancích tak, aby vznikly různé

kombinace upnutí (Příloha 3:). Technologické podmínky, které byly použity při měření, jsou součástí přílohy (Příloha 1:).

Specifikaci použitého polotvaru je možno nalézt, včetně jeho rozměrů a materiálu, v příloze (Příloha 4:). Kromě AE byly měřeny síly při obrábění, opotřebením nástroje, drsnost povrchu (Příloha 5:) a byl pořízen kamerový záznam celého průběhu měření.

Záznam jednotlivých vzorků byl realizován postupně s krátkými prodlevami. Prodlevy vznikaly z důvodu měření opotřebením a bylo nutné vzorky důkladně označit tak, aby bylo možné sjednotit jednotlivé vzorky z různých mikrofonů a s příslušnými technologickými podmínkami. Hlavním důvodem proč bylo nutné dbát na správné označení vzorků, bylo to, že vzorky nebyly ukládány na stejné úložisko, ale každý na jiné úložisko. Například z důvodu špatného značení při zaznamenávání akustické emise prvních třech přejezdů způsobilo, že k sobě byly přiřazeny vzorky, které k sobě nepatřily. Naštěstí tento fakt byl odhalen a nezpůsobil, že v práci byly vyvozeny špatné závěry způsobené špatnou manipulací se vzorky AE.

Přístroje, kromě kamery, která běžela nepřetržitě, byly zapínané několik vteřin předtím, než fréza začala obrábět. Důvodem časové prodlevy před začátkem obrábění bylo potřeba získat ruch, kterým ovlivňuje své okolí včetně a fréza, když se otáčí a získat charakteristické ruchy, které přicházejí z okolí stroje. Zvukové vzorky byly časově synchronizovány pomocí úderu ochrannými dveřmi obráběcího prostoru, které je ve vzorcích AE velmi viditelné i slyšitelné.

Z měření opotřebením vyšlo najevo, že nedošlo ani v jednom případě k viditelnému opotřebením nástroje. Jen u jednoho nástroje došlo k vyštípnutím ostří a zkušební nástroj se díky nevhodným technologickým podmínkám ulomil. Zlomení proběhlo takovou rychlostí (nástroj se zlomil hned při vjezdu do řezu), že nepřineslo žádné nové poznatky ani závěry do této práce. Bohužel ani vyštípnutím břitu se ve zvukových vzorcích nepodařilo identifikovat. To mohlo být způsobeno tím, že nástroj byl poškozen před samotným měřením a při kontrole nástrojů před začátkem měření nebyl tento fakt odhalen.

4.5 Zvukové vzorky z průmyslu

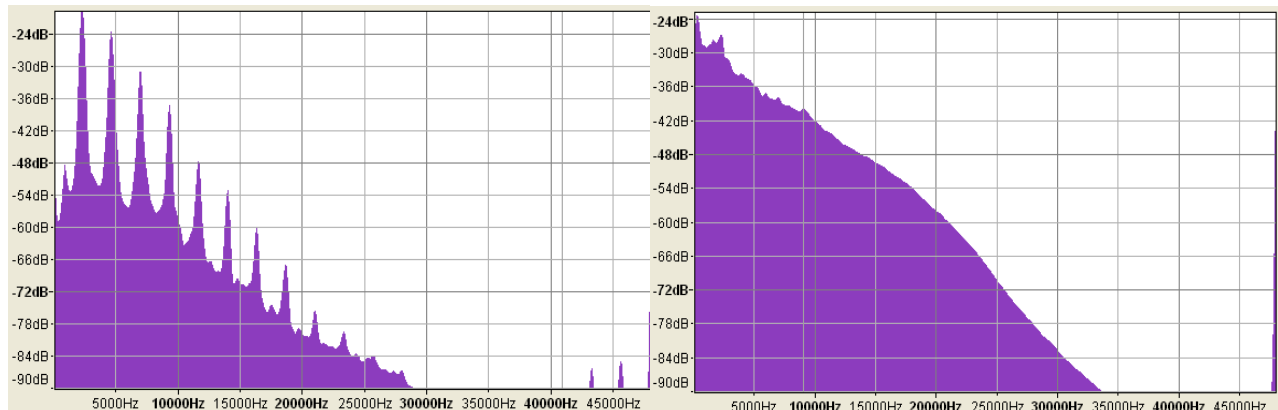
Kromě čtyřiatřiceti vzorků AE ze školní haly, byly získány dalších vzorky. Šlo o vzorky zvuků z již reálné výroby. Tyto vzorky byly pořízeny v převážné většině v průmyslových halách reálných firem kromě jednoho, který byl pořízen v relativně klidném prostředí školní haly, ale již na reálném výrobku a se zapnutým chlazením. Účelem těchto vzorků bylo, vyzkoušet vliv rušného prostředí průmyslových hal a vliv chlazení na záznam akustické emise.

Dokonce byl získán vzorek vrtání, kde prvotní technologické parametry způsobovaly nestabilitu vrtání. Nestabilita byla poznat díky tomu, že když vrtání začalo, ozval tón (tedy vznikly vibrace), který svou intenzitou přehlušil všechny zvuky ve výrobní hale. Proto musely být upraveny technologické parametry tak, aby bylo vrtání stabilní (co nejméně hlučné).

Problém byl takový, že byla potřeba vyvrtat díra $\varnothing 40\text{mm}$ a o délce 4D. Kombinací menší tuhosti upnutí, vysokých otáček a vysokého posuvu vznikaly při vrtání vibrace. Problém byl vyřešen tím, že otáčky byly sníženy více než o polovinu a posuv byl snížen o 0,3 mm na otáčku. Tím se prodloužila doba vrtání, ale vrtání nebylo tak hlučné a vznikal kvalitnější povrch. Pro účely této práce byla měřena AE pro obě varianty technologických podmínek. Účelem bylo získat představu, jak vypadá frekvenční charakteristika při stabilním obrábění a

při nestabilním obrábění, protože na tuto otázku zvukové vzorky určené pro „pilotní“ analýzu odpověď neposkytli.

Na obrázku (Obr. 17) vlevo je ukázka toho, jak vypadá frekvenční charakteristika AE vzorku, který byl mimo stabilitu (velmi hlučný) a vpravo je ukázka, jak vypadá frekvenční charakteristika AE po úpravě technologických podmínek. Jak je vidět u nestabilního vzorku je ve frekvenční charakteristice zřetelná určitá frekvence (tón), která svou intenzitou převyšuje své okolí (frekvence přibližně 2,5 kHz). Dále jsou zřetelné vyšší harmonické frekvence tohoto tónu. Vyšší harmonické frekvence jsou podrobněji popsány v kapitole 7.3. Naproti tomu frekvenční analýza zvukového vzorku, který byl stabilní, je téměř bez frekvencí, které by výrazně převyšovaly své okolí.



Obr. 17 Nestabilní/stabilní vrtání

Na obrázku (Obr. 19) je ukázka výsledných povrchů. Vpravo je povrch vzniklý po nestabilním vrtání a vlevo je povrch vzniklý při stabilním vrtání. Jak je patrné, při nestabilním vrtání vznikala vlivem chvění uspořádané paprskovité radiální rýhování (tedy energie se ukládalo do uspořádaných procesů – jak bylo vysvětleno v kapitole 1.1). Oproti tomu při stabilním vrtání vznikalo nepravidelně rozložené kruhové rýhování.

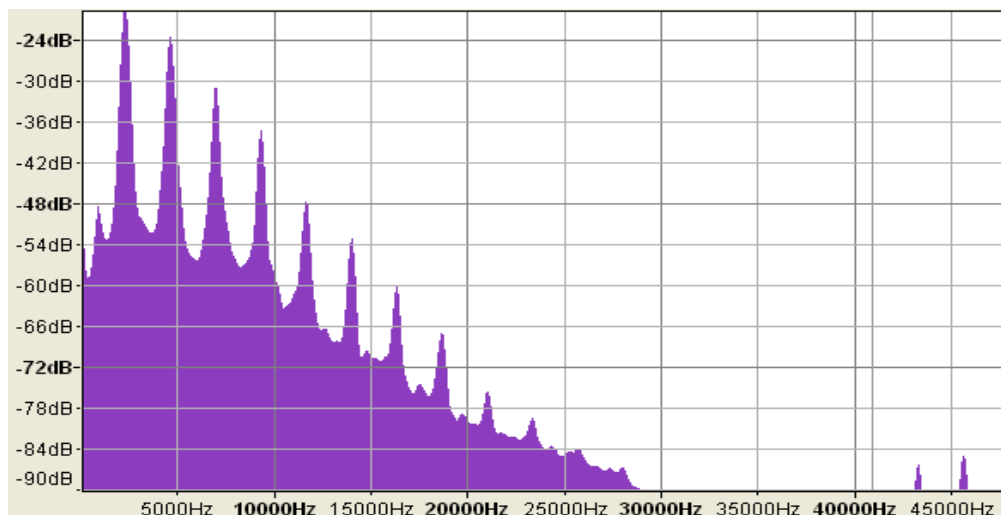
Četnost paprsků radiálního rýhování při nestabilním vrtání nám může napomoci k odhadu hodnoty frekvence, kterou se ztráta stability projevila. Tato hodnota se pak může stát potvrzením frekvence nalezené pomocí analýzy zvuku.

Nejdříve je zapotřebí spočítat jednotlivé paprsky radiálního rýhování po celém obvodu (a). Dále je důležité znát otáčky (n). Hledanou frekvenci zjistíme pomocí vzorce:

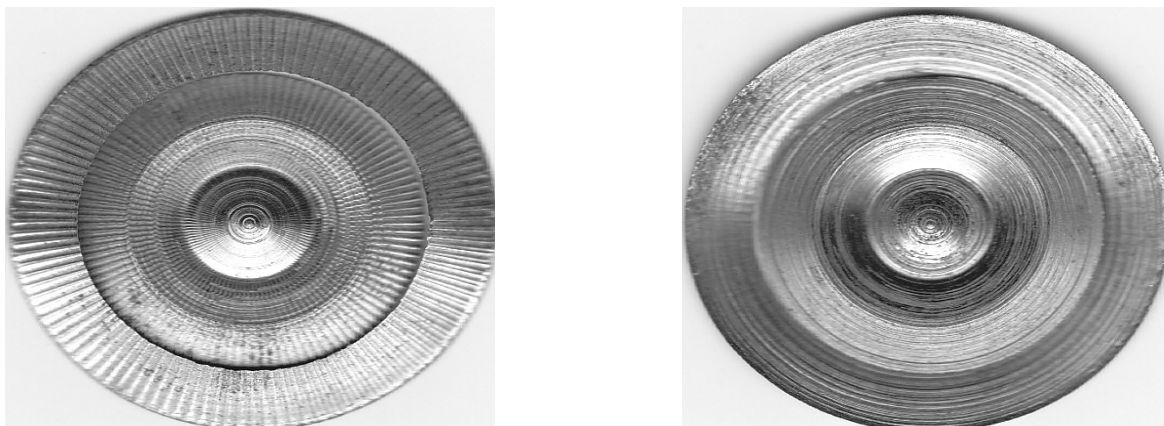
$$f = \frac{a \cdot n}{60} \text{ [Hz]}$$

V případě nestabilního vrtání bylo napočítáno 108 radiálních paprsků. Pomocí výše zmíněného vzorce byla vypočtena frekvence způsobující nestabilitu na hodnotu 2340 Hz. Ve frekvenční charakteristice zvukového vzorku právě tohoto nestabilního vrtání byla nalezena frekvence způsobující nestabilitu na hodnotě 2333 Hz.

Jak vidíme, vypočtená hodnota odpovídá se značnou přesností hodnotě odečtené z analýzy vzorku AE a dokládá tak správnost postupu vyhodnocování AE.



Obr. 18 Frekvence způsobující chvění



Obr. 19 Výsledný povrch

Všechny soubory se zvukovými vzorky je možno nelézt v příloze této práce (Příloha 2:).

4.5.1 Hranice stability

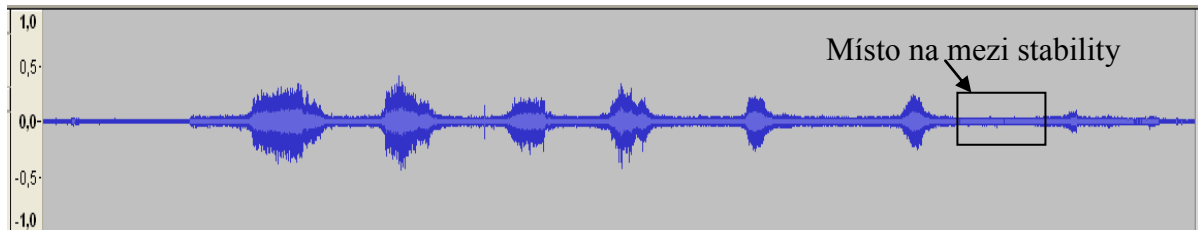
Potom co byly získány zvukové vzorky stabilního a nestabilního obrábění, bylo potřebné získat zvukový vzorek, který ze stabilního stavu, plynule přecházel do nestabilního stavu řezného procesu. Tím bylo umožněno naleznout zvukový vzorek procesu obrábění, který mohl být označen „na mezi stability“.

Vzorek byl získán tak, že byly nastaveny počáteční hodnoty, které se pomocí přidávání a ubírání „procent“ měnily (jen otáčky byly měněny, posuv zůstával stejný), dokud nebyla nalezena hranice stability pomocí sluchu člověka. Vzorek na hranici stability řezného procesu byl rozpoznán tak, že se u něj již nepatrně a nepravidelně ozýval tón, který svou intenzitou slyšitelně převyšoval zvuk procesu obrábění.

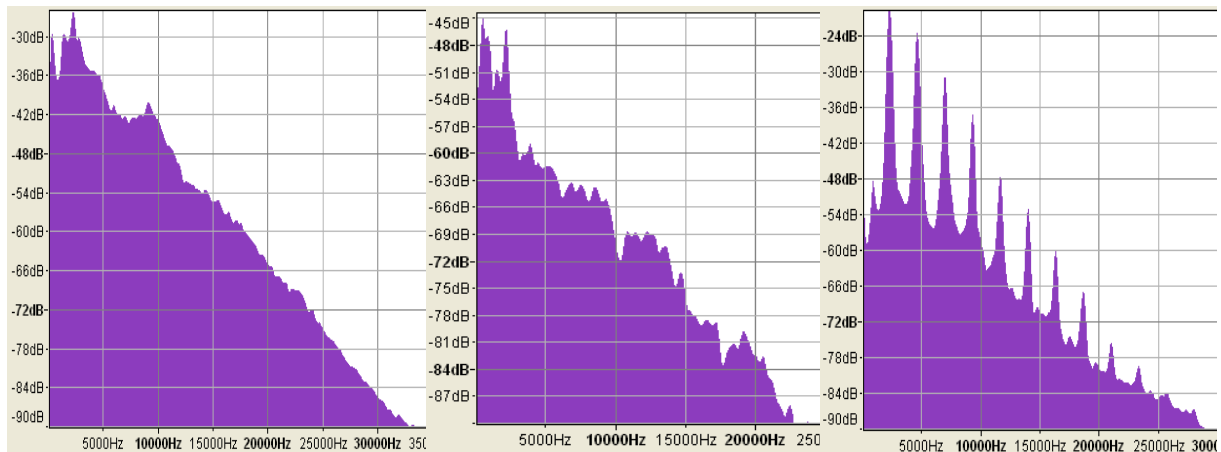
Počáteční technologické podmínky byla $S=1000\text{ot/min}$ a $f=0,1\text{m/min} = 100\%$. Mez stability byla nalezena za technologických podmínek $S=700\text{ot/min}$ a $f=0,1\text{m/min}$.

Na horním obrázku (Obr. 20) je vidět časový průběh zvukového vzorku, na kterém byla hledána hranice stability. Místa s nejvyšší intenzitou jsou ty místa, kde byly stoprocentní technologické podmínky. Otáčky byly měněny od sta do padesáti procent původních otáček.

Na dolním obrázku (Obr. 21) je porovnání frekvenčních charakteristik AE: *Stabilního obrábění / Obrábění na mezi stability / Nestabilního obrábění.*



Obr. 20 Hledání meze stability



Obr. 21 *Stabilní obrábění/Obrábění na mezi stability/Nestabilní obrábění*

Z frekvenční charakteristiky AE vzorku, který byl označen na mezi stability je patrné, že se objevují, první náznaky tónů, které svou intenzitou ztelně převyšují své okolí. Při bližším průzkumu by se daly odhalit již vznikající vyšší harmonické frekvence, které zpravidla doprovázejí vznik vibrací (kapitola 7.3).

5 Analýza zvukových vzorků

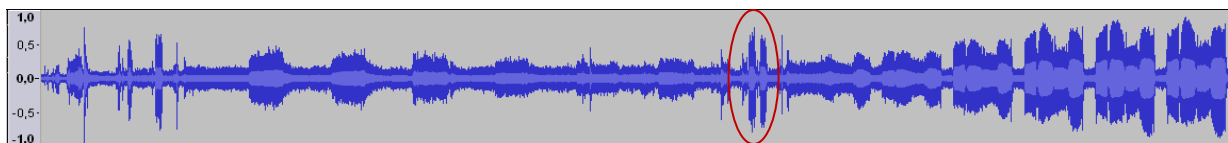
5.1 Odečtení ruchu pozadí

Před začátkem vyhodnocování zvukového vzorku, je nutné rozhodnout, zda se budou odečítat nebo neodečítat ruchy okolí od zvuku obrábění. Odečtením ruchu pozadí se může frekvenční charakteristika konkrétního zvukového vzorku zpřehlednit, ale je možné, že dojde k jistým zkreslením, které jsou nežádoucí. Proto je důležité věnovat tomuto „kroku“ zvýšenou pozornost.

5.1.1 Odečítat ruch pozadí?

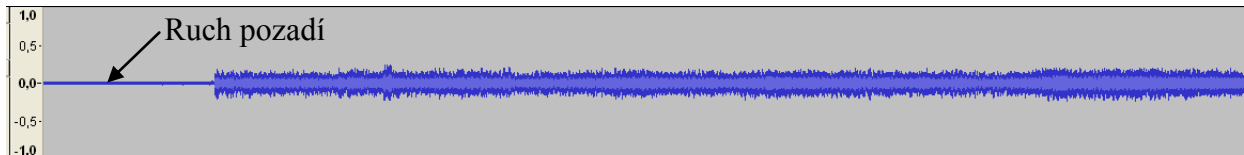
Jako první krok by měla být provedena úvaha o tom, co bude sledováno ve frekvenční analýze zvukového signálu (opotřebenění nástroje, stabilita procesu obrábění, síly a výkon atd.). V případě, že by byl požadavek na pozorování co nejvíce „charakteristik“ procesu obrábění, musel by být ruch pozadí s největší pravděpodobností odečten. V této práci byla věnována pozornost hlavně stabilitě procesu obrábění, proto i odečítání ruchů pozadí bude vztažené ke stabilitě procesu obrábění (tedy otázce zda je proces obrábění stabilní či nikoliv).

Na začátek je zapotřebí říci, že je nutné správně přiřadit správné ruchy pozadí (například při frézování se otáčí fréza a v závislosti na velikosti bude vydávat určitý ruch) ke správnému nástroji (v případě soustružení ke správnému obrobku, protože při soustružení rotuje obrobek), aby nedošlo již před odečítáním pozadí k chybě, která by negativně ovlivnila samotné vyhodnocování. Představme si, že budeme provádět kontinuální záznam AE procesu obrábění. Při obrábění se bude pětkrát měnit nástroj. Na základě analýzy zvukových vzorků bylo v rámci této práce zjištěno, že nemůže být použito jedno univerzální ruchové pozadí, které by bylo odečítáno od zvuku obrábění jednotlivých nástrojů. Je nutné pro každý nástroj najít jeho ruchové pozadí, protože v závislosti na průměru nástroje, délky vyložení, použitém upínači a dalších skutečnostech, se pro konkrétní nástroje ruchové pozadí mění. Je snadné odhalit místa v záznamu AE, kde došlo k výměně nástroje, protože právě výměna nástroje je v časovém vzorku AE velmi výrazná jak na poslech, tak je ji možno rozeznat vizuálně (Obr. 22) a její podoba zobrazení se na jednom konkrétním stroji nemění.

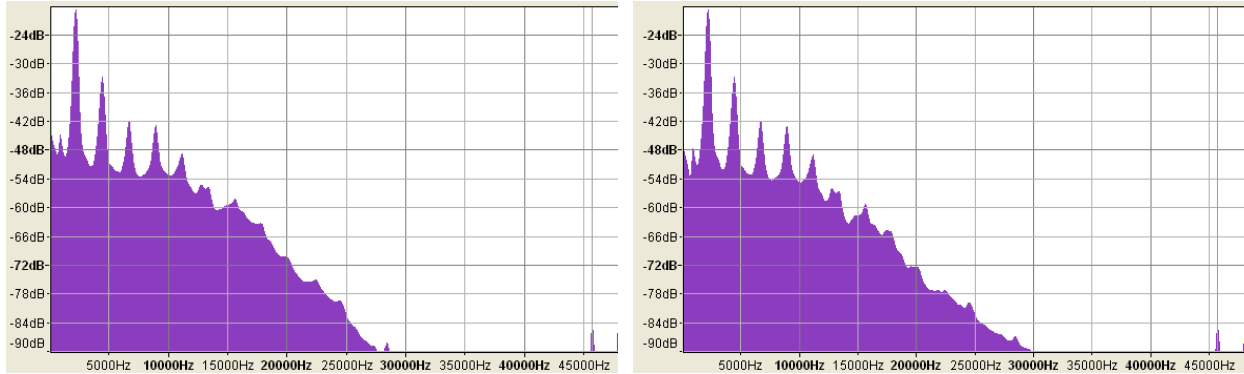


Obr. 22 Výměna nástroje

Prvním případem kdy není zapotřebí odečítat ruch pozadí je, pokud zvuk z obrábění svou intenzitou mnohokrát převyšuje ruchy pozadí (Obr. 23). Jak je patrné z obrázku (Obr. 24), odečtení pozadí by nepřineslo do frekvenční charakteristiky žádné velké změny. Dokonce se frekvenční charakteristika (od 25kHz do 30kHz) zkreslila a tak analýzu frekvenční charakteristiky spíše ztížila než, aby ji ulehčila. Zkreslení je pravděpodobně způsobeno blízkou intenzitou ruchů pozadí a zvuku obrábění. Tato problematika je podrobněji řešena v kapitole 5.2.

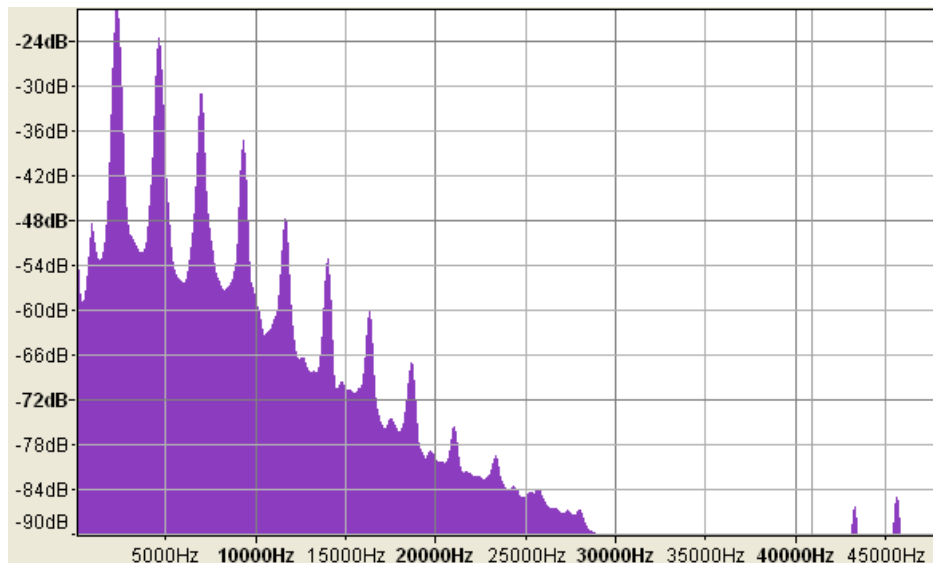


Obr. 23 Slabý ruch pozadí



Obr. 24 Před a po odečtení pozadí

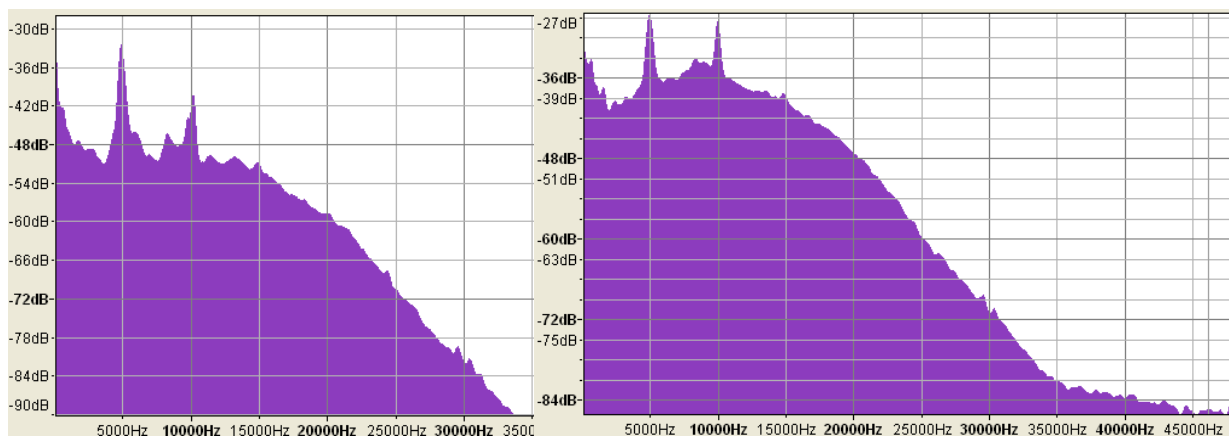
Dalším příkladem, kdy není potřeba odečítat ruch pozadí od zvuku obrábění je, pokud z frekvenční charakteristiky procesu obrábění je patrné, že je obrábění nestabilní (Obr. 25). Vyhodnocování frekvenční charakteristiky se věnuje kapitola 5.5. Odečtením ruchu pozadí by se mohl ve frekvenční charakteristice objevit další tón, který by potvrzoval nestabilitu procesu obrábění. Přesto existuje riziko, že odečtením ruchu pozadí se frekvenční charakteristika zkruslí. Důsledkem toho by se mohlo stát, že tón potvrzující nestabilitu, by byl právě tímto chybovým tónem. V tomto případě by potvrzení nestability bylo chybné a odečítání ruchu pozadí by zbytečně zatěžovalo vyhodnocovací zařízení. Přesto, i kdyby se stalo, že by tento tón opravdu ve vzorku byl, z hlediska stability řezného procesu by to na výsledku nic nezměnilo. V tomto časovém úseku by bylo obrábění opět označeno za nestabilní. Je tedy možné říci, že výskyt tónu, který jen potvrzuje nestabilitu, není podstatný, to platí jen tehdy, když nás nezajímá nic jiného než stabilita.



Obr. 25 Vzorek nestabilního obrábění

Další způsob, který může přispět k rozhodnutí, zda odečítat nebo neodečítat ruchy pozadí je vzájemné porovnání frekvenční charakteristiky zvuku obrábění s frekvenční charakteristikou ruchu pozadí. Na obrázku vlevo je vyobrazena frekvenční charakteristika ruchu pozadí. Je vidět, že její intenzita je dostatečná, aby při odečtení od zvuku obrábění (Obr. 26 vpravo), ovlivnila výslednou frekvenční charakteristiku. Přesto je rozeznatelné, že díky průběhu frekvenční charakteristiky AE procesu obrábění, by ruch pozadí po odečtení od této frekvenční charakteristiky, výslednou frekvenční charakteristiku neovlivnil.

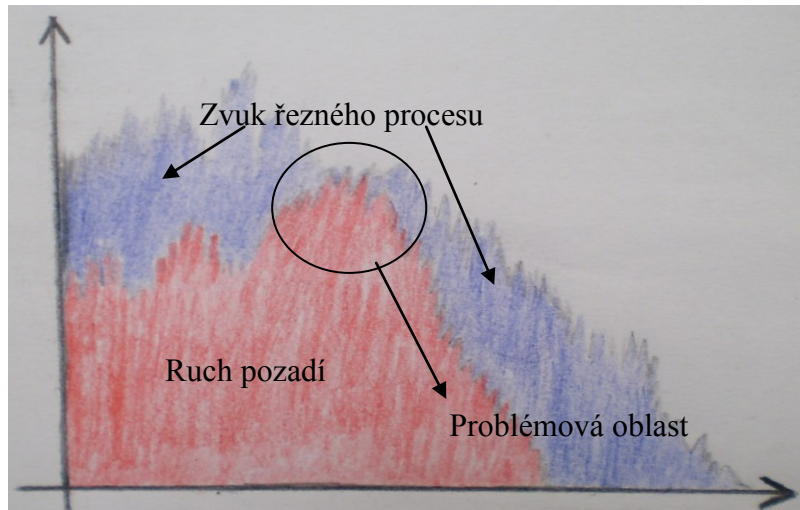
Z obrázku (Obr. 26) je patrné, že obě frekvenční charakteristiky mají „extrémní“ tóny na stejných hodnotách frekvencí. Ale extrémní tóny ve zvuku obrábění s odstraněným zvukem pozadí mají větší intenzitu než extrémní tóny v ruchu pozadí. Díky tomuto faktu nezpůsobí odečtení pozadí žádnou velkou změnu ve výsledné frekvenční charakteristice. Pozor kdyby extrémní tóny ruchu pozadí byly jen o kousek posunuty, je pravděpodobné, že by po odečtení od zvuku obrábění, způsobily ve výsledné frekvenční charakteristice velké změny (intenzitu mají dostatečnou). Na tuto skutečnost je potřeba brát zřetel při porovnávání frekvenčních charakteristik. Pokud závěry vyhodnocuje člověk, měl by se několikrát ujistit, zda opravdu není třeba ruch pozadí od zvuku obrábění, odečíst.



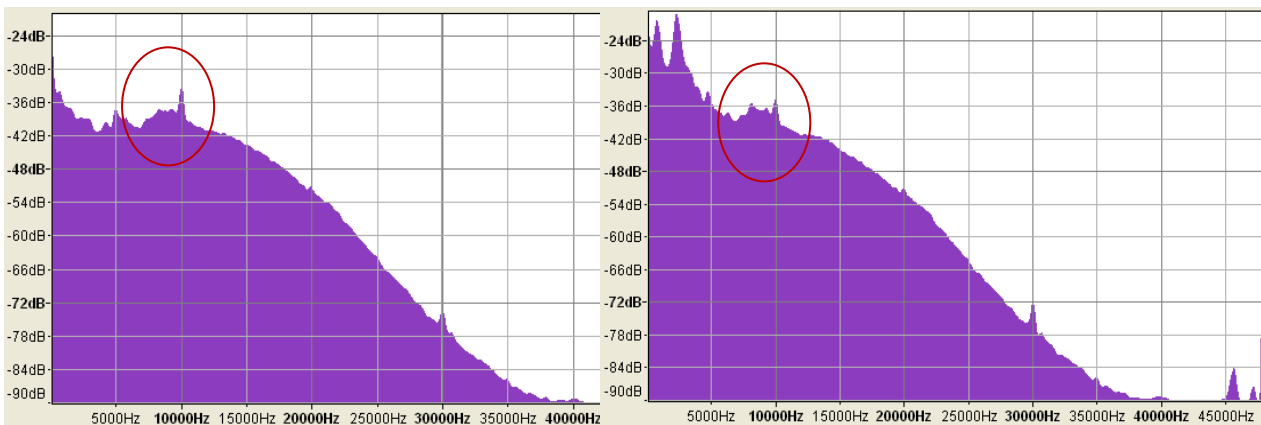
Obr. 26 Frekvenční charakteristika ruchu pozadí/obrábění

5.2 Intenzita ruchu blízko k intenzitě zvuku procesu obrábění

Při porovnávání frekvenční charakteristiky ruchu pozadí a frekvenční charakteristiky řezného procesu je potřeba dbát zvýšené pozornosti v místech, kde se intenzita ruchu pozadí, blíží intenzitě řezného procesu (Obr. 28). Bylo zjištěno, že v těchto místech při odečtení ruchu pozadí od zvuku obrábění, může dojít k jistému zkreslení frekvenční charakteristiky výsledného zvukového vzorku. Může se tedy stát, že se ve frekvenční charakteristice výsledného zvukového vzorku objeví frekvence, která bude převyšovat své okolí a tím bude frekvenční charakteristika v tomto místě znehodnocena. V těchto místech je důležité nepřikládat průběhu frekvenční charakteristiky velký význam.



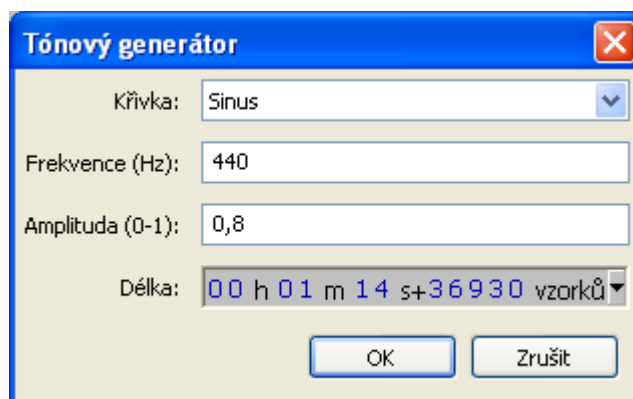
Obr. 27 Problémová oblast



Obr. 28 Intenzita ruchu pozadí/zvuku řezného procesu

Je možné, že chyby odečtením ruchu pozadí bude možné eliminovat nastavením filtru „odstranění šumu“ (více kapitola 5.2.1). Otázkou je, zda odstranění těchto chyb nebude za cenu zkreslení zvukového signálu řezného procesu natolik, že se zmenší jeho vypovídající hodnota. Tento fakt by do budoucna bylo dobré ověřit na dalších zvukových vzorcích.

Výskyt těchto „nesprávných frekvencí“ (zdánlivých, virtuálních), které vzniknou při odečtení ruchu pozadí, od stejně intenzivního zvuku obrábění, je možné odhalit. Před samotným odečtením ruchu pozadí musíme najít právě ta místa, ve kterých se intenzita ruchu pozadí, blíží intenzitě procesu obrábění. Pokud se po odečtení ruchu pozadí v těchto místech objeví nějaký extrém (tón převyšující svou intenzitou tóny okolí), je třeba zjistit jeho frekvenci. Tento tón je možné vygenerovat pomocí nástroje „Tón“ (Obr. 29), který se nachází v záložce „Generovat“. Sledovaný tón je potřeba jsi jej poslechnout a zapamatovat, jeho zvukovou podobu. Tato metoda má své omezení na tóny ve slyšitelném pásmu člověka (přibližně 20Hz-20kHz). Dalším krokem je přehrání nahrávky v místě, kde se tento „extrémní“ tón údajně vyskytuje. Pokud je z poslechu patrné, že tam hledaný tón opravdu je, můžeme být označen za extrém a při vyhodnocování frekvenční charakteristiky, je ho třeba brát v úvahu. Pokud z poslechu je patrné, že se tón v záznamu zvuku nevyskytuje, je jasné, že tento tón vznikl chybou při odečítání ruchu pozadí od zvuku obrábění a při vyhodnocování je nutné tento tón ignorovat.



Obr. 29 Tónový generátor

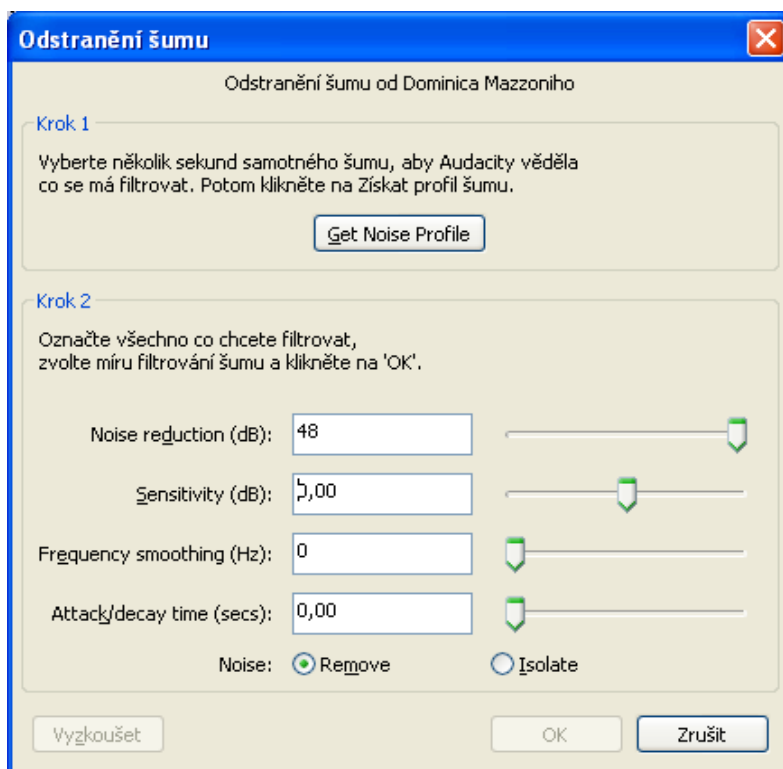
Na obrázku (Obr. 29) je ukázka „Tónového generátoru“. Z poznatků této práce lze doporučit, aby v oknech „Křivka a Amplituda“, byly ponechány přednastavené hodnoty. Délku je možné si zvolit dle uvážení. Nejdůležitější je věnovat pozornost oknu „Frekvence (Hz)“. Do tohoto okna je potřeba vyplnit tón (hodnotu konkrétní frekvence), který se ve frekvenční charakteristice jeví jako „extrémní“ (svou intenzitou převyšující okolní tóny).

Z výše zmíněných skutečností, lze vyvodit závěry, že o tom zda je potřeba odečítat ruchy pozadí, rozhoduje tvar a intenzita frekvenční charakteristiky ruchu okolí a frekvenční charakteristiky řezného procesu. Zvýšená pozornost by měla být v místech, kde se intenzita ruchu pozadí blíží intenzitě zvuku obrábění.

Odečítáním ruchu pozadí by bylo vhodné se do budoucna dále zabývat a zkusit na dalších zvukových vzorcích. Na těchto dalších zvukových vzorcích by bylo potřeba ověřit pravdivost skutečností zjištěných v této práci. Dále by bylo příhodné prozkoumat další možnosti odečítání ruchu pozadí, které již existují. Pomocí nabytých znalostí dále vytvořit vlastní program na odečítání ruchu pozadí. Bylo by dobré, aby tento program již eliminoval chyby zmíněné v této práci a dokázal poznat, kdy odečítat ruch pozadí a kdy nikoliv.

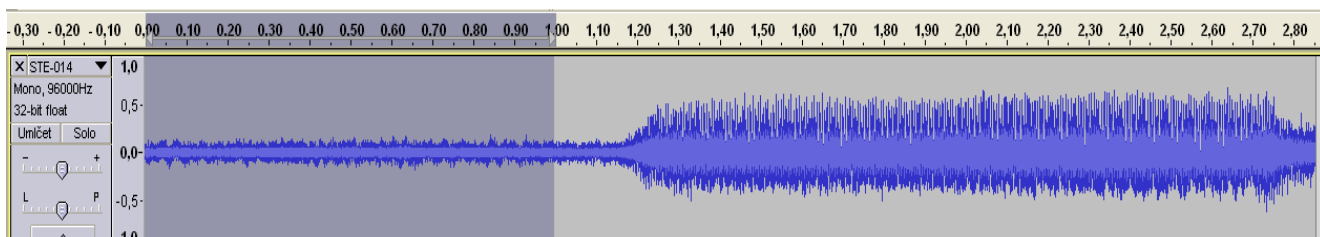
5.2.1 Jak odečítat ruchy pozadí

K odečtení ruchu pozadí slouží v programu Audacity nástroj s názvem „Odstranění šumu“ (Obr. 30), který lze najít pod záložkou „Efekty“. Odečítání ruchů okolí lze rozdělit na tři hlavní etapy, které je potřeba vykonat. Prvním etapou je označení místa, kde se nachází ruch pozadí. Ve druhé etapě je nutné označit místo, odkud se bude ruch pozadí odčítat. Ve třetí etapě je třeba nastavit, jak bude probíhat odstraňování ruchu pozadí. Dále si jednotlivé kroky představíme podrobněji.



Obr. 30 Odstranění šumu

Jak bylo řečeno, v prvním kroku je potřeba označit místo, kde se nachází ruch okolí (Obr. 31). Pokud vyhodnocení provádí člověk, najde ruch okolí snadno z poslechu AE procesu obrábění. Tento způsob se hodí pro práci s experimenty, kde nevádí zpětné vyhodnocení, tedy již po skončení obrábění. K nalezení AE mu může pomoci například výměna nástroje, která je, jak už bylo řečeno, v časovém záznamu AE velmi výrazná. Pokud by vyhodnocení prováděl například počítač, vyžadovalo by to jistou spolupráci vyhodnocovacího programu s řídicím systémem stroje, aby byl ruch okolí nalezen. Do budoucna lze předpokládat, že bude snaha o to, aby vyhodnocování prováděl nějaký přístroj a tím umožnil vyhodnocovat frekvenční charakteristiku při vlastním obrábění. Ve chvíli kdy je nalezen ruch okolí je třeba ho předat filtru pomocí tlačítka „Get noise profile“ (Obr. 30).



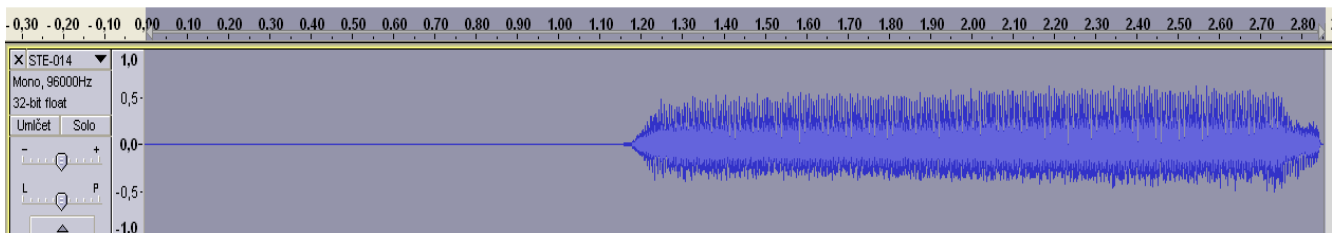
Obr. 31 Označení ruchu okolí

Poté co byl filtru (Odstranění šumu) předán ruch pozadí, je nutné označit místo, odkud chceme ruch pozadí odstranit. Ruch okolí nemusíme odečítat od celého záznamu zvuku procesu obrábění, ale můžeme ruch okolí odečíst jen z úseků, který chceme zkoumat. Nejkratší časový interval, který ještě je možné analyzovat, ovlivňuje vzorkovací frekvence použitá při nahrávání zvukového vzorku a nastavení míry rozlišení frekvenční charakteristiky. O této problematice je více pojednáno v kapitole 5.3.3. Po označení místa, odkud bude ruch pozadí odečítán, je potřeba opět spustit nástroj „Odstranění šumu“.

Ve znovu puštěném nástroji na odstranění šumu je nutné nastavit, jak bude probíhat filtrování. To znamená, pomocí nástrojů, které jsou vidět na obrázku (Obr. 30), najít kompromis mezi zkreslením výsledného zvuku obrábění a odečtením ruchu pozadí. Více o těchto nástrojích viz literatura [7]. Na obrázku (Obr. 30) je vidět nastavení, které se ukázalo jako univerzální nastavení pro všechny vzorky, na kterých filtr „Odstranění šumu“, byl zkoušen. Přesto toto nastavení má své omezení, jak bylo vysvětleno v kapitole 5.2. Dále bylo zjištěno, že nastavením okna „Sensitivity“, pěkně vystoupí frekvence způsobující nestabilitu. Bohužel je to za cenu celkového zkreslení výsledného zvukového vzorku tak, že metoda vyhodnocování popsaná v kapitole 5.5, je v tomto případě nepoužitelná.

Na obrázku (Obr. 32) je vidět, jak se změnil zvukový záznam (Obr. 31) po odečtení ruchu okolí. Pro zajímavost byl ruch odečten z celého záznamu zvuku. Jak je patrné tam, kde se předtím nalézal ruch, zbylo jen ticho. Zatímco místo, kde již nástroj obráběl, změnilo podobu právě o odečtený ruch pozadí.

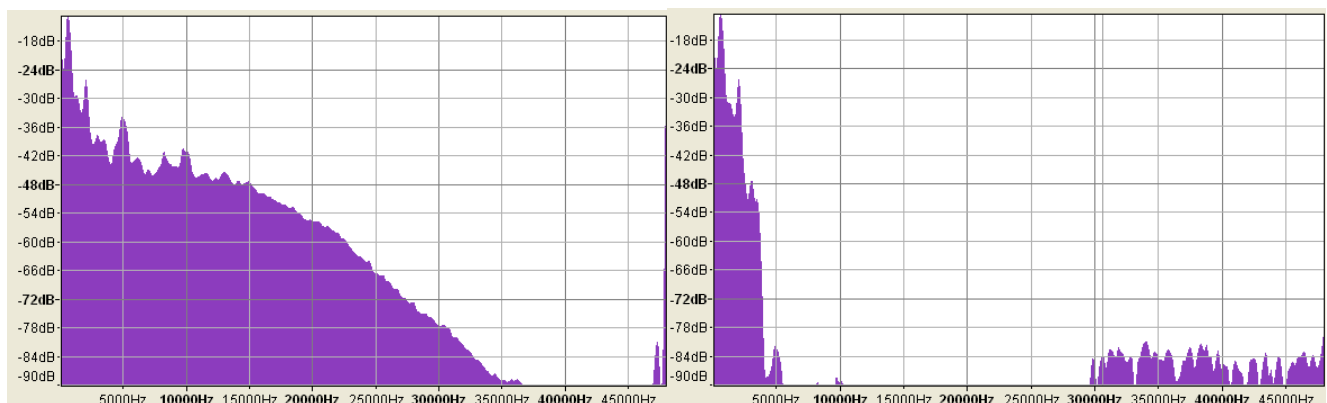
Zvuk, který vznikne po odečtení ruchu pozadí od zvuku obrábění, pravděpodobně nebude pěkný na poslech pro člověka. Zde je třeba říci, že tento fakt není ukazatelem toho, že odečtení ruchu pozadí bylo špatně provedeno. Ba naopak pokud bude zvuk pěkný na poslech, je pravděpodobné, že vněm zůstalo příliš mnoho ruchů pozadí. V tom to případě by bylo nejlepší provést odečtení ruchu pozadí znovu s jiným nastavením filtru.



Obr. 32 Po odstranění ruchu

Na obrázku (Obr. 33) je vlevo vidět, jak vypadala frekvenční charakteristika zvukového vzorku před odečtením ruchu okolí. Vpravo je ukázka frekvenční charakteristiky toho samého zvukového vzorku po odečtení ruchu okolí.

Jak je patrné z porovnání těchto dvou frekvenčních charakteristik, ve vzorku se po odečtení objevily frekvence, které se ve frekvenční charakteristice před tím nevyskytovaly. Tento fakt by bylo vhodné do budoucna prozkoumat, čím je způsobený. Je možné, že jde právě o ono zkreslení vzorku po odečtení ruchu pozadí (kapitola 5.2), ale být to tak nemusí.



Obr. 33 Před a po odečtení ruchu okolí

Odečítání ruchu pozadí je další z mnoha směrů, kterým by bylo přínosné se do budoucna věnovat. Prospěch by mohl přinést průzkum toho, jaké druhy odečtení pozadí jsou dnes k dispozici, a jak fungují. To jak funguje nástroj pro odečtení ruchu pozadí v programu Audacity, se zjistit nepodařilo, proto není přesně možné určit, proč vznikají chyby při odečtení. Přesto by stálo za to, prozkoumat i tento nástroj pro odečtení ruchu pozadí a ověřit na dalších zvukových vzorcích, zda nalezené „univerzální“ nastavení filtru je opravdu vhodné.

5.3 Vykreslení frekvenční charakteristiky

Nástroj pro generování frekvenční charakteristiky najdeme v programu Audacity v záložce „Analyzovat“ pod názvem „Vykreslit spektrum“. To, jak velký časový úsek můžeme vykreslit, tedy vygenerovat pro tento časový úsek frekvenční charakteristiku, ovlivňuje vzorkovací frekvence zvukového vzorku a míra rozlišení jednotlivých frekvencí (kapitola 5.3.3). Platí, že čím větší bude vzorkovací frekvence při nahrávání zvukového vzorku, tím kratší můžeme zkoumat časový úsek záznamu zvuku. Pro míru rozlišení jednotlivých frekvencí platí, že čím větší míra rozlišení frekvencí, tím je potřeba filtru předat delší časový úsek.

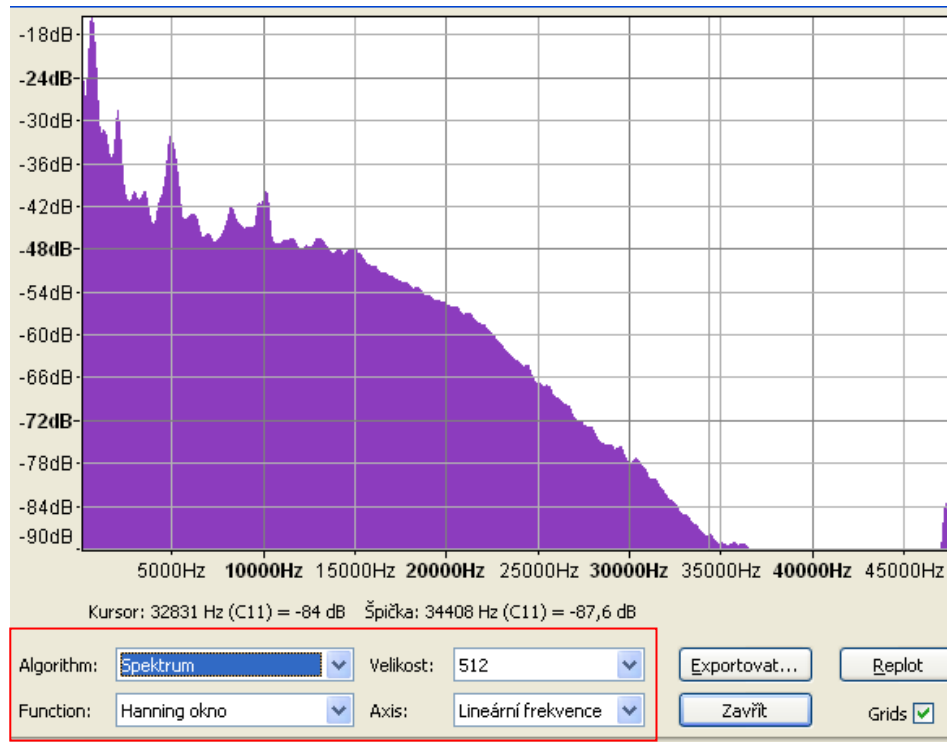
Protože se tato práce zabývá hlavně stabilitou, lze doporučit kontrolovat menší časové úseky, hlavně v místech, kde lze očekávat nějaké lokální záchvěvy (nájezd do řezu, změna směru obrábění atd.). Právě z důvodu vzniku lokálních záchvěvů, které se ve zlomku sekundy utlumí, je lepší kontrolovat kratší časové úseky. V delším časovém úseku by se tyto záchvěvy mohly ztratit. Více o délce časového okna je v kapitole 5.3.3.

Frekvenční charakteristika těchto kratších časových úseků může odhalit například špatné nájezdy nebo špatné technologické podmínky při změně směru obrábění, nebo při obrábění v rozích atd. Právě při špatném nájezdu se nástroj jen zachvěje a během krátkého časového úseku se utlumí. V delším časovém úseku by pravděpodobně špatný nájezd odhalen nebyl, zatím co při kontrole krátkých časových úseků se tato událost projeví zřetelně. Programátor tak dostane impuls, že je potřeba změnit technologické podmínky obrábění v rizikových místech, pokud tedy mírné zachvění v těchto místech procesu obrábění nelze akceptovat.

Časové úseky se mohou částečně překrývat, ba i na sebe nemusí navazovat, pokud bude frekvenční charakteristika vykreslována přímo při vlastním obrábění pomocí méně výkonné vyhodnocovací zařízení. Z výsledků této práce lze doporučit, aby na sebe jednotlivá časová okna alespoň navazovaly a v ideálním případě o pár procent překrývaly. Je žádoucí, aby časové úseky nebyly konstantní délky, z důvodu zanesení periodických chyb.

Další důvodem proč analyzovat kratší časové úseky je, že porovnáváním frekvenčních charakteristik těchto kratších časových úseků, můžou být získány další informace o obrábění. Získané frekvenční charakteristiky můžou být pomocí statistických metod vyhodnocovány a vzájemně porovnávány. Dokud se statistické údaje z jednotlivých frekvenčních charakteristik budou podobat v rámci nějaké tolerance, bude se dá předpokládat, že proces obrábění porovnává správně. Pokud se začnou lišit, mimo hranice tolerance dá se předpokládat, že se stalo něco, co ovlivnilo proces obrábění. Pro lepší pochopení lze uvést příklad. Představme si součást, ve které je potřeba vyvrtat čtyři průchozí díry stejného průměru. Těchto součástí se bude vyrábět deset tisíc kusů. Dá se předpokládat, že všech čtyřicet tisíc děr by v celém svém průběhu, měly mít v rámci nějaké tolerance stejné frekvenční charakteristiky za předpokladu stejných technologických podmínek. Je třeba brát v úvahu i další skutečnosti, jako například že se pokaždé nepodaří upnout se stejnou tuhostí, a můžou se projevit i nějaké další faktory, jako například doba než se „zaběhne“ nový nástroj případně nové VBD. Přesto porovnáváním

frekvenčních charakteristik jednotlivých děr, by umožnilo pozorovat změnu frekvenční charakteristiky a kontrolovat zda se frekvenční charakteristika nějak nemění. Díky tomuto prostředku by mohlo být možné například kontrolovat opotřebení nástroje. Tento fakt je třeba dále zkoumat a rozvíjet. Není vyloučeno, že pro tyto potřeby budou muset být použity jiné vyhodnocovací softwary, než je systém Audacity (např. Matlab).



Obr. 34 Frekvenční charakteristika

Tento nástroj má k dispozici několik nástrojů, které umožňují pracovat s frekvenční charakteristikou. Tyto nástroje si blíže představíme v dalších kapitolách.

5.3.1 Algoritmus

Audacity kromě vykreslení frekvenční charakteristiky nabízí další nástroje, umožňující zpracovávat časový záznam zvukového signálu. Jde o nástroje: standardní autokoleraci, cuberoot autokoleraci, vylepšenou autokoleraci, cepstrum. Co dělají jednotlivé nástroje lze nalézt v publikaci [7].

5.3.2 Funkce

V tomto poli můžeme vybrat okno, které upravuje vstupní data pro frekvenční charakteristiku. Máme na výběr z oken: Obdélníkového okna, Bartletovo okno, Hammingovo okno, Hanningovo okno, Blackmanovo okno, Blackman-harrisovo okno, Welchovo okno, Gaussian (a=2,5) okno, Gaussian (a=3,5) okno, Gaussian (a=4,5) okno. Funkce jednotlivých oken jsou k nalezení v kapitole 3.4.

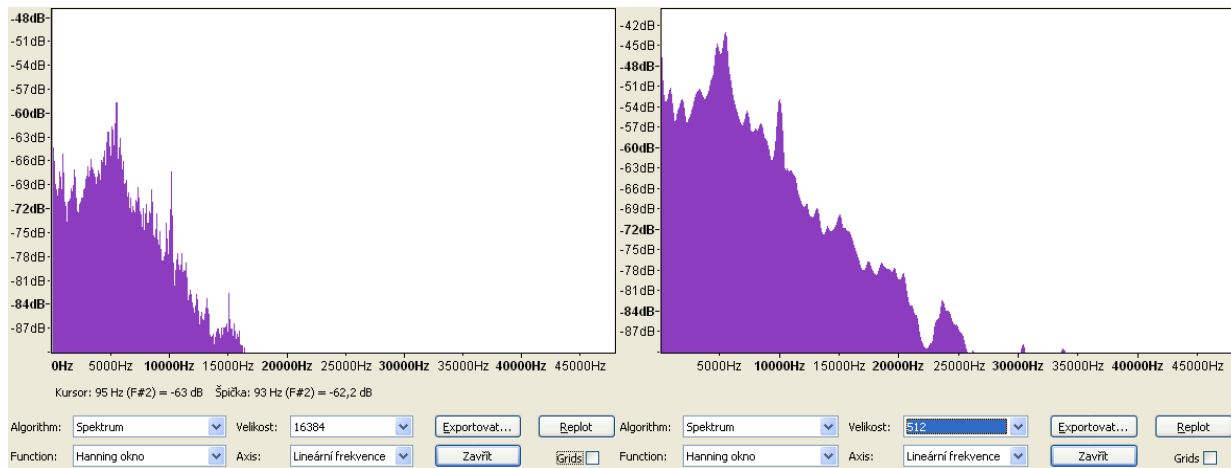
5.3.3 Velikost

Tento nástroj umožňuje nastavit míru rozlišení jednotlivých frekvencí neboli nejmenší možný rozestup mezi frekvencemi, který bude nástroj na generování frekvenční charakteristiky, v určitém čase schopen rozlišit. Čím větší bude nastavena míra rozlišení jednotlivých frekvencí, tím bude frekvenční charakteristika citlivější na jednotlivé záchvěvy tónů (frekvencí) v kratším čase. Přesto čím větší bude nastavena míra rozlišení jednotlivých frekvencí, tím se zvětšuje časový interval, který minimálně můžeme analyzovat.

K dispozici máme osm možností nastavení „velikosti“ a to 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16 384. V rámci této práce bylo zjištěno, že pokud byla při nahrávání použita vzorkovací frekvence 96kHz, je možné při rozlišení nastavení velikosti 128, analyzovat minimální časový úsek 0,0013 sekundy. Pokud by byla vzorkovací frekvence 100 kHz, bylo by možné analyzovat 0,00128 sekundy. Lze tedy říci, že nejkratší možný interval v sekundách, který lze analyzovat se rovná *Velikost/vzorkovací frekvence*.

Vysoká míra rozlišení nemusí být vždy k užítku. V některých případech nám dokonce může způsobit, že frekvenční charakteristika bude nepřehledná a její analýza bude obtížnější. Menší míra rozlišení jednotlivých frekvencí může naopak frekvenční charakteristiku zpřehlednit. Je to způsobené tím, že menší rozlišení odstraňuje různé nepatrné záchvěvy, které nás až tolik z hlediska stability nezajímají a dokonce může částečně nebo úplně eliminovat chyby způsobené při odečtení ruchu pozadí. Tyto výhody menší míry rozlišení jsou ale vykoupeny jistým skreslení frekvenční charakteristiky. Bylo zjištěno, že do určitého zmenšení míry rozlišení jednotlivých frekvencí, si „extrémní“ (převyšující své okolí) tóny, které nás zajímají, udržují v rámci tolerance (plus mínus dva decibely) stálý „decibelový“ odstup od svého okolí. Pod určitou hranicí míry rozlišení jsou „decibelové“ rozestupy jednotlivých „extrémních“ tónů od jejich okolí, již hodně (až desítky decibelů) zkresleny a tím by mohlo dojít k chybnému vyhodnocení frekvenční charakteristiky určitého zvukového vzorku procesu obrábění. Toto je třeba dále zkoumat na dalších zvukových vzorcích a určit nějakou „velikost“, která by byla univerzální pro všechny zvukové vzorky procesu obrábění, protože každý vzorek má různou míru rozlišení, pod kterou nelze klesnout. V této práci bylo dospěno k názoru, že univerzální „velikostí“ by mohla být velikost 512. S ohledem na omezené množství zvukových vzorků, které byly k dispozici v této práci, nelze tomuto závěru přikládat velký význam.

Na obrázku (Obr. 35) je zobrazen rozdíl mezi vyšší a nižší mírou zobrazení jednotlivých frekvencí. Vlevo je nastavena míra zobrazení na 16 384 což je maximální možné rozlišení, které je možné v programu Audacity nastavit. Nastavením tohoto rozlišení jednotlivých frekvence je nástroj pro vykreslování frekvenční charakteristiky umožněno, rozeznat tóny ze záznamu zvuku, které se liší o 3Hz v čase 20 milisekund (viz literatura [7]). Vpravo je míra zastoupení nastavena na 512. V tomto případě je nástroj pro vykreslování frekvenční charakteristiky, schopný rozeznat tóny ze záznamu zvuku, které se liší o 94Hz v čase 20 milisekund.



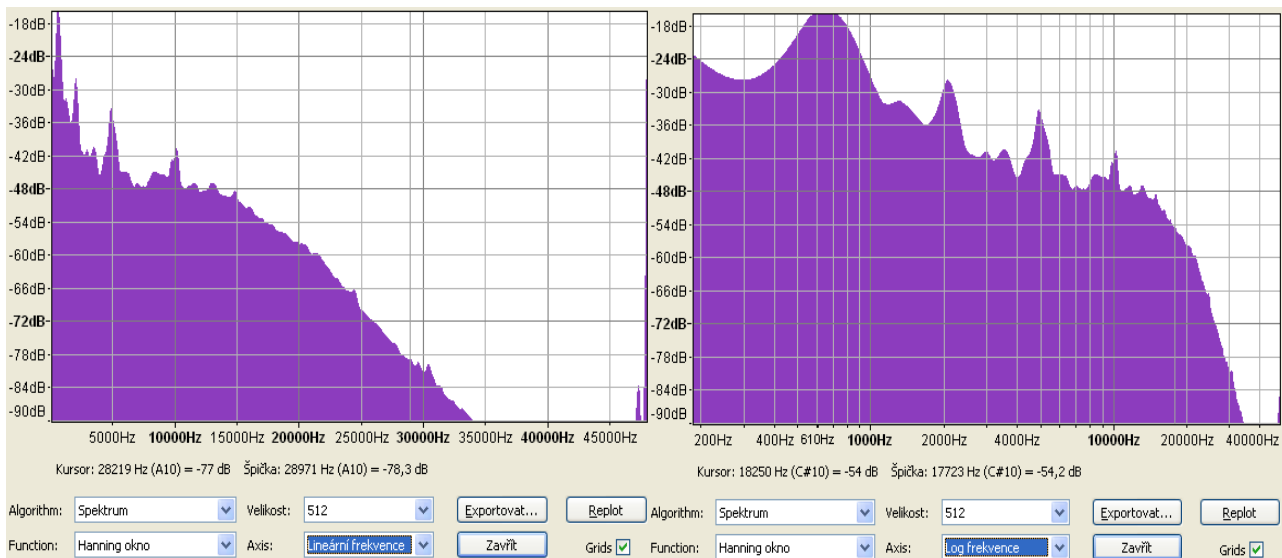
Obr. 35 Míra zastoupení jednotlivých frekvencí

Jak je patrné z porovnání zmíněných frekvenčních charakteristik (Obr. 35), je možné ve frekvenční charakteristice s nastavenou velikostí 512, nalézt všechny „extrémní“ tóny, které se nacházejí ve frekvenční charakteristice s nastavenou velikostí 16 384. Tyto tóny, i když to není patrné na první pohled, mají v rámci tolerance stejný odstup od jejich okolních tónů. Přesto frekvenční charakteristika s nastavenou velikostí 512, je zobrazena s vyšší intenzitou. Dále je patrné, že v této frekvenční charakteristice mezi 15-25 kHz vystoupily frekvence, které se ve frekvenční charakteristice s velikostí 19 384 nevyskytují. To je pravděpodobně způsobeno vyšší intenzitou celé frekvenční charakteristiky při nastavení velikosti 512. Takže tóny, které byly při nastavení velikosti 16 384 pod hranicí 90dB, vystoupily nad tuto intenzitu. Přesto by bylo do budoucna potřeba tento jev dále zkoumat a odpovědět na otázku proč se tyto frekvence při snížení „velikosti“ objevují.

5.3.4 Osa

V tomto poli je možné zvolit, zda se bude frekvenční charakteristika zobrazovat lineárně nebo logaritmicky. Logaritmické zobrazení lépe vyobrazuje podobu frekvenčního pásma na počátku (cca do 4000Hz). Toto zobrazení použijeme jen v případě toho, že nás zajímá, jak vypadá signál v nízkých (hlubokých) frekvencích. Pro vyhodnocování frekvenční charakteristiky v této práci bylo použito zobrazení lineární, které lépe zobrazuje celou frekvenční charakteristiku. Sice o nízkých frekvencích nám toto lineární zobrazení moc neřekne, ale frekvenční analýza je celkově lépe čitelná a výrazně vyšší tóny než jejich okolí v nižších frekvencích rozeznáme.

Na obrázku (Obr. 36) vlevo je zobrazeno, lineární zobrazení frekvenční charakteristiky a vpravo je logaritmické zobrazení frekvenční charakteristiky. Jak je patrné z obrázku (Obr. 36), logaritmické zobrazení nám umožní spíše orientační zobrazení toho, jak frekvenční charakteristika vypadá v nízkých frekvencích. Ani při nastavení velké míry rozlišení jednotlivých frekvencí, není logaritmické zobrazení frekvencí do 1000 Hz moc přesné. Ale přesto logaritmické zobrazení umožní zjistit, zda se v nižších frekvencích nenachází nějaký extrémní tón, který by mohl způsobovat vibrace.

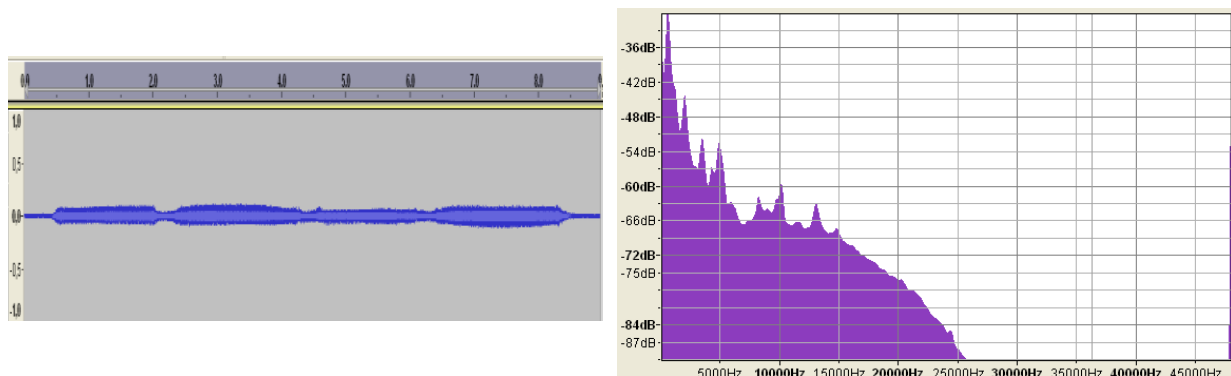


Obr. 36 Různá zobrazení

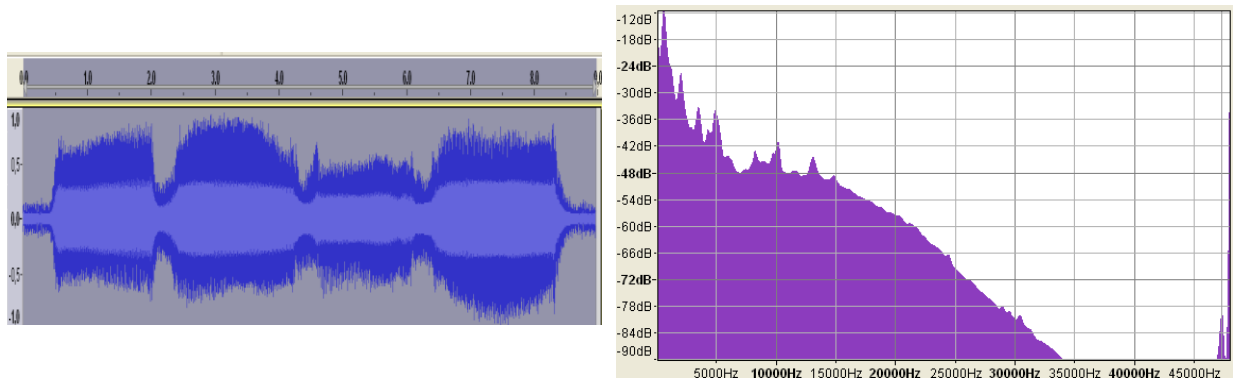
5.4 Zesílení zvukových vzorků

Některé zvukové vzorky je potřeba zesílit, dříve než začnou být vyhodnocovány. Pro zesílení zvuku slouží v programu Audacity nástroj, který najdeme pod záložkou „Efekty“ a nástroj se nazývá „Zesílit...“. Zvukový vzorek s malou intenzitou, často vzniká díky nevhodně zvolenému předzesílení, velké vzdálenosti nahrávacího zařízení od místa obrábění atd. Nejčastěji zvukový signál zesilujeme kvůli tomu, aby se zvukový signál lépe vyhodnocoval (jsou lépe slyšet jednotlivé hranice mezi jednotlivými „úkony“ při obrábění). Zesilovat je potřeba hlavně, když vzorky AE bude vyhodnocovat člověk. Po zesílení se nikterak zvukový signál nemění jen je hlasitější. V případě, že by signál vyhodnocoval stroj, je pravděpodobné, že by zesilování zvukového signálu nebylo potřebné.

Na obrázku (Obr. 37) je vyobrazen zvukový signál a jeho frekvenční charakteristika před zesílením. Na druhém obrázku (Obr. 38) je vyobrazena situace, jak vypadá zvukový vzorek po zesílení. Jak je patrné z obrázku po zesílení, se ve frekvenční charakteristice objeví tóny, které předtím nebyly vidět z důvodu malé intenzity. Do budoucna by bylo žádoucí ověřit, zda tyto tóny, které vystoupí díky zesílení, nejsou nikterak nežádoucí. Jinak si frekvenční charakteristika zachovává všechny své „charakteristiky“, i když to z důvodu jiného měřítka obou frekvenčních charakteristik není na první pohled patrné.



Obr. 37 Před zesílením



Obr. 38 Po zesilení

Při zesilení je dobré zaznamenat hodnotu zesilení konkrétního zvukového vzorku. To kvůli tomu kdybychom například chtěli vzorek vrátit do původního stavu nebo kdybychom chtěli provádět v budoucnu nějaký další výzkum konkrétního zvukového vzorku (to že byl vzorek zesílen, může být důležitá informace). Zatím se pohybujeme v neprobádaných vodách.

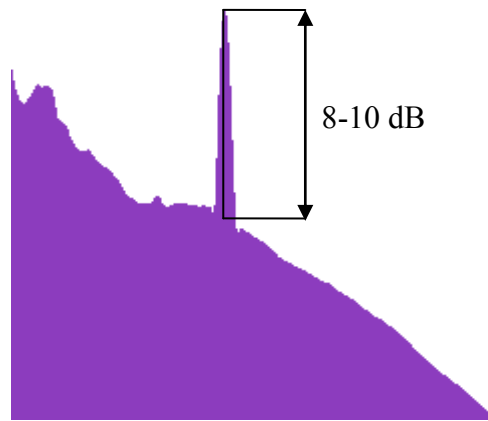
5.5 Vyhodnocení výsledků z frekvenční charakteristiky

Zde je potřeba zdůraznit, že pro vyhodnocení výsledků z frekvenční charakteristiky AE procesu obrábění nebyly použity žádné matematické metody (například statistika). To způsobilo, že tato metoda je dosti subjektivní. Subjektivnost metody bude dále vysvětlena.

Z výzkumu, který byl proveden v rámci této práce, bylo dosaženo závěru, že pokud se ve frekvenční charakteristice AE emise procesu obrábění objeví konkrétní tón, který svou intenzitou o osm až deset decibelů převyšuje své okolí, můžeme v časovém intervalu náležejícího této frekvenční charakteristice, označit obrábění na mezi stability (Obr. 39).

Dále byly určeny hranice, kdy už lze konstatovat, že obrábění ztratilo stabilitu. Pokud se ve frekvenční charakteristice objeví tón, který svou intenzitou převyšuje své okolí o osmnáct decibel, je možné v časovém intervalu náležejícího této frekvenční charakteristice, označit obrábění za nestabilní. Tyto hranice byly určeny na základě rozlišovacích schopností člověka a získaných pilotních vzorků. Člověk je svým sluchem schopen rozeznat minimální změnu intenzity zvuku o tři decibely. Změnu o tři decibely tedy lze označit za přípustnou. Dalo by se tedy předpokládat, že teprve od šesti decibel v rozdílu intenzity, začne sluch upozorňovat dělníka, že se něco v procesu obrábění změnilo. Při porovnání výsledků, které byly získány zkoumáním zvukových vzorků, byla zvolena hranice, do které je ještě možno změnu intenzity zvuku akceptovat na osmnáct decibel.

Lze vyvodit závěr, že pokud by se ve frekvenční charakteristice nacházel tón, který by převyšoval své okolí o 8-18 dB, bylo by dobré pokusit se vrátit obrábění stabilitu. Pokud by navrácení stability bylo příliš obtížné, je možné obrábění, které vyvozuje tón, který převyšuje své okolí o 8-18 dB, akceptovat.



Obr. 39 Vyhodnocení

Zde je vidět ona subjektivita. Kdyby například vyhodnocovalo několik lidí nezávisle na sobě, vzorek, který se nachází na obrázku (Obr. 39), je pravděpodobné, že by vzniklo několik závěrů o kolik „extrémní“ tón převyšuje své okolí. Záleželo by na zvolené dolní hranici (horní hranice je daná). Do budoucna by toto vyhodnocování, bylo dobré provádět na základě statistické analýzy a umožnit tak s velkou objektivitou vyhodnocovat stabilitu řezného procesu z frekvenční charakteristiky AE.

6 Jednotlivé zásady

Na základě zkušeností získaných z výzkumu provedeného pro potřeby této práce, byly sestaveny zásady pro měření a vyhodnocování AE. Zásady obsahují jednotlivé kroky, jak postupovat při měření a vyhodnocování AE. Zásady byly sestaveny s ohledem například na: Přehledné ukládání vzorků AE, případně dalších „skutečností“ (síly, drsnost povrchu, opotřebenění nástroje atd.), možnost budoucího porovnávání s jinými výzkumy, cenové dostupnosti, pochopitelnosti vyhodnocování atd.

6.1 Získávání zvukových vzorků

6.1.1 Nahrávací kvalita

Ze všeho nejdříve je nutné zkontrolovat, v jaké kvalitě je schopno nahrávat zařízení, které bude použito pro nahrávání AE. Doporučená minimální nahrávací kvalita je: vzorkovací frekvence 96kHz a hloubka 24 bitů (odpovídá rozlišovací schopnosti 144 dB, 1 bit = 6dB odpovídá rozlišení 6dB). Pokud nahrávací zařízení umožňuje zaznamenávat akustickou emisi s větší vzorkovací frekvencí je potřeba použití vyšší vzorkovací frekvence zvážít. Vyšší vzorkovací frekvence nám sice umožní analyzovat kratší časové úseky, ale zaznamenané vzorky AE budou náročnější na velikost úložného místa a bude potřeba výkonnější vyhodnocovací zařízení. Pokud tedy máme k dispozici velký ukládací prostor a výkonné vyhodnocovací zařízení můžeme použít vyšší vzorkovací frekvenci než 96kHz. Hloubku není potřeba zvyšovat. A však nižší kvalita záznamu se nedoporučuje, mohla by způsobit, že zvukové vzorky nebudou dostatečně vypovídající.

6.1.2 Úprava pracovního prostoru stroje

Pokud pracovní prostor stroje na, kterém vzorky budou pořizovány, má rovnoběžné stěny, je potřeba uvážit, zda není možné nějakým způsobem stěny zešíkmit. Zešíkmit stěny můžeme pomocí kartonů, plexiskla atd. Jestliže s rovnoběžnými stěnami nelze nic dělat nebo by úprava byla zbytečně složitá, můžeme rovnoběžné stěny akceptovat, ale musíme počítat s tím, že se ve vzorku AE mohou objevit jisté nečistoty, vlivem dlouhého dozvuku, který způsobují rovnoběžné stěny, nebo se můžeme pokusit nečistoty potlačit vhodným umístěním nahrávacího zařízení.

6.1.3 Umístění nahrávacího zařízení

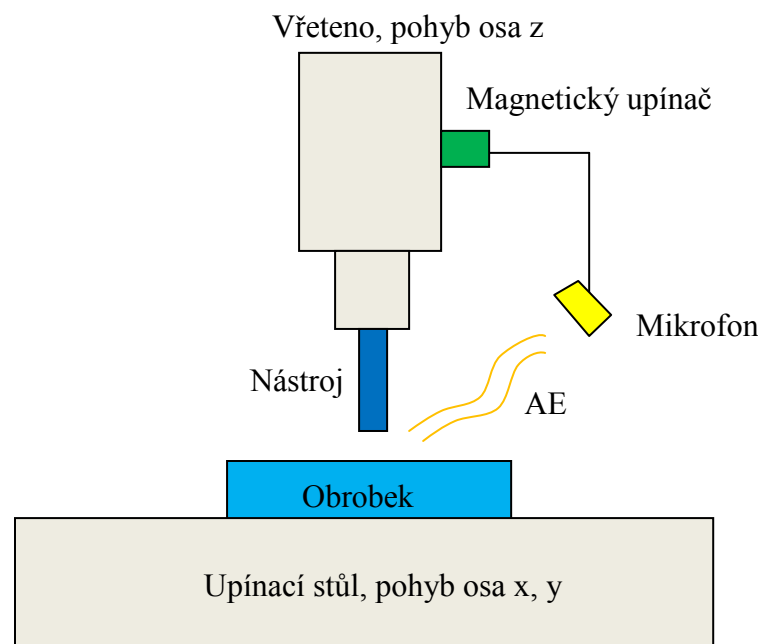
Nahrávací zařízení je nutné, dle možností, umístit co nejbližší místu, kde bude probíhat řezný proces. Zvláště důležité je to v případě toho, když bude při obrábění spuštěné chlazení nebo stroj disponuje pracovním prostorem, který má rovnoběžné stěny. Umístěním blízko místa obrábění pomáhá eliminovat nečistoty ve zvuku, dlouhým dozvukem a částečně napomáhá, aby měl zvuk obrábění dostatečnou vypovídající hodnotu v případě, když se chladí.

Je však nutné dát pozor na to, aby mikrofony nepřekážely v pracovním prostoru stroje. Také je důležité, aby mikrofony byly aspoň částečně chráněné před poškozením (chladičí kapalinou, zlomeným nástrojem, odcházející třískou atd.). Chránit mikrofon je obzvláště potřeba, když se během obrábění chladí, tedy pokud nejsou použity mikrofony odolné proti

vodě. Dalo by se říci, že je nutné najít takové umístění, které by bylo kompromisem mezi ochranou mikrofonu a umístění mikrofonu co nejbližší k místu obrábění. V tom, aby nám mikrofon nepřekážel v práci, žádný kompromis dělat nemůžeme.

Dalším důležitým faktorem pro umístění mikrofonu je neměnná vzdálenost nahrávacího zařízení od místa řezu, v celém průběhu nahrávání jednoho zvukového vzorku. Nejlepší je nahrávací zařízení umístit tak, aby mělo stálou polohu vůči řeznému nástroji, příklad je vidět na obrázku (Obr. 40). Ustavení nahrávacího zařízení musí být dostatečně pevné, aby nehrozilo utržení při prudkém zrychlení pohyblivých částí (vřeteno, obráběcího stolu ...). K upevnění nahrávacího zařízení můžeme například použít magnetický upínač, lepenku. Také bychom mohli vytvořit nějaký mechanický přípravek nebo použít jiný způsob upnutí, které dovoluje vytvořit pevný spoj, ale zároveň umožní po skončení zaznamenávání AE bez problémů nahrávací zařízení odejmout od místa, kde bylo připevněné. Nahrávací zařízení lze umístit například na vřeteno stroje, na upínací stůl, na ochranný kryt obráběcího prostoru, na obrobek. Jak již bylo řečeno je hlavně potřeba dávat pozor, aby nahrávací zařízení nepřekáželo vlastnímu obrábění a nedošlo tak ke kolizi stroje s nahrávacím zařízením. Dále je zapotřebí se vyvarovat umístění nahrávacího zařízení na místa, kde při obrábění budou pravděpodobně vznikat vibrace. Jako příklad lze uvést lampičku v pracovním prostoru stroje. Je pravděpodobné, že díky svému vyložení lampička bude při obrábění vibrovat. Tento fakt by mohl negativně působit na zaznamenaný vzorek AE.

Platí pravidlo, že čím jsou lepší podmínky pro měření AE (viz kapitola 4.3), tím dále by mohlo být nahrávací zařízení umístěné od místa řezu a nebylo by důležité, aby mikrofon zůstal ve stálé vzdálenosti od místa řezu.



Obr. 40 Příklad umístění nahrávacího zařízení

6.1.4 Předzesílení

Je důležité vyzkoušet, zda je správně nastavené předzesílení. To můžeme provést buď na zkušebním přejezdu technologickými podmínkami, které by byly použity při vlastním měření AE nebo jiným způsobem vyvodit větší hluk než bude při vlastním obrábění (paličkou o

plech, můžeme zakřičet atd.). Pokud by byla zvolena cesta zkušebního přejezdu, musely by být použity technologické podmínky, u nichž předpokládáme nejvyšší intenzitu AE (nejvyšší hlučnost). Na zkušebním přejezdu by bylo zapotřebí ověřit, zda nebyl nastaven nevhodný pracovní rozsah (předzesílením). Pokud akustická emise svou intenzitou překročí pracovní rozsah, je nutné zmenšit předzesílení. Může se ale stát, že akustická emise bude mít malou intenzitu. V tomto případě je potřeba naopak zvýšit předzesílení.

Další situace, která může nastat: Intenzita akustické emise se přesně vejde do stanovených mezí. Zde je zapotřebí si rozmyslet, zda během měření může intenzita AE, ještě stoupnou. V tom případě by bylo dobré ještě o trochu zvýšit pracovní rozsah. V případě, že si nejsme jistí, jestli se AE bude ještě zesilovat, je vhodnější nastavit větší pracovní rozsah. Je lepší pořídít zvukový záznam s menší intenzitou a po té ho zesílit, než pořídít zvukový signál, který svou intenzitou překročil nastavené meze. Pokud jsme si jisti, že intenzita AE už nestoupne, můžeme nechat nastavené předzesílení. Pokud si jistí nejsme raději předzesílení ještě zmenšíme a necháme si jistou rezervu.

6.1.5 Vlastní záznam zvukových vzorků

Měřicí přístroj je nutné spustit přibližně pět vteřin před tím, než nástroj zajede do řezu. Je to z důvodu toho, že je potřeba získat záznam ruchů okolí a rotujícího nástroje, které při vyhodnocování budou odečteny (pokud se tak rozhodneme) od zvuku, který vzniká při obrábění. Pokud je záznam kontinuální, tato potřeba odpadá.

Pokud nahráváme zvuk vícero přístroji a záznam zvuku není kontinuální, je nutné při spuštění mikrofonů vyvodit nějaký ruch (například úderem ochranných dveří stroje), aby při zpracování byla možná časová synchronizace vzorků AE. Časová synchronizace také ulehčí porovnávání výsledků jednotlivých nahrávacích zařízení.

Dalším faktem, na který je zapotřebí dbát během zaznamenávání AE procesu obrábění, je správné popisování jednotlivých vzorků AE. Zvláště je důležité dobře popisovat naměřené vzorky, v případě, že měření AE probíhá několika přístroji zároveň a pokud ještě měříme nějaké doplňkové hodnoty (opotřebení, síly atd.). Osvědčilo se používat označení „přejezd“ (případně stopa) + číslo přejezdu (první přejezd = 1). Toto označení jednotlivých vzorků zabezpečí, že nebudou přiděleny nesprávné informace k nesprávnému vzorku a omezí to tak případné nesprávné závěry při vyhodnocování.

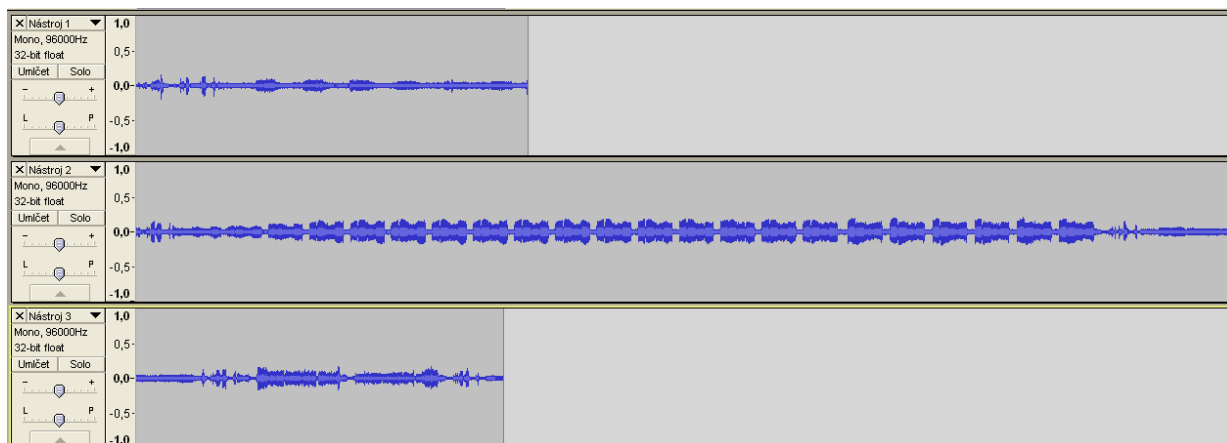
Dále je důležité zapisovat technologické podmínky jednotlivých přejezdů. Již z technologických podmínek se dá leccos usuzovat o procesu obrábění, což nám pomůže při vyhodnocování. Dalším důležitým argumentem proč zapisovat technologické podmínky je, aby získané závěry z určitých vzorků, mohly být v budoucnu porovnány, se závěry jiného výzkumníka.

Pokud se během experimentu přihodí nějaká událost způsobující ruch, který se pravděpodobně projeví v měřené AE (puštění sousedního stroje, upuštění nástroje atd.), bylo by dobré co nejpřesněji zaznamenat čas, kdy se událost stala. Nejlepší by bylo zaznamenat, při jakém přejezdu se tato událost stala a aspoň přibližně v jakém časovém úseku toho konkrétního vzorku. Přesné umístění kdy se událost stala, nám umožní, abychom při vyhodnocování v daném zvukovém vzorku a v daný čas zvýšili pozornost. Zvýšená pozornost umožní odhalení těchto parazitních ruchů ve vzorku AE a pomůže se vyvarovat špatnému vyhodnocení vzorku.

6.2 Vyhodnocování výsledků z frekvenční charakteristiky

6.2.1 Příprava zvukového vzorku

V případě, že v některých vzorcích AE bude zaznamenáno obrábění více nástroji nebo měření AE bylo kontinuální, je potřebné před vlastním vyhodnocením výsledků zvukové vzorky upravit (pozor na to, aby byla uložena kopie původního vzorku). Upravení spočívá v tom, že rozdělíme záznam AE, tak aby každý nástroj měl vlastní stopu (Obr. 41). Tím se záznam AE zpřehlední a usnadní práci při vyhodnocení výsledků. Důležité je, nezapomenout označit, jaká stopa reprezentuje jaký nástroj (přejmenování stop viz kapitola 6.2.2). Ke správnému rozdělení kontinuálního záznamu nám může pomoci výměna nástroje. Ve vzorcích AE je velmi viditelná a patrná na poslech. Výměna nástroje může být ze vzorku odstraněna (pokud ji také nebudeme analyzovat). Hlavní je, aby stopa obsahovala zvuk obrábění a ruch okolí náležející této stopě.



Obr. 41 Rozdělení vzorku na více stop

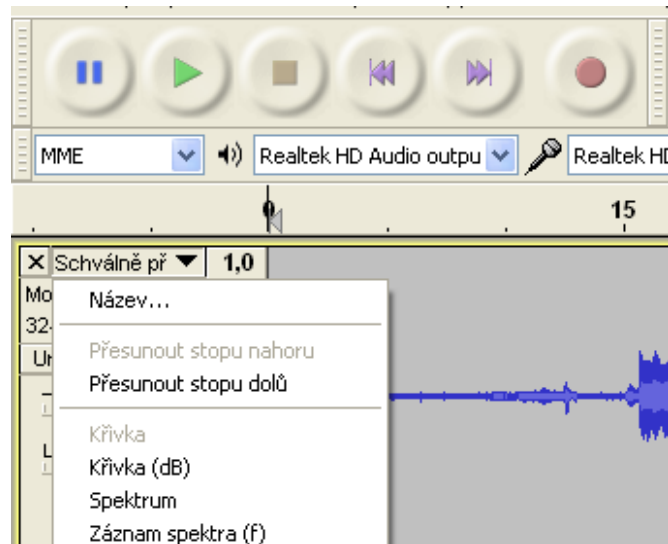
Pokud měření probíhalo několika nahrávacími zařízeními najednou, je žádoucí záznamy nahrát pomocí programu Audacity do jednoho souboru (opět nezapomenout zálohovat původní záznamy AE) a časově je synchronizovat (Obr. 42). K tomu nám pomůže již zmíněný uměle vyvozený ruch. To nám značně usnadní porovnávání výsledků z jednotlivých nahrávacích zařízení a ulehčí orientaci mezi vzorky AE, protože sjednocením se nám zmenší počet souborů. Zde se ukáže, jak pečlivě byly vzorky popsány. Nezapomeňte si poznamenat, jaká stopa patří k jakému přístroji (viz kapitola 6.2.2).



Obr. 42 Vzorky z různých nahrávacích zařízení

6.2.2 Přejmenování zvukové stopy

Jak bylo řečeno, někdy je potřeba jednotlivé stopy přejmenovat pro lepší orientaci v mezi jednotlivými stopami. V programu Audacity se přejmenování skrývá v možnostech stopy. Možnosti složky najdeme u každé stopy vlevo nahoře, naproti křížku na uzavření stopy, schované pod symbolem černého trojúhelníku. Po rozbalení se objeví několik nástrojů, jak pracovat se stopou. Na přejmenování slouží hned první nástroj s titulkem „Název“ (Obr. 43).



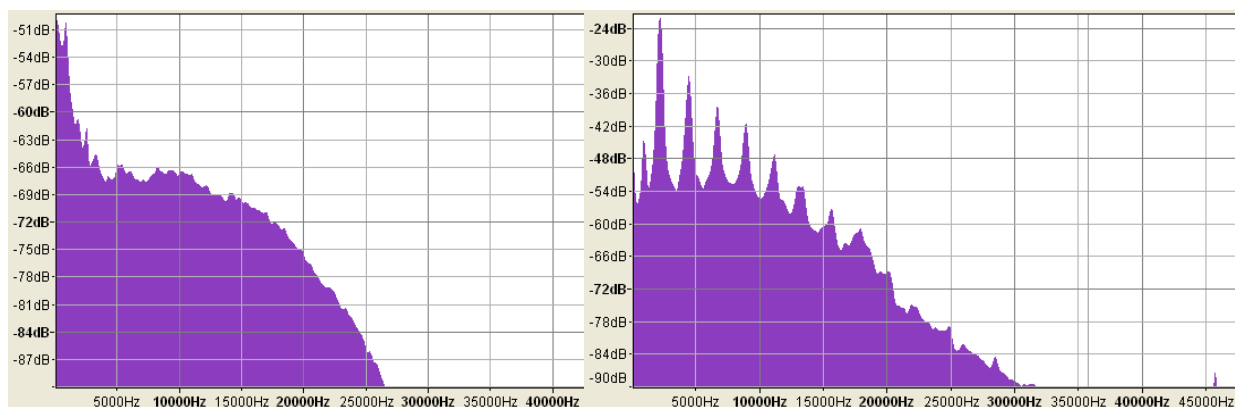
Obr. 43 Název zvukové stopy

6.2.3 Odečtení ruchů pozadí

V dalším kroku je potřeba rozhodnout, zda je potřeba odečítat ruchy pozadí či nikoliv. Dále popsané zásady, platí jen v případě, kdy nás zajímá jen to, jestli je obrábění stabilní či nikoliv. Je pravděpodobné, že kdybychom chtěli ve frekvenční charakteristice konkrétního zvukového vzorku sledovat i další charakteristiky procesu obrábění, odečítání ruchu pozadí bychom se nevyhnuli.

Jedním případem, kdy odečítat ruch pozadí nemusíme je, když z frekvenční analýzy je bez odečtení ruchu pozadí patrné, že v určitém časovém intervalu bylo obrábění nestabilní (kapitola 6.2.5). Je potřebí zkontrolovat i frekvenční charakteristiku ruchu pozadí jestli tón, o kterém se domníváme, že způsobuje nestabilitu, nepochází z ruchu pozadí.

Dalším případem, kdy nemusíme odečítat ruch pozadí od zvuku obrábění je, když obrábění svou intenzitou několikrát převyšuje ruch pozadí (Obr. 44). V tom to případě by odečtení ruchu pozadí nepřineslo žádné nové informace, co se týče stability procesu obrábění.

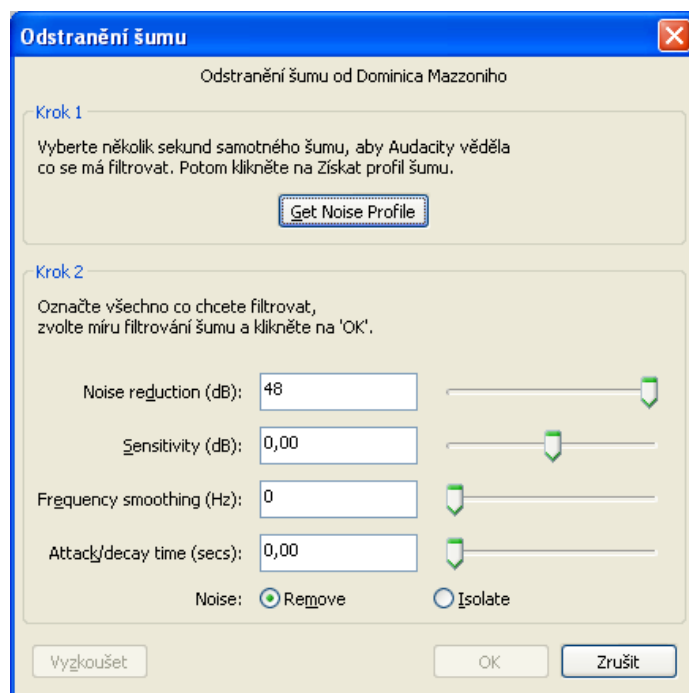


Obr. 44 Obrábění s větší intenzitou zvuku než pozadí

Na obrázku (Obr. 44) vlevo se nachází frekvenční charakteristika ruchu pozadí a vpravo frekvenční charakteristika procesu obrábění. Jak je patrné, zvuk obrábění je ve všech místech frekvenční charakteristiky minimálně o tři decibely hlasitější než ruch pozadí. V místech s největším rozdílem intenzit se liší o více než 10 decibel. Více o této problematice v kapitole 5.1.1 a 5.2.

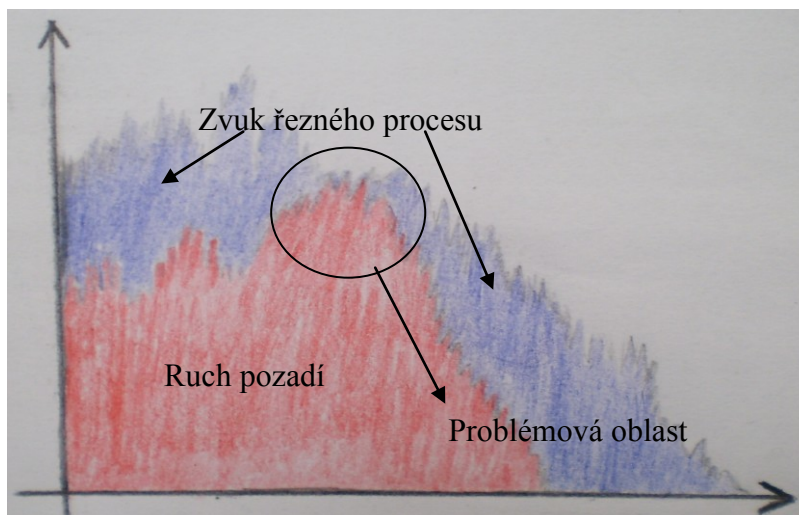
Pokud se rozhodneme ruch pozadí odečíst, slouží k tomu nástroj, který najdeme v záložce „Efekty“, pod názvem „Odstranění šumu“. Nejdříve je nutné vybrat místo, kde se nachází ruch pozadí a předat ho filtru pomocí tlačítka „Get Noise Profile“ (Obr. 45). Ruch je zapotřebí rozeznat při poslechu konkrétní nahrávky zvuku. Pokud byl přístroj na zaznamenávání AE spouštěn pár sekund před začátkem obrábění, najdeme ruch pozadí snadno. Pokud byl pořízen kontinuální záznam je třeba na to myslet již při úpravě vzorků pro vyhodnocování (více kapitola 5.2.1).

Jako druhý krok je zapotřebí pomocí nástrojů, kterými odstranění šumu disponuje, nastavit jak bude probíhat odečtení ruchu pozadí. Jde o to najít kompromis mezi odečtením ruchu pozadí a zkreslení výsledného zvukového vzorku. Nastavení na obrázku (Obr. 45) je doporučeno použít jako univerzální nastavení pro všechny zkoumané zvukové vzorky. Zvuk, který vznikne po odečtení ruchu pozadí, pravděpodobně nebude pěkný na poslech pro člověka. Pozor tento fakt neznamená, že odečtení ruchu pozadí bylo chybně provedeno (kapitola 5.2.1).



Obr. 45 Odstranění šumu

Při odečtu ruchu pozadí je dobré si poznamenat místa v konkrétním vzorku, kde se prolíná ruch pozadí se zvukem obrábění (Obr. 46). V těchto místech může při odečtení ruchu pozadí dojít k jistému zkreslení. Z tohoto důvodu je vhodné při vyhodnocení v těchto místech dbát zvýšené pozornosti a nepřiklánět výsledkům z těchto oblastí velkou váhu (kapitola 5.2).



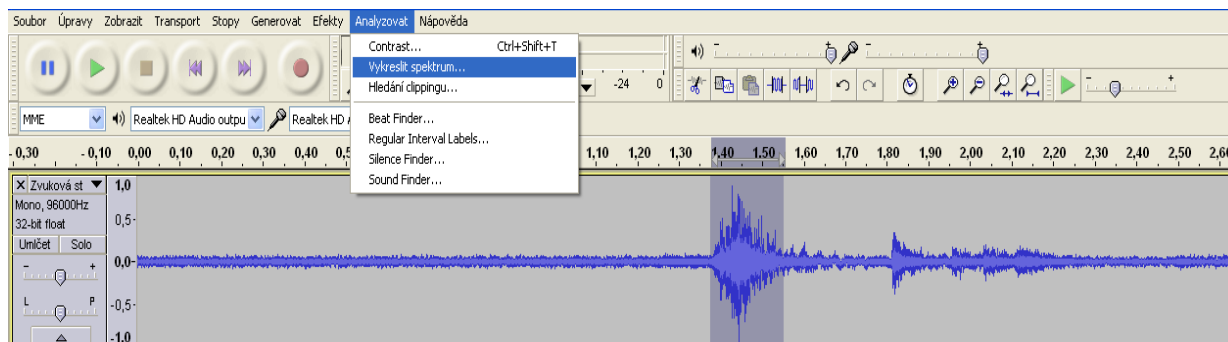
Obr. 46 Chyba při odečtení

6.2.4 Vykreslení frekvenční charakteristiky

Pro vykreslení frekvenční charakteristiky ze zvukového vzorku slouží nástroj „Vykreslit spektrum“, který najdeme v záložce „Analyzovat“. Je zapotřebí si rozmyslet, jak dlouhé časové úseky budeme analyzovat. Je žádoucí, aby se jejich délka měnila. V místech, kde nástroj například mění směr obrábění, najíždí do řezu atd., se doporučuje analyzovat kratší časový úsek. Důvodem je, že při nájezdu nebo při změně směru obrábění může dojít

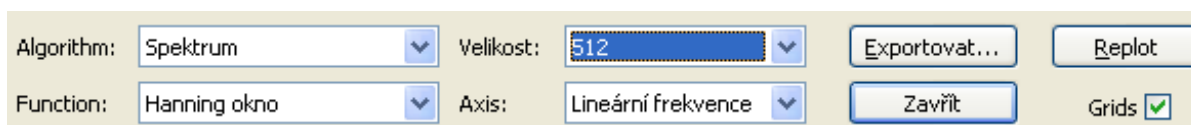
k chvilkové ztrátě stability (o této problematice více v kapitole 5.3). Když se tak stane díky krátkému časovému intervalu, který budeme analyzovat, nestabilitu odhalíme a můžeme změnit nájezdy případně technologické podmínky při přejezdech atd. V případě, že bychom analyzovali příliš dlouhý časový úsek, mohlo by se stát, že nám tato skutečnost unikne, protože zachvěv zanikne v mnoha frekvencích, které delší časový záznam bude obsahovat.

Pokud máme rozmyšleno, jak dlouhý časový úsek budeme analyzovat, označíme ho a necháme vykreslit frekvenční charakteristiku (Obr. 47).



Obr. 47 Vykreslení frekvenční charakteristiky

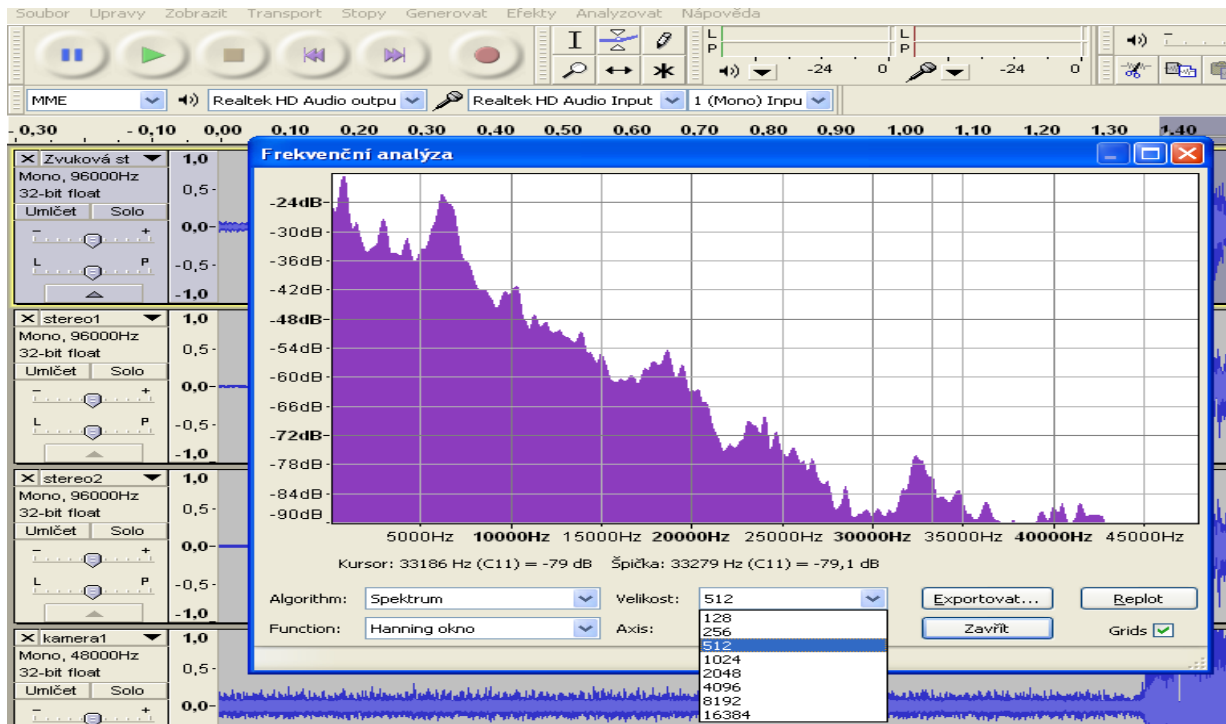
Dole v okně bude několik kolonek, které je zapotřebí nastavit (Obr. 48). V kolonce „Algorithm“ nastavte „Spektrum“ pokud tam není přednastaveno. Do kolonky „Function“ je doporučeno nastavit „Hanning okno“. Pokud uznáte za vhodné jiné okno, lze nastavit i jiná okna, které ještě zpracují signál AE, před vykreslením frekvenční charakteristiky. Při použití jiného okna je zapotřebí počítat s tím, že popsání zásady nemusí s tímto oknem zcela fungovat. Největší rozdíly budou na hranici stability. Je to způsobené tím, že intenzita „extrémních“ tónů v konkrétní frekvenční charakteristice, se může o několik decibel lišit pro každé okno, které je možné použít. Pro kontrolu stability se osvědčilo v kolonce „Axis“ nastavit „Lineární frekvence“. Dále můžeme nastavit zda, se bude zobrazovat ve frekvenční charakteristice mřížka či nikoliv. Zaškrtnutím „Grids“ se mřížka zobrazí, odškrtnutím zmizí. Funkce velikost bude vysvětlena v další kapitole.



Obr. 48 Nastavení frekvenční charakteristiky

6.2.5 Nastavení míry rozlišení a určení výsledku

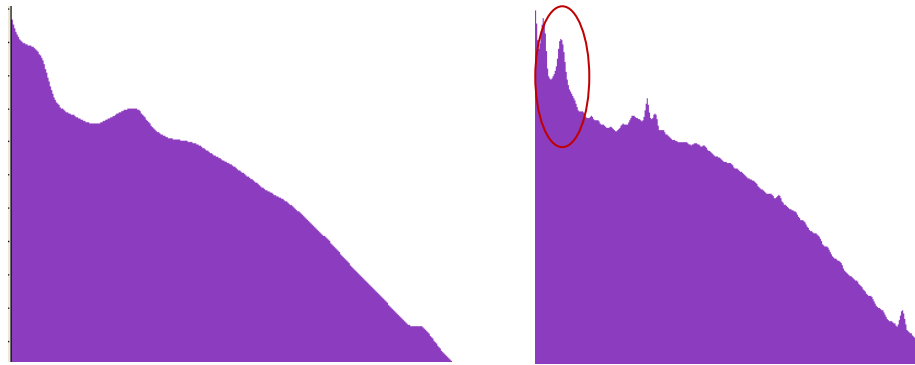
Mírou rozlišení jednotlivých frekvencí říkáme nástroji „*Vykreslit spektrum*“, jak moc bude citlivý k jednotlivým záchvěvům frekvencí ve vzorku AE. Míru rozlišení nastavujeme v kolonce „*Velikost*“, dole uprostřed (Obr. 49). Do kolonky velikost můžeme zadat jedno z osmi rozlišení 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16 384. Jednotlivé velikosti a jejich možnosti jsou více popsány v kapitole 5.4.



Obr. 49 Nastavení velikosti

Nastavení správné míry rozlišení jednotlivých frekvencí je důležité hlavně kvůli pohodlnějšímu vyhodnocení. Čím je míra rozlišení menší, tím se stává frekvenční charakteristika přehlednější. Je to díky tomu, že nástroj pro vykreslení frekvenční charakteristiky není tolik citlivý na jednotlivé záchvěvy, které nejsou z hlediska stability důležité. Další výhodou menší míry rozlišení je, že čím menší míra rozlišení je tím je možno zkoumat menší časový úsek. Přesto nemůžeme dát nejnižší možnou „velikost“, protože vzorky se od určité „velikosti“ zkreslují tak, že zobrazení frekvenční analýzy přestává být věrohodné.

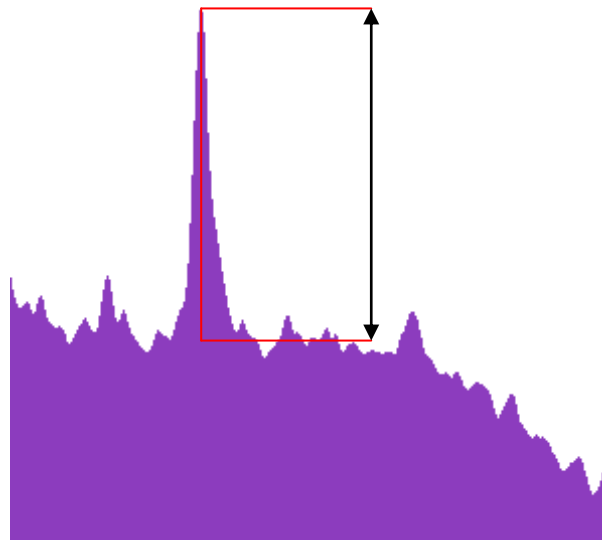
Doporučený postup je tento: Začněte na nejnižší možné velikosti. Pokud se neobjevují žádné frekvence, které by převyšovaly své okolí (Obr. 50 vlevo), nastavte velikost na nejbližší vyšší velikost. To opakujeme až do té doby, kdy se objeví nějaký extrém. Pokud se stane, že budeme mít nastavenou největší možnou míru rozlišení jednotlivých frekvencí (velikost) a stále nebude patrný žádný extrém, je možné říci, že obrábění v tomto časovém intervalu je stabilní.



Obr. 50 Bez extrémů

První extrém

V případě, že začnou některé frekvence vystupovat dříve, než dojdeme k nejvyšší možné „velikost“, je potřeba odměřit o kolik převyšují své okolí (Obr. 51). Pokud některá z frekvencí svou intenzitou převýší své okolí o 8-10 decibel, můžeme říci, že obrábění začíná ztrácet stabilitu. Pokud frekvence budou převyšovat své okolí o méně než 8 decibel, nastavíme větší velikost a zapíšeme si hodnoty těchto frekvencí. Změříme, o kolik převyšují své okolí opět tyto frekvence při nastavené větší velikosti. Je nutné zkontrolovat, zda nevystoupila jiná frekvence, která v předchozí velikosti ještě nebyla vidět. V případě, že hodnota převýšení dále neroste, můžeme opět konstatovat, že obrábění je v tomto časovém úseku stabilní. Pokud se hodnota jejich převýšení zvětšila, ale přesto není o osm nebo více decibel větší než intenzita okolí, pokračujeme ve zvyšování velikosti. Jestliže velikost bude nastavena na maximální možnou hodnotu a námi sledované frekvence nebudou převyšovat své okolí o 8-10 decibel, je možné závěrem říci, že v tomto časovém úseku je obrábění stabilní.

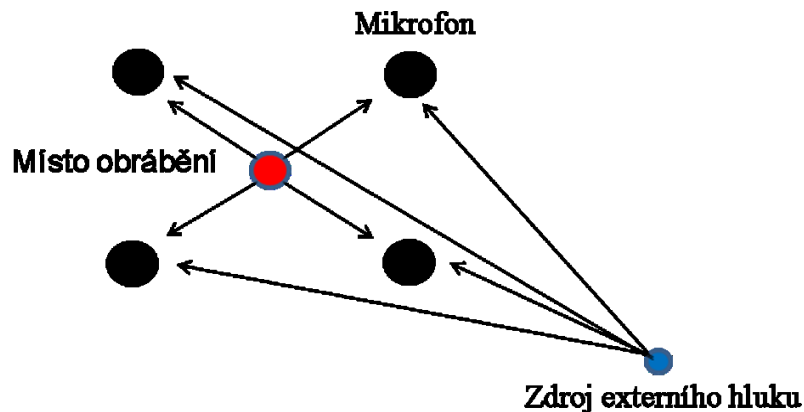


Obr. 51 Hranice stability

7 Další zjištění skutečnosti

7.1 Ruchy z okolí stroje

Jak bylo řečeno, častým problémem v praxi bývají ruchy v okolí stroje (ostatní stroje, přeprava materiálu atd.). V budoucnu by se tento problém mohl řešit díky faktu, že jsme schopni rozeznat směr, odkud ruch přišel.



Obr. 52 Hluk okolí

Tato teorie je založena na předpokladu, že budeme mít 4 mikrofony ve stejné vzdálenosti (vzdálenosti musí být stále stejné) od místa řezu.

První možností, jak poznat parazitní zvuk, který přišel z vně obráběcího stroje, by mohlo umožnit použití tak zvaných směrových mikrofonů. Ty měří zvuk z místa, kam jsou namířeny a z ostatních směrů mají omezenou propustnost. To znamená, že jednotlivé tóny z místa řezu zaznamená se stejnou intenzitou, proto jejich frekvenční charakteristiky budou stejné. Když tón přijde z vně stroje, tak ho každý mikrofon zaznamená s jinou intenzitou, to znamená, že se frekvenční charakteristiky budou lišit a je pravděpodobné, že by mohlo při porovnání těchto charakteristik možné parazitní tyto parazitní zvuky odhalit a případně je odstranit.

Druhým způsobem, jak poznat parazitní zvuky by mohl umožnit fakt, že známe rychlost zvuku ve vzduchu a zdroj ruchu bude od každého mikrofonu jinak vzdálený, jen v některých případech se stane, že vzdálenost bude ke dvěma mikrofonům stejná. To způsobí, že ruch zaznamená každý mikrofon v jiný čas. Opět je pravděpodobné, že při porovnání frekvenčních charakteristik všech čtyřek mikrofonů, budeme schopni určit parazitní zvuky, které přišly z vně stroje.

7.2 Posun frekvenční charakteristiky

Při tvorbě této práce bylo dospěno k názoru, že by bylo dobré analyzovat změnu frekvenční charakteristiky. Úvaha je takové, že například při postupném opotřebení nástroje bude frekvenční charakteristika měnit svůj průběh a mohla by tak umožnit sledovat opotřebení nástroje. Bohužel pro potřeby výzkumu změny frekvenční charakteristiky by bylo potřebné získat specifické vzorky, které při tvorbě této práce nebyly k dispozici.

Tato metoda by mohla být například použita při hrubovacím procesu. Tam bychom mohli využít toho, že hrubování je většinou po jednoduchých rovinných drahách. Dalo by se

předpokládat, že řezy obráběny stejnou řeznou rychlostí, ve stejné hloubce řezu, stejným posuvem a jdoucí stejným směrem by měli mít stejnou frekvenční charakteristiku. Takže při prvním přejezdu v hloubce 1mm získáme frekvenční charakteristiku a při druhém přejezdu v hloubce 2mm získáme další frekvenční charakteristiku. Poté tyto dvě charakteristiky porovnáme, a pokud se budou lišit, dalo by se předpokládat, že se něco při obrábění změnilo.

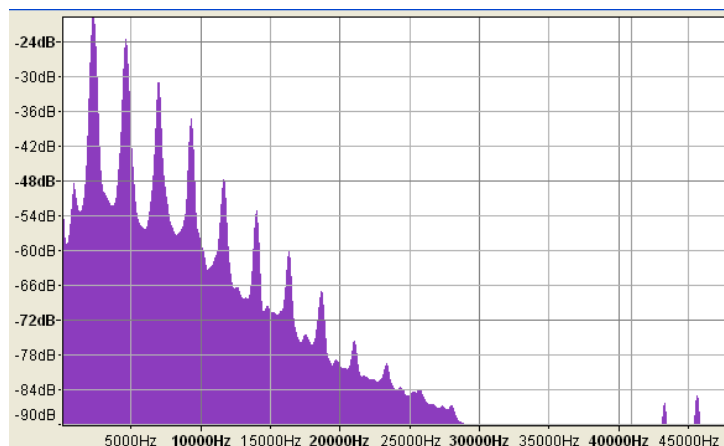
Dále by kontrola změny frekvenční charakteristiky mohla být využita při výrobě větších sérií. Dá se předpokládat, že jednotlivé úkony na prvním výrobku, by měly mít stejnou frekvenční charakteristiku jako úkony na druhém výrobku. Pokud při jejich porovnání odhalíme nějaké odlišnosti, dá se předpokládat, že se změnil nějaký „parametr“ obrábění.

Je zapotřebí říci, že tuto metodu bude pravděpodobně ovlivňovat, mnoho faktorů jako například nějakou dobu trvá, než se nástroj zaběhne, dá se předpokládat, že do toho bude zasahovat i teplota stroje atd. Některé negativní vlivy by mohlo eliminovat to, že bychom nepoužívali frekvenční charakteristiku naměřenou na prvním vzorku, ale vždy bychom porovnávali frekvenční charakteristiku po sobě jdoucích výrobků.

7.3 Vyšší harmonické frekvence

Vibrace jsou zpravidla spojené s výskytem výrazných vyšších harmonických frekvencí. O vyšších harmonických frekvencích mluvíme tehdy, objeví-li se ve frekvenční analýze tón, jehož frekvence je celočíselným násobkem frekvence nižšího tónu.

Vyšší harmonické frekvence (hlavně, když klesají) nám říkají, že první frekvence (ne nahodilá), je nějakou určitou vlastní frekvencí. Z toho vyplývá, že začínající výskyt vyšších harmonických frekvencí, může ukazovat na začínající nestabilitu řezného procesu. Při zpětném získávání stability nám z pravidla postupně od nejvyšší frekvence, vyšší harmonické frekvence mizí.



Obr. 53 Vyšší harmonické frekvence

7.4 Bellovy laboratoře

V Bellových laboratořích bylo zjištěno, že při změně intenzity o +3dB se dvakrát zvýší výkon. V případě, že se změni intenzita o -3dB sníží se výkon o polovinu. V mechanice je výkon úměrný kvadrátu síly.

$$F = k \cdot x \Rightarrow x = \frac{F}{k}$$

$$E = \int F dx = \int k \cdot x dx = \frac{k}{2} x^2 = \frac{k F^2}{2 k^2} = \frac{1}{2k} F^2 = k' F^2 = P$$

Tyto předpoklady jsou podmíněné tím, že distribuce energie do tlumení (vnitřním třením materiálu a třísky) a útlum energie do zvuku jsou konstantní.

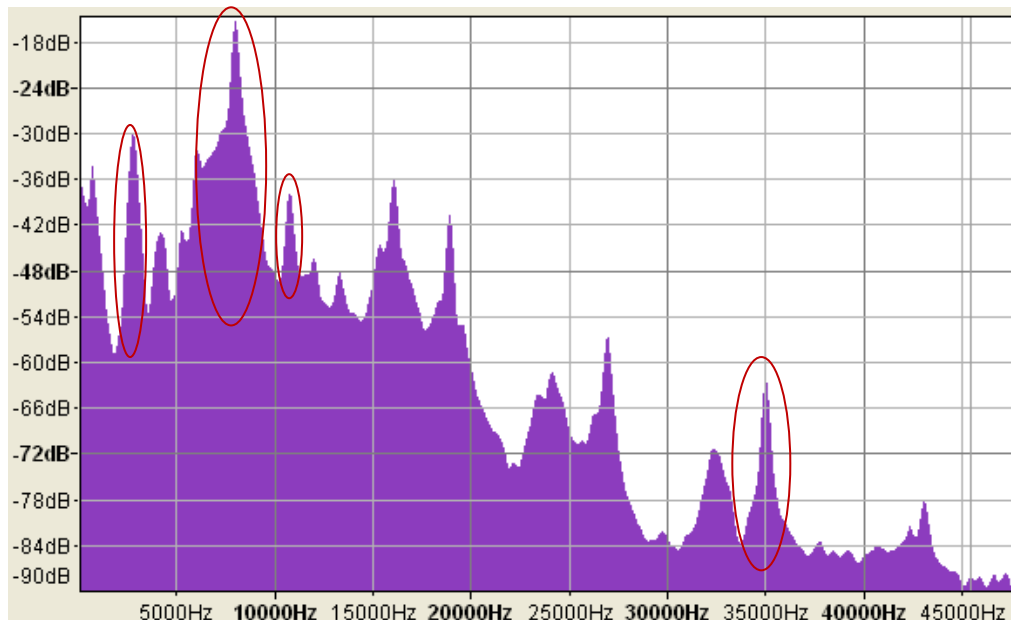
Z toho by se dalo usuzovat, že v důsledku skutečností, zjištěných v Bellových laboratořích, by decibely mohly do značné míry napomáhat odhadům sil a výkonů při řezném procesu.

Do budoucna by tedy bylo třeba ověřit, zda platí, že při zvýšení o +3dB znamená zvýšení na dvojnásobek výkonu (na vřetenu), vezmeme-li vztah mezi silou a výkonem, znamenala by změna o +6 dB resp. o -6dB, že výkon vzroste čtyřikrát, resp. klesne o jednu čtvrtinu a dvakrát vzrostou, resp. o jednu polovinu klesnou síly.

7.5 Náhodné tóny a jejich původ

Ve frekvenční charakteristice se může objevit více vlastních frekvencí (Obr. 54). Nesmíme si je plést s vyššími harmonickými frekvencemi. Soustava S-N-O-P má mnoho členů, které mohou mít vlastní frekvenci (dynamometr, břity, stroj, přípravek na upínání, upínání nástroje) a mohou tak ovlivňovat akustickou emisi. Dá se také předpokládat, že lehčí členy budou mít vlastní frekvence ve vyšších frekvencích a členy s vyšší hmotností bude mít vlastní frekvenci v nižších frekvencích. Zde je však zapotřebí brát v úvahu i tuhost jednotlivých členů. I člen s malou hmotností, ale vysokou tuhostí může mít vlastní frekvenci v nižších frekvencích.

Tento fakt by bylo třeba dále zkoumat na dalších zvukových vzorcích. Odpovědi na otázku, proč tyto frekvence vznikají, by mohlo přinést další možnosti sledování procesu obrábění pomocí frekvenční analýzy AE.



Obr. 54 Více vlastních frekvencí

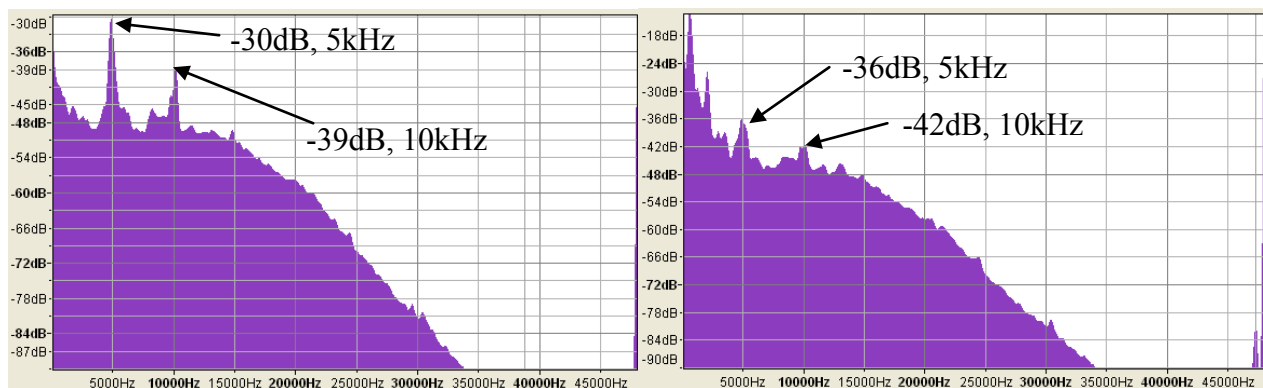
7.6 Ruchy pozadí

Bylo zjištěno, že intenzita ruchu pozadí bývá největší do 15kHz a poté s velkou rychlostí klesá. Pokud se objeví nějaký tón s vyšší intenzitou než jeho okolí, bývá tento tón s intenzitou do 10kHz. Velké extrémy nad touto hranicí nejsou příliš časté.

7.7 Ruch pozadí silnější než zvuk obrábění

V některých případech se nám může stát, že ruch pozadí bude mít větší intenzitu než vlastní obrábění. Je to pravděpodobně způsobeno jistým útlumem, který nastane, když nástroj vjede do řezu.

Na obrázku (Obr. 55) vlevo vidíme ruch pozadí, které má dva vystupující tóny (5kHz s intenzitou -30dB a 10kHz s intenzitou -39dB). Dalo by se tedy předpokládat, že tyto tóny se stejnou intenzitou nalezneme i ve vlastním obrábění. (Obr. 55 vpravo). Přesto se tak nestalo, naše sledované tóny se změnilly na hodnoty: 5kHz s intenzitou -36dB a 10kHz s intenzitou -42dB.



Obr. 55 Pozadí s větší intenzitou

Tento problém se dá odstranit vhodným nastavením filtru pro odstranění šumu, pokud by byl v tomto případě šum pozadí odstraňován. Přesto v tomto místě bude při vyhodnocení zapotřebí zvýšené pozornosti kvůli možnosti výskytu chyb.

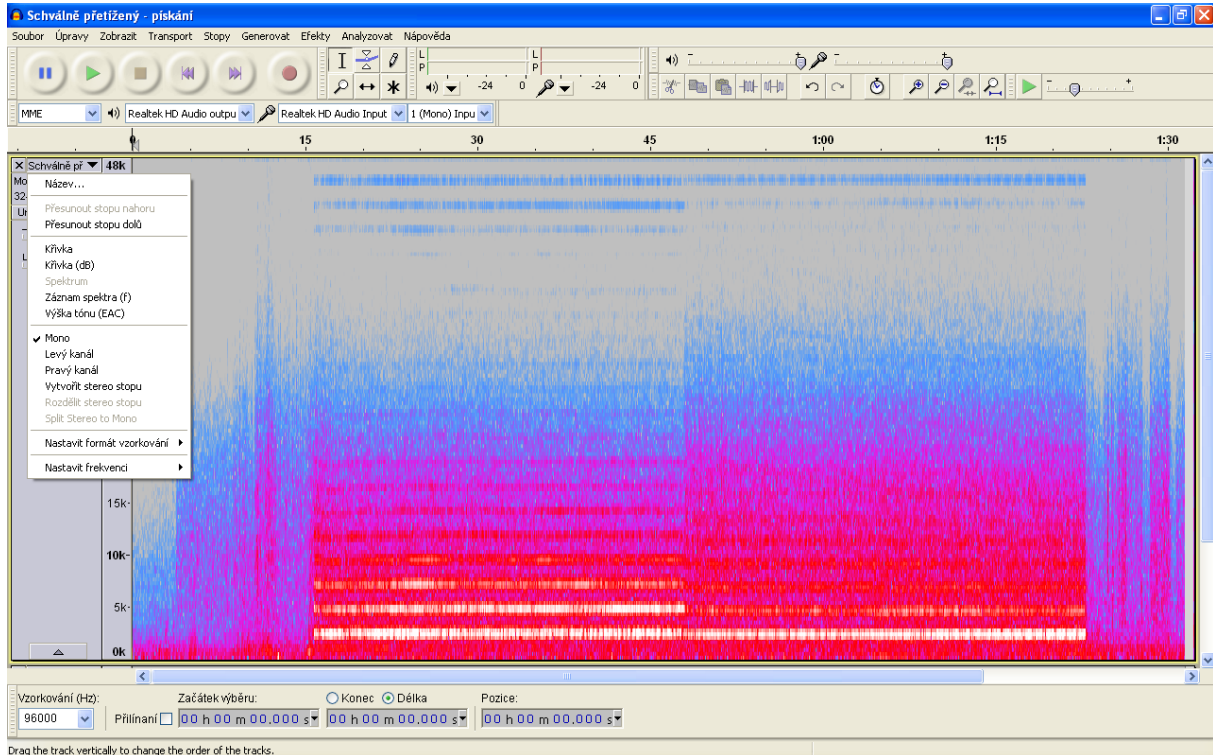
7.8 Další zajímavé nástroje programu Audacity

7.8.1 Časová frekvenční charakteristika

Další zajímavý nástroj pro vyhodnocování zvukového signálu v Audacity je „vykreslení frekvenční charakteristiky v čase“. Toho lze docílit tak, že rozbalíme možnosti stopy (Obr. 56). V možnostech stopy bude zaškrtnuto „Křivka“. To znamená, že se nám na obrazovce zobrazuje časová křivka signálu. Pokud chceme vidět, jak vypadá průběh frekvencí v čase je zapotřebí zaškrtnout spektrum (Obr. 56).

Bílá barva označuje frekvence, které jsou v daném čase nejintenzivnější. Další barvy označují menší zastoupení sestupně červená, růžová, modrá a šedá barva říká, že se frekvence ve zvukovém záznamu nevyskytují. Z obrázku (Obr. 56) lze usuzovat, že ve vzorku zvuku se přibližně na 2kHz nachází frekvence, která je intenzivnější než všechny ostatní frekvence ve

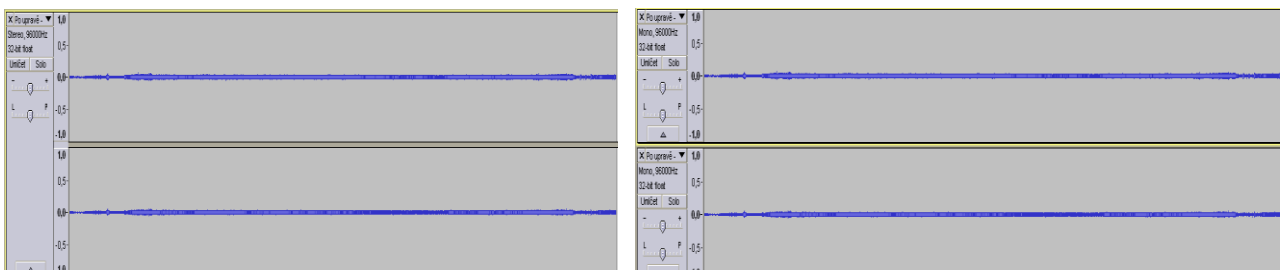
vzorku zvuku. Dále je vidět, že v pravidelných intervalech od této frekvence jsou další tóny. Je téměř jisté (dáno pravidelností rozestupu, který se rovná hodnotě prvního maxima v Hz), že jsou to vyšší harmonické frekvence této frekvence na 2kHz. Z toho lze usuzovat, že obrábění zde bylo nestabilní, protože vyšší harmonické tóny mají do 20kHz velkou intenzitu. Podle zbarvení tohoto spektra lze říci, že se nestabilita postupně utlumovala. To lze usuzovat s postupného utlumování vyšších harmonických frekvencí. Je také možné pozorovat, že se vyšší harmonické frekvence skoro úplně utlumí a objeví se znovu až kolem 40kHz, kde začne opět vzrůstat jejich intenzita.



Obr. 56 Frekvenční analýza v čase

7.8.2 Rozdělení stereo záznamu na dva mono záznamy

Pokud při nahrávání AE, budeme používat přístroj, který pořizuje stereo záznam, je možné tento záznam rozdělit na jednotlivé stopy. Hlavním důvodem je, že u stereo záznamu nemůžeme analyzovat jednotlivé stopy odděleně. Je pravděpodobné, že oba kanály budou mít stejnou vypovídající hodnotu, pokud nejsou nějak speciálně umístěné v prostoru. Opět rozbalíme možnosti stopy (Obr. 56) a zaškrtneme „Split Stereo to Mono“. Tím získáme ze stereo záznamu dvě stopy, které lze analyzovat nezávisle na sobě (Obr. 57).



Obr. 57 Rozdělení stereo záznamu

8 Závěr

Tato práce potvrdila, že analýza frekvenční charakteristiky může být použita pro pozorování stability obrábění a doplnit tak již existující způsoby sledování stability. Je pravděpodobné, že by tuto metodu kontroly stability procesu obrábění, bylo možné s úspěchem použít tam, kde jsou ostatní metody kontroly stability těžko aplikovatelné.

V této práci bylo dosaženo několika skutečností, z nichž podstatné jsou: Byly sestaveny zásady jak získávat a vyhodnocovat vzorky akustické emise s ohledem na kontrolu stability řezného procesu. Byla nalezena hranice stability. Pokud se ve frekvenční charakteristice určitého vzorku akustické emise objeví tón, který svou intenzitou převyšuje své okolí o osm až deset decibel, můžeme toto obrábění označit, že je na mezi stability. Další zajímavé skutečnosti nabyté v této práci jsou: Možnost odhadu řezných sil a výkonů, výskyt vyšších harmonických frekvencí, možnost odstranění ruchů, které znečišťují akustickou emisi obrábění.

Dále je z výsledků této práce patrné, že kontrola stability procesu obrábění pomocí frekvenční analýzy jeho akustické emise, může být cenově dostupnou metodou. Nejsou zapotřebí žádné nástroje, které by dnes nebyly zcela běžně k dostání. I když H4 ZOOM je přístroj za několik tisíc korun a mikrofon Yoga EM-070 přístroj za několik stovek korun, byla kvalita záznamu AE pro účely této práce srovnatelná z obou těchto zařízení. Další předností této metody je její jednoduchost. Charakteristiky, které určují nestabilitu procesu obrábění, jsou ve frekvenční charakteristice určitého vzorku AE ve většině případů dobře viditelné.

Další poznatky z této práce vedou k závěru, že je zapotřebí získat další zvukové vzorky z různých režimů obrábění pro různé materiály. Jde hlavně o vzorky, kde by během obrábění docházelo k postupnému opotřebení nástroje a ztrátě stability. Na těchto vzorcích by bylo zapotřebí ověřit výsledky této práce, případně provést další výzkum. Některé doporučené směry, kterými se lze v budoucnu může výzkum ubírat, jsou zmíněné v této práci.

Kontrola procesu obrábění pomocí analýzy frekvenční charakteristiky, je na katedře obrábění západočeské univerzity teprve na začátku. Přesto lze z dosavadních výzkumů říci, že by tato metoda mohla být používána pro kontrolu procesu obrábění a stavu obráběcích nástrojů. Nemuselo by se jednat jen o kontrolu stability obrábění, ale i například o kontrolu opotřebení nástroje a diagnostiku stroje. Je pravděpodobné, že by bylo možné, aby analýzu frekvenční analýzu prováděl stroj a nevyžadovala tak přítomnost člověka. Tento proces by, ale vyžadoval spolupráci vyhodnocovacího zařízení s řídicím systémem stroje. Není vyloučeno, že k těmto účelům by bylo zapotřebí zaznamenávat nějaké další charakteristiky procesu obrábění.

Protože nebyla nalezena publikace, v níž by bylo pojednáváno o frekvenční analýze akustické emise, která vzniká při obrábění, nebylo možné provést srovnání závěrů této práce s prací jinou. Přesto lze porovnat výsledky, které nesouvisí přímo se zásadami při vyhodnocování akustické emise, ale spíše měřením její intenzity.

V knižní publikaci [1] se zmiňuje „obtížná aplikace výsledků v relativně klidných laboratorních podmínkách do značně těžších podmínek dílenských“. K tomuto závěru se dospělo i v této práci. Přesto bylo zjištěno, že vhodným umístěním mikrofonů, lze částečně eliminovat ruchy z okolí. I konstrukce dnešních strojů značně přispívá k tomu, aby ruchy z okolí byly potlačovány. Pracovní prostor obráběcích strojů je dnes většinou uzavřený ze všech stran tak, aby byl snížený hluk, kterým ovlivňuje své okolí obrábění. Zvuk obrábění je tak tlumený a v okolí stroje je větší klid, ale zároveň jsou částečně odstíněny ruchy okolí,

které by jinak pronikaly do pracovního prostoru stroje. To způsobí, že zvuk obrábění je intenzivnější než hluk okolí a ruch okolí nepůsobí ve vzorku AE velké problémy. Byla nalezena možnost, jak odfiltrvat ze signálu ruch okolí, za předpokladu, že máme k dispozici jeho vzorek. Tato možnost má však, jak už bylo uvedeno, své omezení.

Dále uvádí publikace [1], že problémem je malá reprodukovatelnost mezi jednotlivými výsledky jednotlivých pracovišť, měření AE je prováděno při obrábění tvarově nenáročných výrobků, pro malé spektrum materiálů. Ovšem bylo by zapotřebí do budoucna sestavit zásady vyhodnocování AE tak, aby výsledky z různých měření, bylo možné porovnávat s výsledky na jiných pracovištích. K těmto potřebám by bylo dobré založit síťové úložiště, které by umožňovalo přístup k informacím, jak měřit a k výsledkům, které byly nabyty při jednotlivých výzkumech. Dalo by se říci, že tato práce určité porovnání výsledků z jiných pracovišť umožňuje. Indikátory, které v této práci byly označeny důležitými pro nestabilitu, najde v použitých zvukových vzorcích každý.

Z výše popsaných závěrů lze udělat shrnutí, že bude zapotřebí pokračovat v dosavadních výzkumech, než bude moci analýza frekvenční charakteristiky zvukového signálu doplnit již existující metody pro kontrolu stability procesu obrábění. Tato práce přináší řadu postřehů, které mohou být použity v budoucnosti a mohou být ukazateli jakými směry se dále ubírat v analýze AE procesu obrábění.

9 Seznam použité literatury

Knižní publikace

- [1] Použití akustické emise ke sledování řezného nástroje, Doc. Ing. Jan Žižka, Csc.
- [2] Mluvíme s počítačem česky, Psutka V., Müller L., Matoušek J., Radová V.

Internetové stránky

- [3] <http://www.mmspektrum.com>
- [4] http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function
- [6] http://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace

Manuály, nápovědy a publikace

- [7] Manuál – Audacity
- [8] Bakalářská práce – Chvění při obrábění – principy vzniku, způsoby detekce, Lucie Wizovská
- [9] Bakalářská práce – Programové vybavení pro frekvenční analýzu zvukového signálu, Aleš Doležal
- [10] An intelligent AE sensor for the monitoring of finish machining proces, S.Dolinšek, J. Kopac, Z. J Viharos, L. Monostori

10 Seznam příloh

Přílohy na kompaktním disku (CD)

- Příloha 1: Technologické podmínky
- Příloha 2: Zvukové vzorky
- Příloha 3: Specifikace nástrojů a upínačů, opotřebení nástrojů
- Příloha 4: Polotvar
- Příloha 5: Síly, opotřebení, drsnost