

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Akademický rok 2012/2013

Olha ILYINYKH

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Porovnání dosavadních výzkumů v oblasti analýzy akustické emise při
obrábění

Autor: **Olha ILYINYKH**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří VYŠATA, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury. Současně souhlasím s tím, aby tato práce byla zpřístupněna v knihovně ZČU a používána ke studijním účelům v souladu s autorským právem.

V Plzni dne:

.....

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení ILYINYKH	Jméno Olha	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Strojírenská 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	Porovnání dosavadních výzkumů v oblasti analýzy akustické emise při obrábění		

FAKULT A	STROJNÍ	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
--------------------	---------	----------------	-----	------------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	30	TEXTOVÁ ČÁST	16	GRAFICKÁ ČÁST	14
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce stručně shrnuje světový výzkum v oblasti snímání akustické emise (AE) při obrábění. První polovina práce je zaměřena na vysvětlení, jak se generuje AE v řezných procesech na klasifikace AE signálu a korekce tohoto signálu. Kromě toho obsahuje také některé z nejdůležitějších světových výzkumů zabývajících se AE při obrábění. Druhá část práce představuje různé metody zpracování signálu a příklady jejich aplikovatelnosti při frézování a soustružení.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Akustická emise, monitorování procesu obrábění, zpracování signálu

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname ILYINYKH	Name Olha	
FIELD OF TUDY	2301R016 „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 when not applicable
TITLE OF THE WORK	Comparison of current reserches in the area of analysis of acoustic emission in machining		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALY	30	TEXT PART	16	GRAPHICAL PART	14
---------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Bachelor thesis summarizes briefly the world's research on the sensing acoustic emission (AE) during machining. The first half is focused on explanation how the AE are generated in the cutting process, classification of AE signal and the correction of the signal. It also provides some of the most important world's studies on the AE in machining. The second part presents different methods of signal processing and examples of their applicability in milling and turning.
KEY WORDS	Acoustic emission, monitoring of the machining process, signal processing

Poděkování

Za odbornou pomoc při zpracování předkládané práce chci na tomto místě poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D.

Obsah

1	Úvod	2
2	Smysl a podstata práce	3
2.1	Základní princip	3
2.1.1	AE signály v procesu obrábění	3
2.1.2	AE zdroj signálu	4
2.1.3	AE signály	5
	Obr. 2-3 a) Impulzní AE signál b) Kontinuální AE signál [1]	6
2.1.4	Snímače AE signálu	6
2.1.5	Úprava AE signálu	8
3	Přehled dostupných prací o akustických emisích při obrábění.....	9
3.1	Studie využívající kontinuální a diskrétní transformace.....	9
3.2	Studie využívající statistických metod analýzy	9
3.3	Jiné studie	9
4	Analýza a porovnání metod AE.....	11
4.1	Kontinuální transformace.....	12
4.1.1	Fourierova transformace.....	12
4.1.2	Gaborova transformace.....	13
4.1.3	Vlnková transformace.....	13
4.2	Diskrétní transformace.....	13
4.3	Statistická analýza.....	13
4.3.1	Amplitudo-distribuční způsob	13
4.3.2	Entropicko-distanční způsob	13
4.4	Další metody	13
4.4.1	Group Method of Data Handling (GMDH).....	14
4.4.2	Fuzzy c-mens shlukování	14
4.4.3	Neuronové sítě.....	15
5	Porovnání aplikovatelnosti metod jednotlivých prací	16
5.1	Průmyslový význam	26
6	Závěr.....	27

1 Úvod

Akustická emise (AE) je zvuková vlna, nebo přesněji rázová vlna, která prochází materiálem v důsledku nějakého náhlého uvolnění deformační energie.

V posledních letech AE přístroje a systémy byly vyvinuty pro monitorování a nedestruktivní zkoušení strukturální integrity a celkově kvality v různých materiálech, výrobních postupech, a některých důležitých zařízeních. Aplikace AE pro nedestruktivní testování se nacházejí v mnoha průmyslových odvětvích včetně rafinerií, potrubních vedení, výroby elektrické energie (jaderné nebo jiné), letadel, ropné plošiny, papíren a staveb (mosty, jeřáby, atd.). AE se rovněž používají pro kontrolu kvality ve výrobních operacích a ve výzkumných aplikacích a má důležité uplatnění u kompozitních struktur jako jsou skleněné vlákno, vyztužené plasty a pokročilé materiály pro letectví.

Opotřebením nástroje je komplexní jev, který se vyskytuje v procesu obrábění kovu. Obecně platí, že opotřebením nástroje nepříznivě ovlivňují povrchovou úpravu obrobku, a proto je potřeba vyvinout systém pro sledování stavu opotřebením, který upozorní obsluhu na stav nástroje, čímž se zabrání nežádoucím důsledkům.

V minulosti byly navrženy různé metody pro monitorování opotřebením nástroje, i když žádná z těchto metod nebyla všeobecně úspěšná kvůli složitosti obráběcích procesů. Tyto metody byly zařazeny do přímých (optické, radioaktivní a elektrický odpor, atd.) a nepřímých (AE, řezné síly, vibrace, atd.) snímacích metod podle použitých senzorů.

Nedávné pokusy se zaměřily na vývoj metod, které sledují řezné procesy nepřímo. Mezi těmito nepřímými metodami je AE jednou z nejvíce účinných pro sledování opotřebením nástroje.

Hlavní výhodou použití AE pro monitorování stavu nástroje je to, že frekvenční rozsah signálu AE je mnohem vyšší než u vibrační stroje a šumu v prostředí.

Grabec a Leskovar [1] jsou první, kteří analyzovali zvuk emitovaný při obrábění hliníkové slitiny, a zjistili, že spektrum slyšitelných frekvencí je diskrétní, zatímco u ultrazvukového rozsahu (později známý jako AE) je spojitý. Studovali vliv příslušných řezných parametrů na spektrální rozložení a zabývali se vysvětlením příslušného účinku. Nejdůležitější je poukázat na to, že AE by se mohla využít k vyhodnocení ostrosti řezného nástroje.

Použití signálu AE při sledování stavu opotřebením nástrojů v provozním procesu bylo zahájeno Iwatem a Moriwakim [2]. Ti vyslovili dva klíčové závěry: výkonové spektrum signálu AE do 350 kHz se zvyšuje při opotřebením nástroje a celkově, že AE je úzce spjata s opotřebením nástroje.

Od těchto prvních zpráv četné studie prokázaly účinnost AE pro sledování stavu nástroje a procesu řezání.

2 Smysl a podstata práce

Hlavním cílem mé bakalářské práce je představit nejvýznamnější světové studie, které se zabývají problematikou akustické emise při obrábění.

Jako další cíl jsem si vytyčila představení a popis metod, které se používají ke zpracovávání AE signálu.

V neposlední řadě se také ve své bakalářské práci zaměřuji na poukázání příkladů AE, které se uplatňují a používají v praktické oblasti obráběcího procesu.

2.1 Základní princip

Celý výzkum v oblasti AE je založen na skutečnostech a znalostech faktů, které vyplývají z několika základních principů. Je zapotřebí vůbec porozumět chování AE signálů v procesu obrábění a je potřeba pochopit zdroj signálů jako pružný dynamický objekt. Je také potřeba porozumět způsobu sejmutí a zpracování signálu. A samozřejmě porozumět signálu samotnému.

2.1.1 AE signály v procesu obrábění

Obrábění je zapotřebí v různých řezných operacích, a to buď na etapě hrubování a nebo při přesném obrábění obrobku. Tyto procesy jsou spojené s deformací řezného nástroje a obrobku, což je způsobeno řeznou silou, tepelnými účinky a vibracemi. Největší problém pozorujeme při obrábění tvrdých materiálů jako Inconel a titan.

Optimální výkon těchto složitých procesů závisí na dostupnosti dat o procesu a podmínkách obrábění pro umožnění sledování procesu a zpětnou vazbu k řízení procesu.

Pro sledování procesů obrábění jsou vyžadovány spolehlivé snímací systémy spojené s robustními technikami pro zpracování signálu a získávání užitečné informace z procesu obrábění. Toto je zvláště vhodné v případě přesného obrábění, kde jsou požadovány velmi přísné tolerance.

Na základě takových dynamických řezných podmínek je velmi obtížné předvídat chování strojů při obrábění. Proto monitorovací systém musí identifikovat skutečné řezné podmínky v průběhu výrobního procesu prostřednictvím snímačů.

Na základě získané informace ze snímačů musí adaptivní řídicí systém zvládat široké spektrum úprav obráběcího procesu od jednoduchého zastavení obrábění po pokročilou kontrolu.

Akustická informace byla spojena se stavem řezného nástroje již v minulosti. Zkušený obráběč může detekovat změnu řezných podmínek nebo změnu stavu nástroje dle slyšitelného zvuku, který vzniká při procesu.

V kovoobráběcích procesech vzniká akustická emise (AE) především v důsledku plasticko-mechanických procesů při vzniku trhlin, odvodu třísek a od povrchového tření. Opotřebením nástroje mění kontaktní plochy mezi nástrojem a obrobkem, a tím i intenzitu AE. Pokud dojde k opotřebením nebo katastrofickému selhání nástroje, signál AE se při řezání mění nebo v případě lomu nástroje vykazuje dramatické vrcholy z energie uvolňované při přetržení.

Obvykle AE RMS energie je studována pro detekci opotřebením nástroje. Někdy je varování zlomení nástroje dáno mikrotrhlinami v nástroji, které způsobují AE signály. Toto může být využito pro kvalitní monitorování opotřebením nástroje nebo řízení procesů.

Byl sledován [6] i RMS signál akustické emise (z anglického Root Mean Square). Tento parametr označuje tzv. efektivní hodnotu signálu. U střídavého napětí je RMS rovno hodnotě stejnosměrného napětí, které by při přiložení na odporovou zátěž dávalo stejný průměrný výkon. Jednotkou RMS je mV. Tato hodnota odpovídá kvantitativní charakteristice naměřených událostí akustické emise (množství energie).

2.1.2 AE zdroj signálu

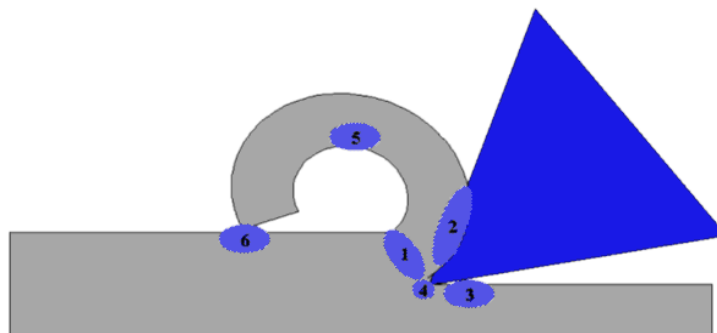
V mnoha výrobních procesech se při obrábění materiálů a opotřebením nástrojů generují vysokofrekvenční akustické emise (AE). Použití akustické emise pro kontrolu procesu má potenciál pro zajištění vysoké kvality výrobků a zároveň minimalizace celkových nákladů na výrobek.

Procesy, jako jsou řezání, broušení, tvarování a spojování, generují akustické emise z unikátních důvodů specifických pro každý proces. V mnoha případech mohou být emise monitorování použity pro charakteristiku procesu, detekci a zjištění vad nebo procesních odchylek v místě obrábění.

Výzkum ukázal, že AE, které se vztahují k napět'ovým vlnám, jenž vznikají náhlým uvolněním energie v deformovaném materiálu, se úspěšně používají při laboratorních testech pro detekci opotřebením a zlomení nástrojů. Zdroj [2] uvádí, že Dornfeld (1989) poukázal na následující možné zdroje AE během kovoobráběcího procesu (viz obr. 2-1)

Hlavní zdroje napět'ových vln AE spojených s tvořením třísky:

1. Primární smyková oblast, kde dochází k prvnímu stříhání během tvorby třísky;
2. Zóna sekundární deformace je podél úhlu čela na rozhraní tříska – nástroj, kde dojde opotřebením ve tvaru žlábků;
3. Terciární smyková zóna opotřebením hřbetu třením;
4. Nárůst trhliny v místě kontaktu nástroj – obrobek;
5. Plastická deformace třísky;
6. Kolize tříska – nástroj.



Obr. 2-1 Zdroje AE při obrábění [1]

Při frézování kvůli přerušovanému řezu se řadí další zdroje:

- Rázová vlna generovaná při vstupu nástroje;
- Náhle zlomení třísky při výstupu nástroje.

V obou případech jsou rychlost nástroje a míra odstranění kovu významnými parametry ovlivňující energie AE signálu.

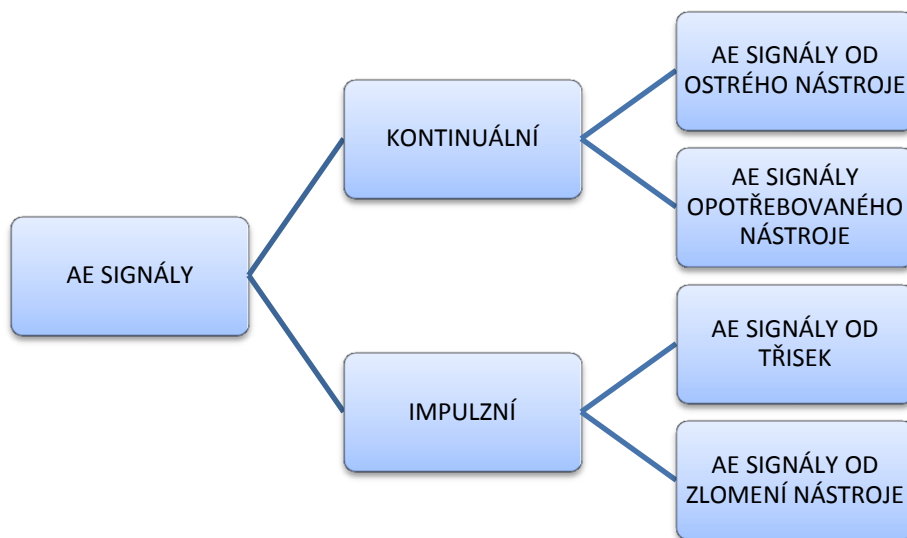
Vzhledem k interakci geometrie nástroj – obrobek se vyskytly další variace vytvoření AE vyplývající zejména z tloušťky třísky a změny rychlosti nástrojů, protože nástroj rotuje v materiálu obrobku.

2.1.3 AE signály

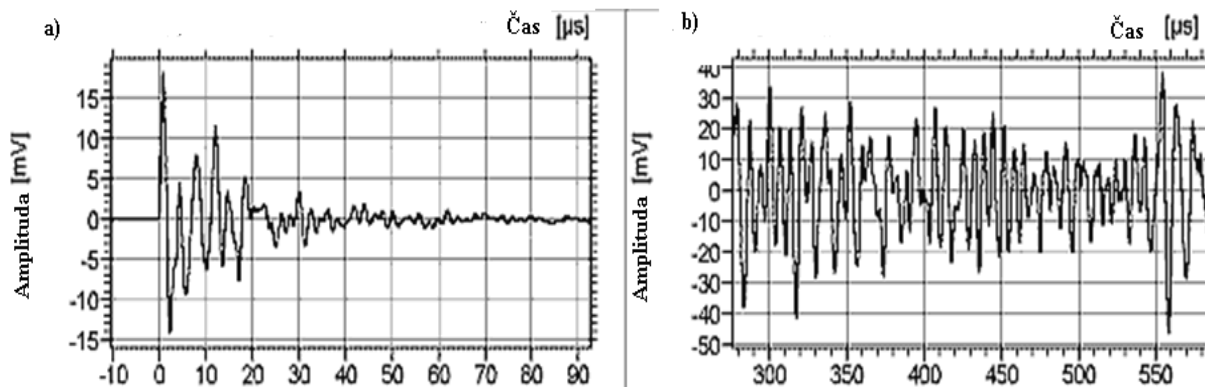
Na základě analýzy zdrojů signálu se AE dělí na kontinuální a impulzní signály, které mají výrazně odlišné charakteristiky (viz obr. 2-2).

Kontinuální signály jsou spojeny se stříhem v primární zóně a opotřebením plochy čela a hřbetu nástroje, zatímco impulzní nebo přechodné signály jsou pozorovány během růstu trhliny v materiálu, nárazu a zlomení třísky nebo nástroje.

Proto [2] se z 1. až 3. zdroje generují kontinuální AE signály, zatímco ze 4. až 5. se vytvářejí přechodné AE signály (viz Obr. 2-1).



Obr. 2-2 Rozdělení AE signálu



Obr. 2-3 a) Impulzní AE signál b) Kontinuální AE signál [1]

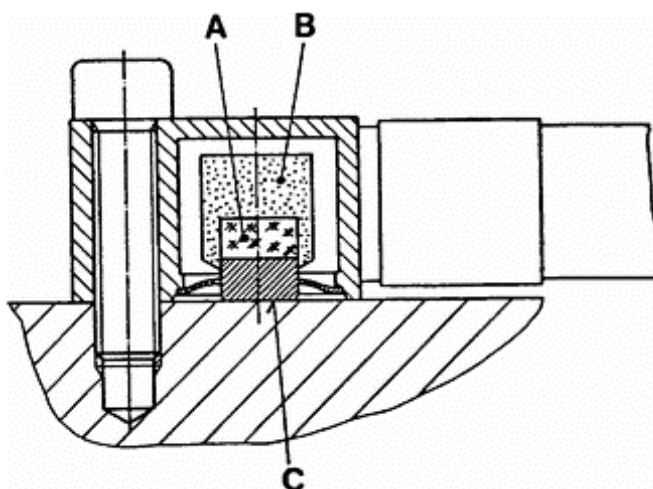
2.1.4 Snímače AE signálu

Základem úspěšného monitorovacího systému je správný výběr snímačů. Široká škála snímačů byla použita k monitorování procesu obrábění. Snímače akustické emise jsou používány na testování povrchu objektu pro zjištění dynamiky pohybu vyplývajícího z AE události a převedení zjištěného pohybu do napětí – časového signálu. Tento napěťový signál je používán pro všechny následující kroky v AE metodě.

Elektrický signál je silně ovlivněn vlastnostmi snímače a vzhledem k tomu, že výsledky testu, získané zpracováním signálu, jsou silně ovlivněné elektrickým signálem, typ senzoru a jeho vlastnosti jsou důležité pro úspěch a opakovatelnost zkoušení AE.

Široká škála základních transdukčních mechanismů, kapacitní snímače, senzory nebo dokonce i laserové interferometry mohou být použity k detekci akustické emise. Avšak zjištění AE se běžně provádí pomocí senzorů, které využívají piezoelektrické prvky pro transdukcii.

Prvkem je obvykle speciální keramika jako zirkoničitan - titaničitanu olova (PZT) (viz obr. 2-4) a je akusticky spojen s povrchem zkušebního bodu tak, aby dynamická plocha pohybu se šířila do piezoelektrického elementu. Dynamické napětí vytváří v prvku napěťový - časový výstupní signál snímače.



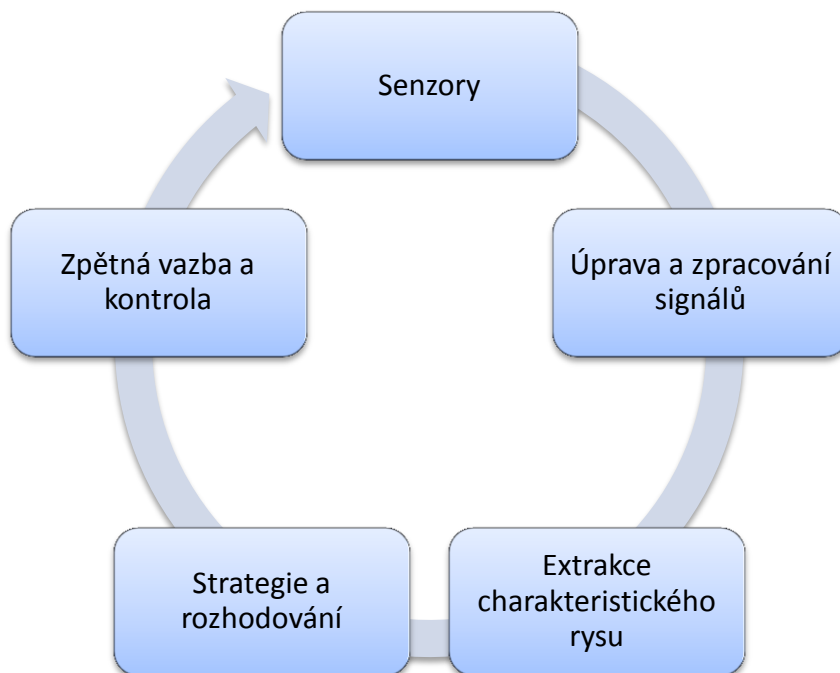
Obr. 2-4 Typický snímač AE signálu. A-piezoelektrický element, B-podpora, C-membrána [2]

Snímání AE je většinou založeno na zpracování signálů s frekvencí v rozmezí od 30kHz do 1MHz. V některých zvláštních aplikacích probíhala detekce AE při frekvenci pod 20kHz. Pro usnadnění přenosu zvukových vln mezi senzorem a testovaným materiálem často používají koplant (netoxické gely, pasty nebo kapaliny).

Senzory pro sledování procesu musí splňovat následující požadavky:

- Největší možná blízkost měřeného bodu k bodu obrábění
- Žádné snížení statické a dynamické tuhosti obráběcího stroje
- Žádné omezení pracovního prostoru a řezných parametrů
- Bez opotřebení a údržby, snadná výměna, nízké náklady
- Odolnost vůči chladicí kapalině, nečistotě, třísce, mechanickým, elektromagnetickým a tepelným vlivům
- Funkcionálně nezávisle na nástroji nebo obrobku
- Odpovídající metrologické charakteristiky
- Spolehlivý přenos signálů

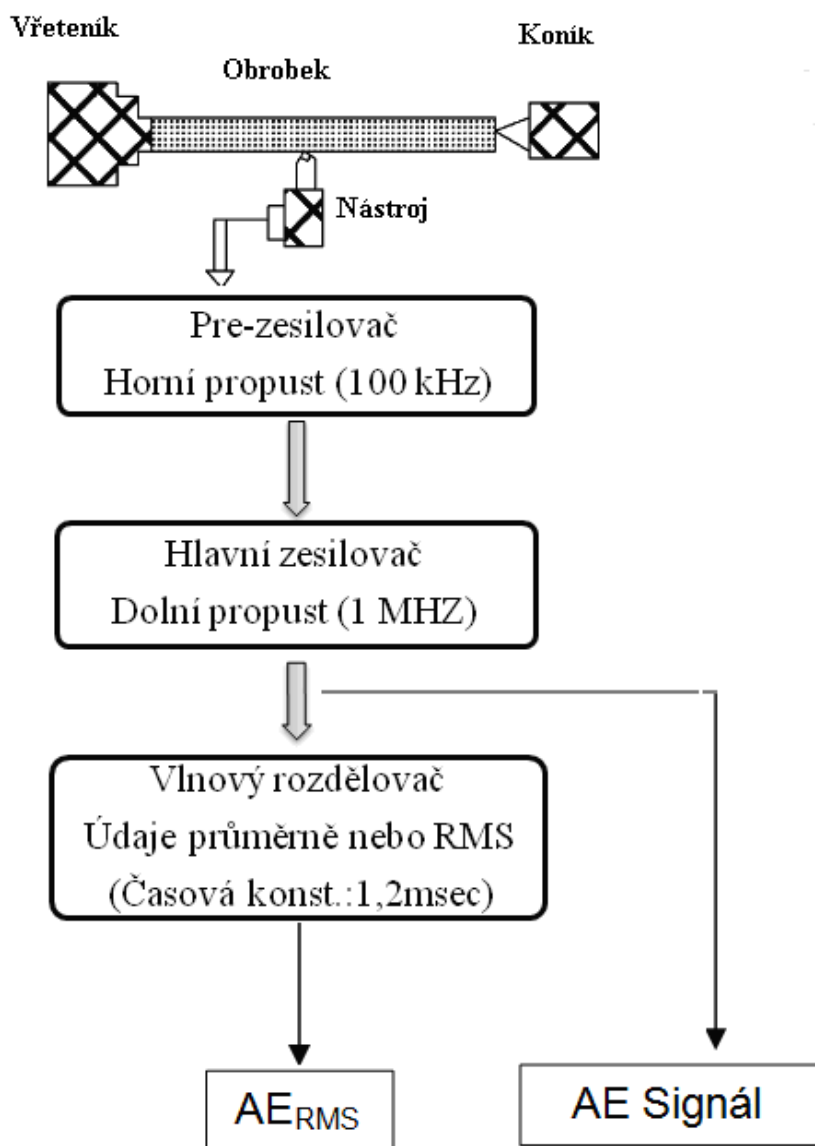
Obrázek 5. znázorňuje všechny komponenty, které jsou nezbytné pro monitorování a kontrolu stroje.



Obr. 2-5 Složky monitorovacího a ovládacího systému

2.1.5 Úprava AE signálu

Xiaoli Li [2] ve svém článku pod názvem: Metody Akustické emise pro sledování opotřebení nástroje při soustružení, představuje, jak může být upraven signál pro další zpracování. Na začátku musíme získat AE signál z řezacího systému obr.2-6. Piezoelektrický AE senzor je připojen ke straně stopky nástrojů. Signál AE původně 40dB je pře-zesílen a filtrován pásmovou propustí. Pásmový filtr v rozsahu 100 kHz-1 MHz je použit ke snížení vlivu nízkofrekvenčního šumu, a pak je signál plně usměrněn s průměrnou časovou konstantou 1,2 ms. AE RMS výstupní napětí je sejmuto počítačem na 2,5 kHz.



Obr. 2-6 Úprava AE signálu a předzpracování [2]

3 Přehled dostupných prací o akustických emisích při obrábění

V článcích [1,2] je představen přehled dostupných prací o akustické emise při obrábění z různých vědeckých ústavů a univerzit. Z těchto článků se čerpá i v této práci.

3.1 Studie využívající kontinuální a diskrétní transformace

Kamarthi a jeho spolupracovníci použili reprezentace vlnového signálu AE na studium opotřebení hřbetu. Získaná přesnost byla vhodná k ukázce, že vlnková transformace je velmi účinná při získávání AE funkce a také citlivá na postupně rostoucí opotřebení hřbetu.

Li ukázal, že vlnová transformace může být použita k rozkladu AE signálu do různých frekvenčních pásem v časové oblasti. AE_{RMS} hodnoty získané rozkladem signálu pro každé frekvenční pásmo se dá použít jako monitorovací funkce pro opotřebení nástrojů.

Li navíc v reálném čase před zlomením nástroje představil detekční metodu pro malé průměry vrtáků za použití AE a proudového signálu. Funkce zlomení nástroje byly získány ze signálu AE pomocí spojitě a diskrétní vlnové transformace.

XiaoQi ve své práci analyzoval signál AE zjištěný během frézování pomocí vlnové transformace a krátkodobé Fourierové transformace s cílem vyvinout vnitroprocesní obráběcí monitorovací systém.

Chen a jeho tým vyvinuli zpracování signálu využitím vlnkové transformace k identifikaci možného dominantního řezného mechanismu pro daný řezný stav.

3.2 Studie využívající statistických metod analýzy

Penalva a Fernandez studovali opotřebení a drsnost povrchu nástroje pomocí statistických metod. Dokázali vyjmenovat několik přímých vztahů mezi signálem AE_{RMS} a opotřebením nástroje, jako jsou vznik žlábků, trhlin a plastické deformace břitu nástroje.

Emel a Kannatey – Asibu vyvinuli lineární diskriminační funkce na základě postupu (metody) pro detekci opotřebení nástroje, lomu nástroje nebo události o třískové poruše pomocí spektra AE signálu.

Jemielniak a Otman představili metodu založenou na koeficientu špičatosti a parametrech r a s s předpokládaným β rozdělením AE_{RMS} signálu pro detekci katastrofického zlomení nástrojů.

Sušič a Grabec navrhli teorii statistického odhadu založenou na neparametrické regrese pro AE zpracování a samoorganizující se neuronové sítě pro popis povrchu a charakteristiku procesů.

Penalva i Fernandez studovali drsnost povrchu aplikováním statistických metod na signály zjištěné AE senzory.

Tolosa a Fernandez zkoumali rozptřičenost třísky srovnáním mezi signálem simulovaným pomocí osobního počítače a signálem získaným z AE snímače.

3.3 Jiné studie

Group Method of Data Handling (GMDH) metoda byla použita pro pochopení a předpověď stavu opotřebení nástrojů při soustružení s využitím signálu akustické emise a řezné síly.

Li X a Yuan Z.[8] pomocí vlnkové transformace a fuzzy ISODATA algoritmu vyšetřovali stav opotřebení nástroje v závislosti na řezných podmínkách při vrtání.

Předchozí autoři také používali fuzzy neuronovou síť k popisu vztahu mezi sledovanými parametry, které byly odvozeny z vlnky na bázi AE signálů a stavu opotřebení nástroje.

Teti uvádí zajímavou práci o opotřebení nástroje, zatímco jiné laboratoře analyzují stejné AE signály pomocí různých metod zpracování. Kromě toho je Teti autorem i další příslušné studie o rozvoji vnitroprocesního sledování řezných podmínek a opotřebení nástroje pomocí AE.

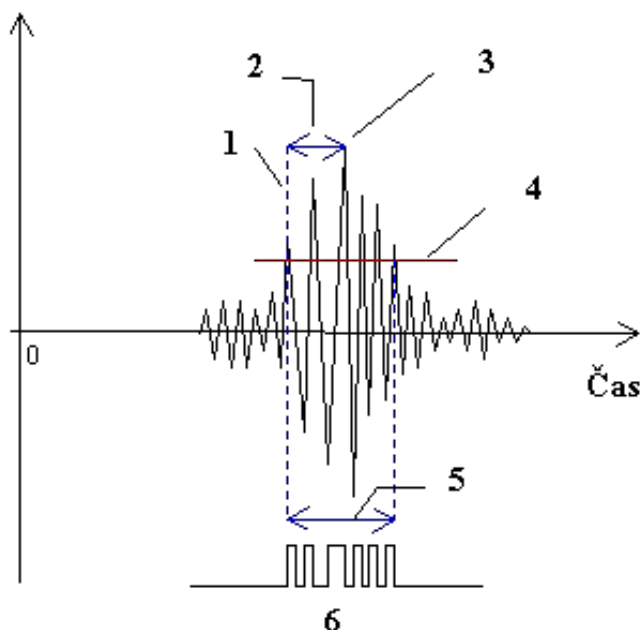
4 Analýza a porovnání metod AE

Signály zvukové emise jsou zvukové vlny generované v pevných médiích, které se podobně jako zvukové vlny šíří vzduchem a ostatními kapalinami, ale jsou komplikovanější. Signál je ovlivněn vlastnostmi zdroje, cestou ze zdroje do senzoru, vlastnostmi senzoru a měřicím systémem. Obecně jsou AE signály složité a jejich využití k charakteristice zdroje může být obtížné.

Data se získávají pomocí postupů v rozmezí od jednoduchého průběhu měření parametru až k přístupu umělé inteligence (rozpoznávání). Jednoduchá měření byla často dostačující pro jednoduché testy. Umělé inteligence mohou být vyžadovány pro on-line sledování komplexních systémů.

Interpretace signálů generovaných v průběhu procesu často vyžaduje pokročilé zpracování signálu.

Cílem zpracování AE signálu je nalezení a charakterizace impulsů, jejich časové lokalizace, oscilační frekvence, amplitudy a fáze. Tato informace svědčí o náhlé emisi elastické energie vytvořené uvnitř materiálu. Extrakce takových fyzikálních parametrů ze signálů AE je jedním z nejčastějších problémů v jeho zpracování. To je způsobeno tím, že tyto signály jsou nestacionární a často obsahují překrývající přechody, jejichž průběhy a čas, kdy nastanou, jsou neznámé a zahrnují odchylky z hlediska času a frekvence. Často se takové události částečně překrývají v časovém rozsahu nebo jsou ohroženy šumem, tj. jsou rušeny sekundárními událostmi, které nejsou významné, ale ovlivňují jejich strukturu.



Obr. 4-1 Charakteristika impulzního signálu: 1. Signál překročil referenční hranici poprvé; 2. Doba náběhu; 3. Maximální amplituda; 4. Hranice amplitudy; 5. Doba trvání signálu; 6. Referenční počet

Referenční počet: počet, kolikrát amplituda signálu překročí hraniční čáru,

AE události: mikro-strukturální posun, který vede k vytváření pro-elastické vlny v materiálu při zatížení a stresu,

Doba náběhu: čas potřebný k dosažení maximální amplitudy od prvního překročení hranice signálem,

RMS napětí: napětí, které definuje intenzitu AE signálu.

K analýze signálů AE byly vyvinuty různé metody zpracování signálů. Ze zmíněných metod zpracování signálů jsou poté extrahovány parametry, které umožňují testování a monitorování obráběcích procesů. Některé z nich jsou prezentovány a diskutovány v následujících odstavcích[1,2].

Mezi základní způsoby zpracování AE signálů patří:

Kontinuální transformace

- Fourierova transformace,
- Gáborová transformace (nebo místní Fourierova transformace),
- Vlnková transformace,

Diskrétní transformace

Statistická analýza

- Amplitudo-distribuční způsob
- Entropicko-distanční způsob

4.1 Kontinuální transformace

4.1.1 Fourierova transformace

Fyzikální signál je často reprezentován funkcí, která závisí na čase $f(t)$, případně je vyjádřen frekvenční Fourierovou Transformací (FT) $F(\omega)$, neperiodický signál $f(t)$ může být v podstatě rozložen pomocí FT $F(\omega)$ takto:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt$$

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

kde t čas a ω úhlová frekvence, $e^{i\omega t}$ harmonické vlny.

Slouží pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční.

Je úspěšně použita ke zpracování signálu AE při obrábění. Experimentální výsledky ukázaly, že velikost AE ve frekvenční oblasti byla citlivá na změnu stavu nástroje. Nicméně, signál AE je v podstatě nestacionární.

Pokud počítáme frekvenční složení nestacionárního signálu pomocí Fourierovy transformace, výsledkem je jeho průměr po dobu trvání signálu. Z toho vyplývá, že Fourierova transformace dostatečně nepopisuje vlastnosti přechodného signálu s nižší frekvencí.

4.1.2 Gaborova transformace

Gaborova transformace nebo krátkodobá Fourierova transformace je nejznámější časově-frekvenční technika, která se aplikuje na zpracování složitých signálů AE. Obecně platí, že tato metoda se používá k řešení nestacionárních signálů. Nicméně, Gaborova transformace je špatně přizpůsobena signálům, kde se objevují vzory s různými měřítky, a to špatně řeší krátké časové jevy spojené s vysokými frekvencemi.

4.1.3 Vlnková transformace

Základní myšlenkou zpracování signálu z vlnky je, že signál musí být rozložen do jeho složek pomocí základních funkcí. V případě vlnkové analýzy, získáváme rozložením základní funkce jednodušší vlnkové funkce. Na rozdíl od Fourierovy analýzy jsou základními funkcemi sinusové nebo kosinusové vlny. Výsledkem vlnkové transformace je řada rozložených signálů, které se nacházejí na různých frekvenčních pásmech.

4.2 Diskrétní transformace

Předchozí transformace (Fourierova, Gaborova, Vlnková) patří ke kontinuálním integračním transformacím. Z pohledu výpočtu jsou tyto metody poměrně náročné. Integrační výpočty mohou být ve své podstatě aproximované pomocí příslušných řad diskretních sítí.

4.3 Statistická analýza

4.3.1 Amplitudo-distribuční způsob

Amplitudo-distribuční metoda je založena Kannatey-Asibu a Dornfeldem. Touto metodou se snažíme rozpoznat rozdíly mezi signály. Rozlišují se dva základní údaje pro porovnání: rozsah rozdílů mezi signály a jejich tvar.

4.3.2 Entropicko-distanční způsob

Entropicko – distanční způsob je založen na porovnání získaného signálu se vzorkem signálu použitým jako referenční hodnota.

4.4 Další metody

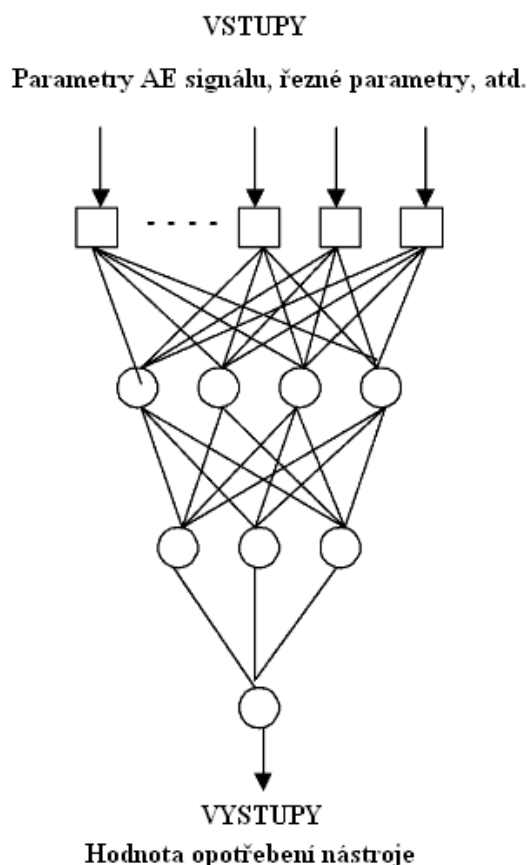
Pro účinné sledování různých podmínek opotřebení nástroje, byly ve studii [2] představené některé následující metodiky.

4.4.1 Group Method of Data Handling (GMDH)

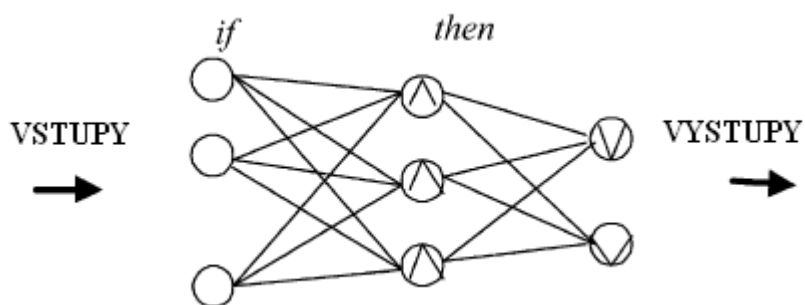
GMDH [5] je vrstevnatá neuronová síť s několika vstupy a jedním výstupem. Byl vyvinut v roce 1960 Ivaknenkem. Idea sítě GMDH je nalezení takové funkce neuronové sítě, která bude co nejlépe odpovídat naučené předloze. Předpovězená hodnota výstupu neuronové sítě pak bude co nejvíce odpovídat reálné předloze. Používá se pro filtrování všech signálů, které mají nějakou společnou vlastnost, na kterou je možné síť naučit. Nejvhodnější je pro filtraci úzkopásmových a stacionárních signálů nebo rušení.

4.4.2 Fuzzy c-mens shlukování

Fuzzy c-means algoritmus je jedna z nejpoužívanějších metod fuzzy klasifikace. Při této metodě je cílem shlukování stanovení centra shluku, které je reprezentováno hodnotami prvků odpovídajících klasifikovaným kategoriím. Jakmile jsou centra shluku stanovena ve fázi učení, pak se klasifikace provádí porovnáním příchozího vzoru s každým centrem shluku.



Obr. 4-2 Vícevrstvá neuronová síť [2]



Obr. 4-3 Fuzzy neuronová síť [2]

4.4.3 Neuronové sítě

Neuronové sítě jsou organizované vrstvami, kde se každá skládá z neuronů nebo zpracovávajícího prvku, které jsou vzájemně propojené. Existuje celá řada učebních metod pro trénování neuronových sítí, ale back-prop (v českém překladu termín Back-propagation znamená zpětné šíření) se ukázal jako nejpobulárnější školící mechanismus. Back-prop metoda funguje na základě měření rozdílu mezi výstupem a pozorovanou výstupní hodnotou. Hodnoty vypočtené na výstupní vrstvě zpětně přepočítává do předchozích vrstev (zpětně se šíří) a podle její hodnoty se upravují váhy. Obr. 4-2 znázorňuje typické vícevrstvé neuronové síť. Nicméně, neuronové sítě vyžadují dráhy školící mechanismus a po školení nezůstávají adaptivní.

Za účelem odstranění nedostatků neuronové sítě, je uveden hybridní model neuronové sítě a fuzzy logiky (fuzzy neuronové síť). Existuje mnoho možných kombinací obou systémů, typická Fuzzy neuronová síť je znázorněná na obr. 4-3.

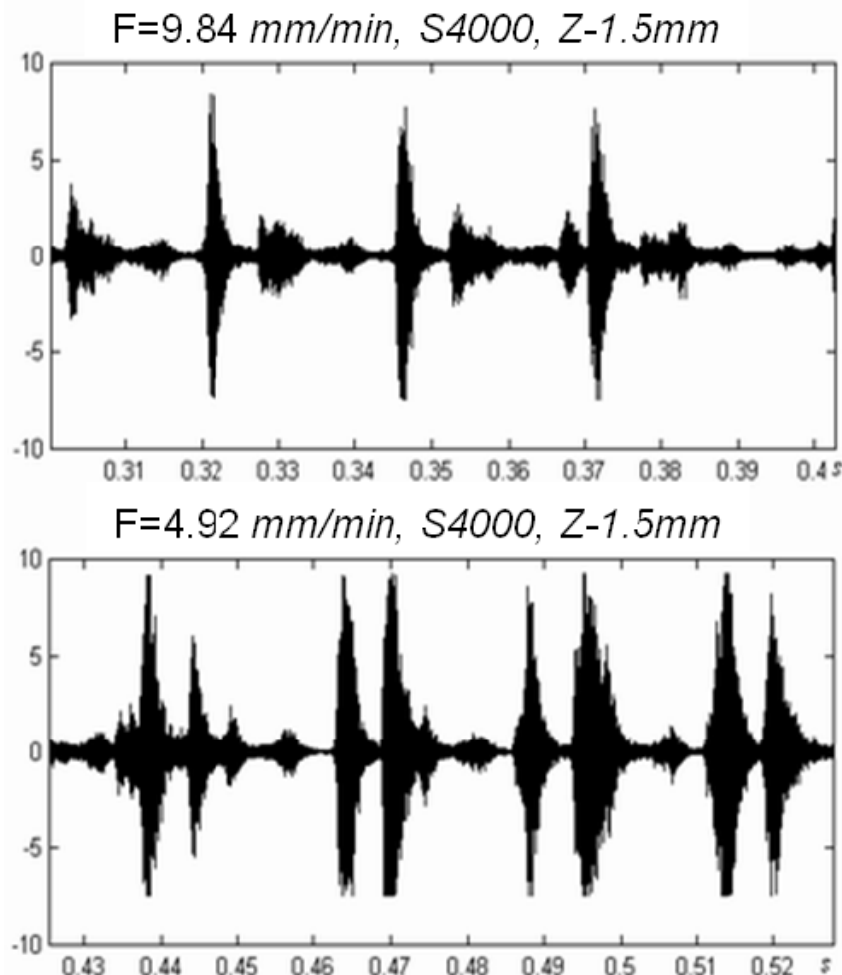
5 Porovnání aplikovatelnosti metod jednotlivých prací

Pro příklad aplikovatelnosti AE v procesu obrábění byly vybrány dvě studie.

První práce se zabývá závislostí AE signálu na řezných podmínkách (posuvu, otáčkách vřetena, hloubce řezu) při frézování. AE signál je zpracován pomocí Fourierovy, Gaborovy a vlnkové transformace.

Téma studie je: Vnitroprocesní monitorování nástroje pomocí Akustické emise, od autorů Dr. Chen QuaoQi, Zeng Hao a Dr. Dietmar Wildermuth [3], kteří prováděli různé pokusy na trojosé fréze pro získávání a analýzu AE signálu. Obrázek 5-1 ukazuje AE signály pro posuvy (F) o 9,84mm / min a respektive 4.92mm/min. Otáčky vřetena (S) činí 4000 ot/min, hloubka řezu (Z) byla zachována až na 1,5 mm.

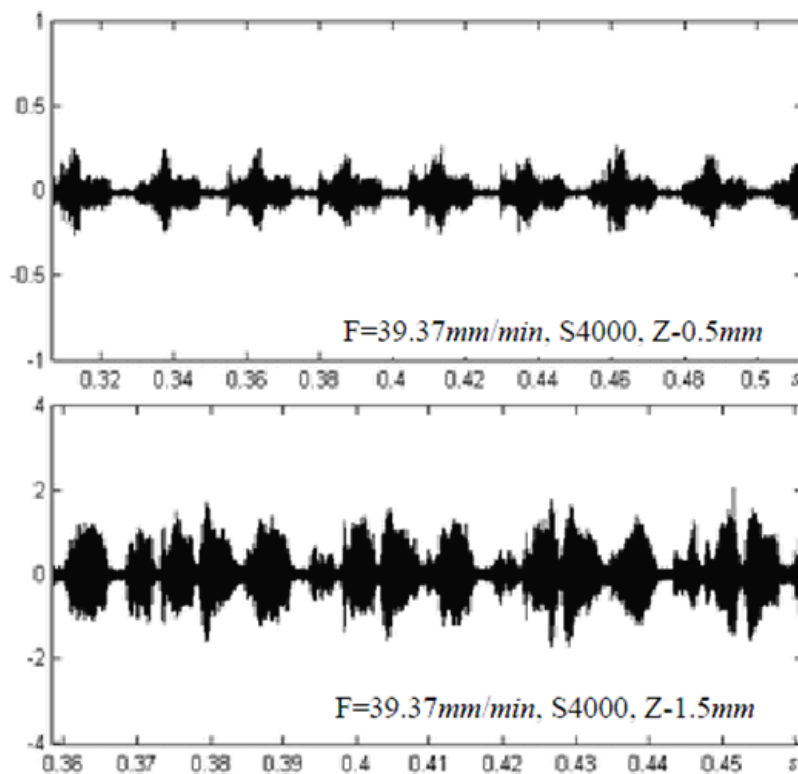
Ačkoliv jsou amplitudy signálu podobné, vrcholové funkce jsou velmi odlišné. Na vyšší rychlosti posuvu má každý cyklus (rotace) pouze jeden dominantní vrchol, zatímco s dolním posuvem má dvojitě zřetelné píky.



Obr. 5-1 AE signály s různým posuvem, kde
abscisa(s),ordináta(V) [1]

Obrázek 5-2 ukazuje vliv hloubky řezu na signál AE. Byly vybrány dvě řezné hloubky, 0,5 mm a 1,5 mm, přičemž posuv byl 39.37 mm/min a otáčky vřetena 4000 ot/min. Ukazuje se, že vyšší hloubka řezu má za následek vyšší AE amplitudu, tedy více AE energie.

Nicméně detailní stav nástroje nemůže být získán z výše uvedené jednoduché analýzy v časové oblasti.



Obr. 5-2 AE signály s různou hloubkou řezu,
abscisa(s),ordináta(V) [1]

Výše uvedená metodika byla použita k analýze AE signálu získaného za provozu frézy. Vezmeme-li signály na obrázku 5-2. jako příklad, dají se signály rozložit na 6 úrovní. Vzorkovací frekvence (f_s) je 800 kHz. Podle vlnkové metody rozkladu, získaný AE signál (400 kHz) se rozkládá v pěti frekvenčních pásmech takto:

D1: [200kHz, 400kHz]

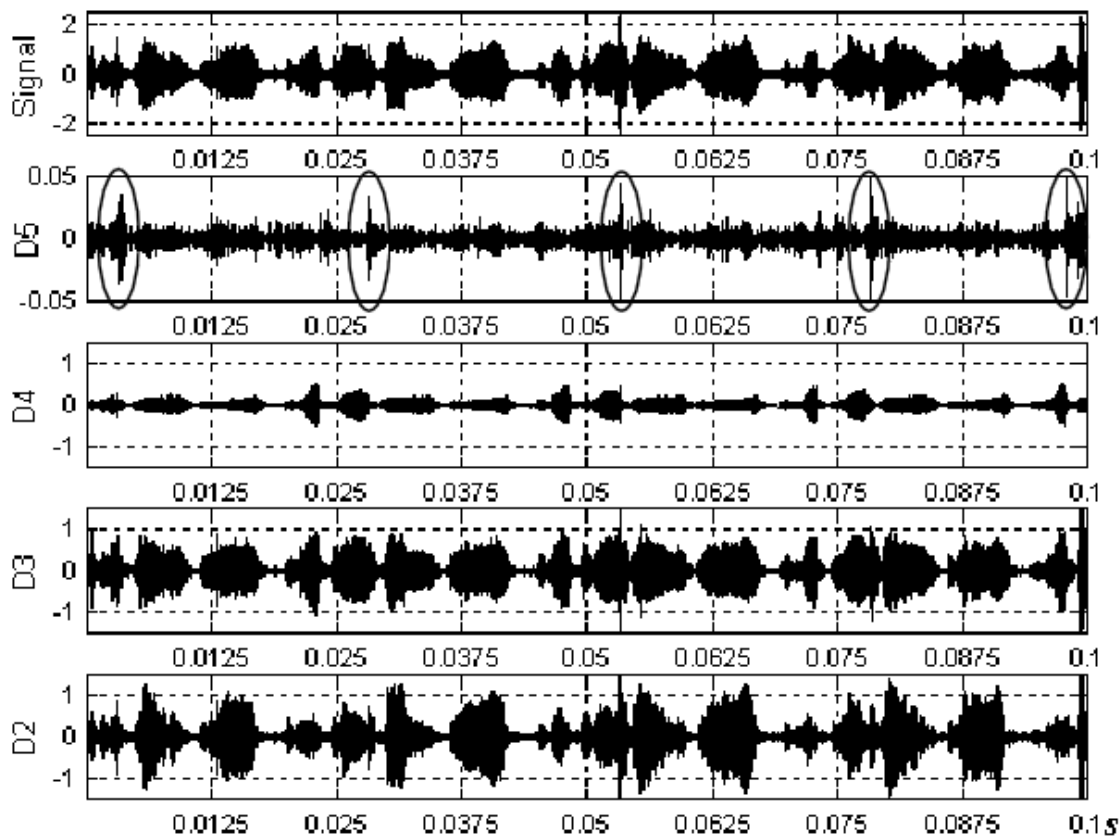
D2: [100kHz, 200kHz]

D3: [50kHz, 100kHz]

D4: [25kHz, 50kHz]

D5: [12.5kHz, 25kHz]

A5: [0, 12.5 kHz]



Obr. 5-3 Vlnková analýza AE signálu [1]

Bylo zjištěno, že energie signálu D1 je velmi mála, a proto je vynechána. Energie signálu v dalších čtyřech frekvenčních pásmech (D2 až D5) je znázorněna na obrázku 10.

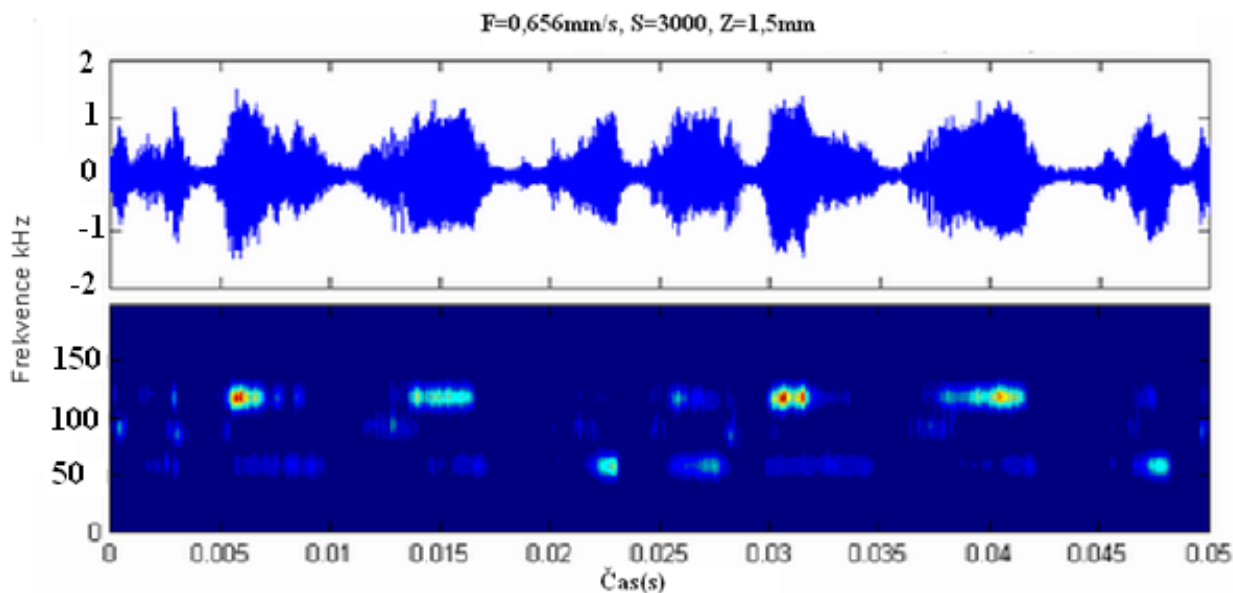
Z obrázku je patrné, že energie signálu je převážně rozdělena mezi D2 a D3, kde frekvenční rozsah je od 50kHz do 200kHz.

Funkce AE signálu, vztahující se ke stavu nástroje, mohou být extrahovány z tohoto frekvenčního pásma s Fourierovou transformací nebo jinou technikou zpracování signálu, protože signály v tomto pásmu jsou mnohem silnější než v jiných kmitočtových pásmech.

Ze stejného důvodu budou informace vztahující se ke stavu nástroje skryté a obtížně rozlišitelné, jestliže nepatří k tomuto frekvenčnímu pásmu.

Vzhledem k obrázku 5-3, i když energie D5:[12.5kHz, 25kHz] je velmi slabá, s pomocí vlnkové analýzy můžeme stále vidět, že existují vrcholy v D5, které ukazují, že jeden zub frézy může prasknout. Bez vlnkové analýzy je velmi těžké zjistit takové slabé vrcholy.

AE signály byly také analyzovány krátkodobou Fourierovou transformací (STFT) jako je znázorněno na obr. 5-4. Jas na obrázku označuje spektrální hustotu výkonu (PSD), vyšší jas odpovídá silnější PSD ve frekvenčním pásmu. Interakce mezi čtyřmi zuby frézy a materiálem může být jasně vidět kolem frekvence 150kHz. Stejně jako ve výše zmíněném případě je velmi těžké zjistit takové slabé vrcholy bez použití vlnkové analýzy.



Obr. 5-4 Krátkodobá Fourierova transformační analýza AE signálu [1]

Další studie [4] na téma: Monitorování poškození povrchu v těžkém obrábění pomocí Akustické emise. Autoři Guo a Ammula z univerzity v Alabamě používaly on-line AE monitorovací systém s cílem vyšetřit citlivost široké škály parametru AE včetně RMS, frekvence, amplitudy a četnosti impulsu při tvorbě bílé vrstvy (která vzniká na povrchu obrobku při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, což může mít negativní vliv na životnost součásti) příslušné struktury povrchu a opotřebení nástrojů.

Podmínky experimentu:

Řezný nástroj	kulaté destičky CBN
Pracovní materiál	AISI 52100 (62G1 HRC),
Řezné podmínky	<ul style="list-style-type: none"> • Řezná rychlost: 100 m / min, • posuv: 0,0508 mm / ot, hloubka řezu: 0,1 mm, • suché soustružení
Obráběcí stroj	CNC soustruh
AE senzor AE dosah signálu	20 - 200 kHz, zesílení předzesilovačem 40 dB

Výsledky experimentu:

AE signálu versus bílá vrstva

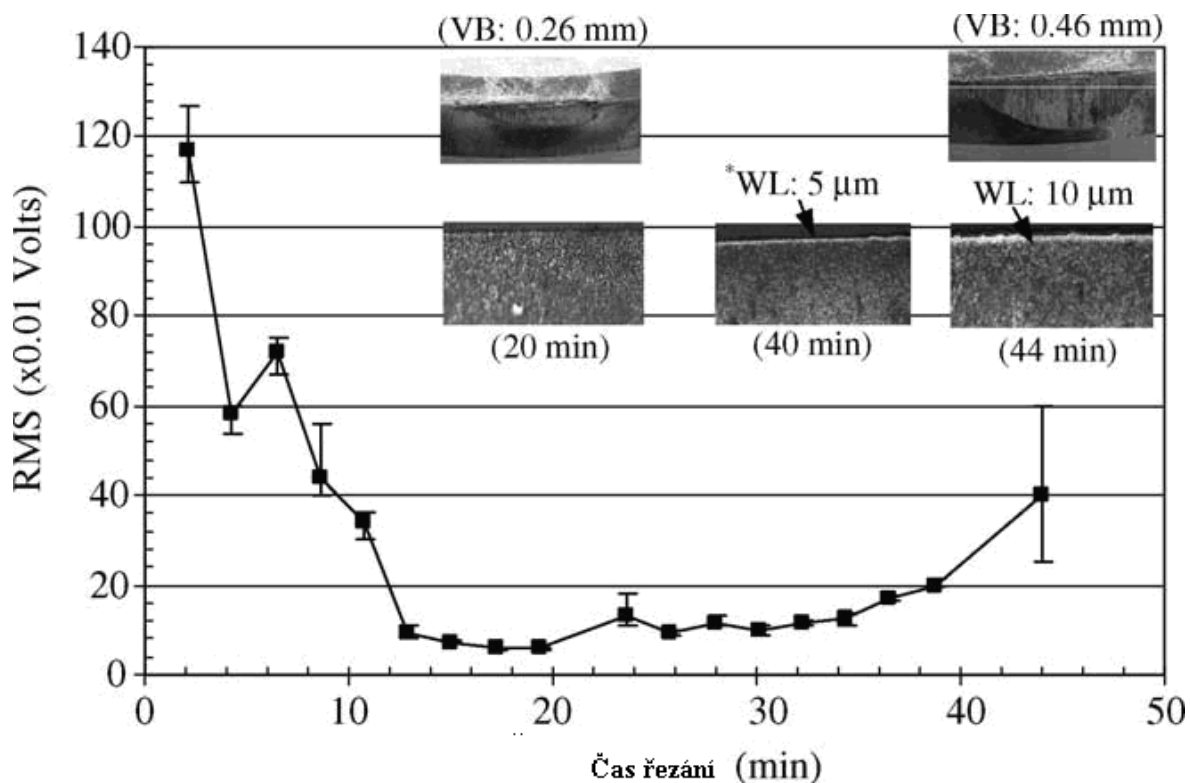
AE RMS

AE RMS a jeho změna jako funkce času obrábění (viz obr. 5-5) ukazuje vzájemný vztah s tloušťkou bílé vrstvy a opotřebením hřbetu nástroje. RMS hodnota je závislá na tloušťce bílé vrstvy, které dále závisí na závažnosti opotřebením nástroje.

Obr. 5-5 ukazuje, že nový řezný nástroj vytváří velké veličiny AE RMS. AE RMS hodnota se snižuje s rostoucím opotřebením hřbetu až do objevení bílé vrstvy. V případě, že se mechanické a tepelné zatížení během obrábění zvyšuje v kombinaci s objevením bílé vrstvy, RMS hodnota se bude zvyšovat pomalu, až do tvoření husté bílé vrstvy.

Tyto výsledky jsou založeny na 18 pokusech při soustružení se stejnými parametry. Další testy při soustružení s různými parametry vykazují podobné hodnoty (viz obr. 5-5). AE RMS změna s bílou vrstvou může být vysvětlena pomocí tlumení systému nástroj - obrobek. Základní vysvětlení je to, že v začátku obrábění malá styčná plocha mezi ostrým nástrojem a obrobkem vede k tlumení poměru nástroj - obrobek systému, a proto se snižuje RMS. Zvýšení míry tlumení při rozsáhlém opotřebením hřbetu nástroje je odůvodněné, protože povrch materiálů je temperovaný v důsledku tepelných cyklu v různých pásmech řezu.

Když opotřebením hřbetu nástroje dosáhne určité hodnoty (nad 0,26 VB), výskyt křehké bílé vrstvy na obráběné ploše snižuje tlumení a zvyšuje RMS AE signály z uvolněné pružné energie v procesu obrábění.

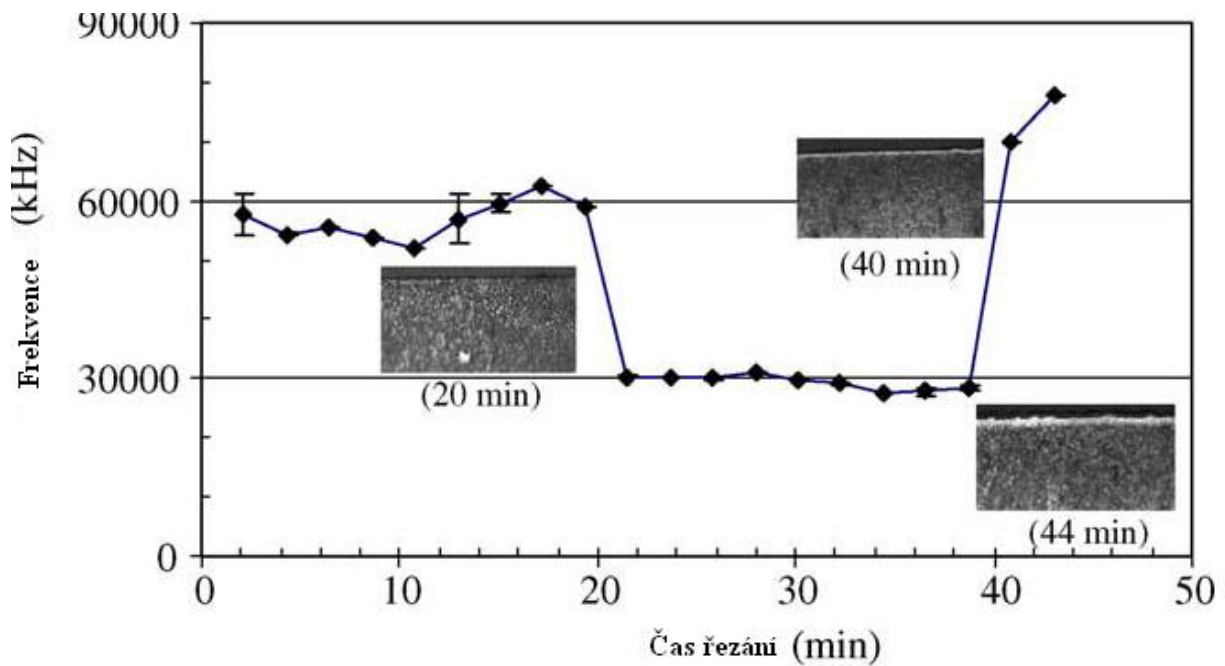


Obr. 5-5 AE RMS versus mikrostruktura a opotřebením nástroje [2]

AE frekvence

AE frekvence versus řezný čas (viz obr. 5-6) ukazuje, že frekvence je v nepřítomnosti bílé vrstvy velmi vysoká, pokud je nástroj poměrně ostrý. Opotřebením hřbetu nástroje se rozvíjí a frekvence klesá, když roste tlumení systému nástroj - obrobek.

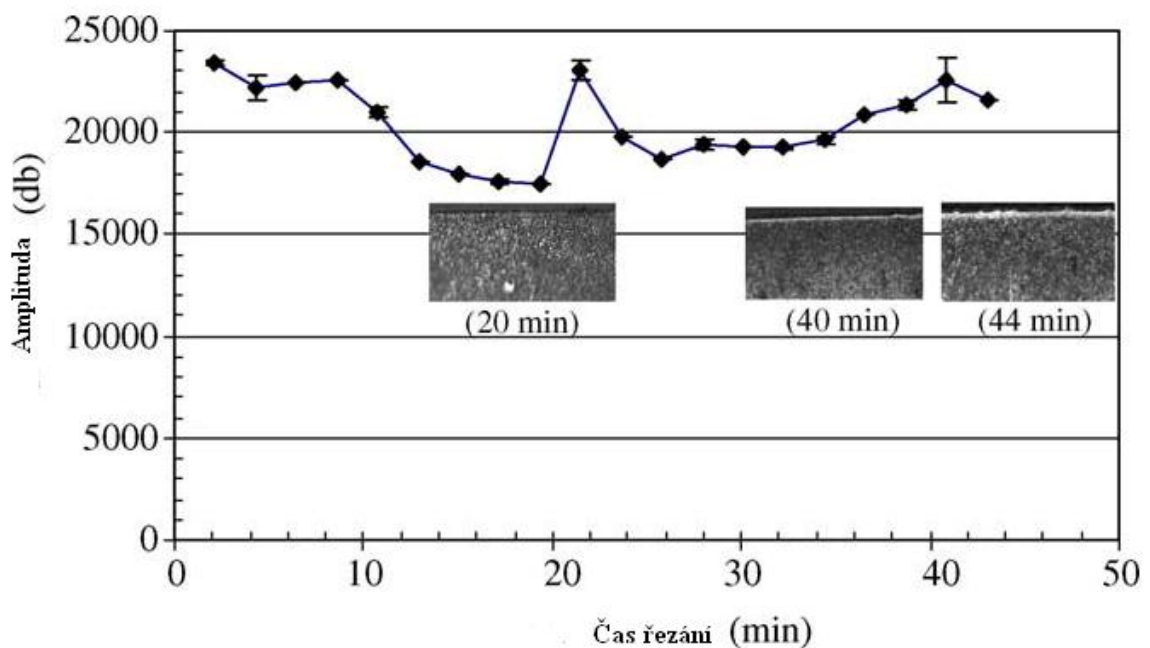
Pokles frekvence trvá asi 10 minut, což je dostatečně dlouhá doba k vyvolání temperování na povrchu materiálů, kdy opotřebením hřbetu nástroje je progresivní. Frekvence je relativně stabilní ve fázi ustáleného stavu opotřebením nástroje. Jakmile se objeví bílá vrstva, AE frekvence se výrazně zvyšuje a v důsledku toho se zvyšuje tlumení.



Obr. 5-6 AE frekvence versus mikrostruktura [2]

AE amplituda

AE amplituda versus řezný čas (viz obr. 5-7) ukazuje, že neexistuje žádná zřetelná korelace s bílou vrstvou, když se amplituda v počáteční fázi opotřebení postupně snižuje (při méně než 20 min obrábění). Existence bílé vrstvy ukazuje, že má mírný vliv na amplitudu AE.

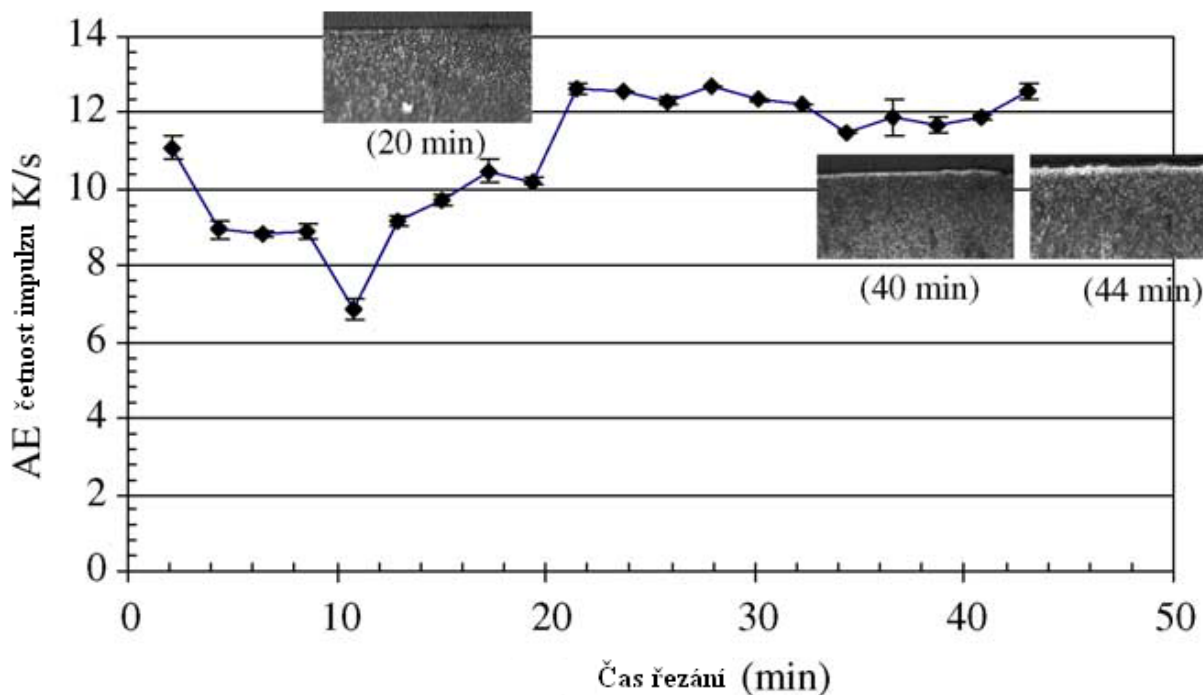


Obr. 5-7 AE amplituda versus mikrostruktura [2]

AE četnost

AE četnost versus řezný čas (viz obr. 5-8) ukazuje jasně rozeznatelný vztah mezi AE parametry a změnami mikrostruktury. Vyvolání bílé vrstvy se postupně zvyšuje AE četnost, která pak zůstává téměř konstantní s existencí bílé vrstvy.

AE četnost by mohla být použita jako jeden klíčový parametr poukazující na existenci bílé vrstvy v těžkém obrábění. Nicméně, AE četnost není citlivá na tloušťku bílé vrstvy.



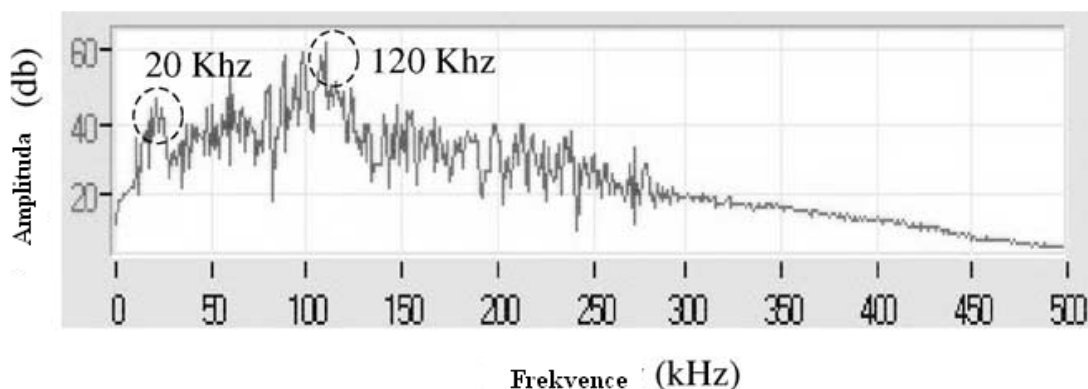
Obr. 5-8 AE četnost versus mikrostruktura [2]

AE spektrum

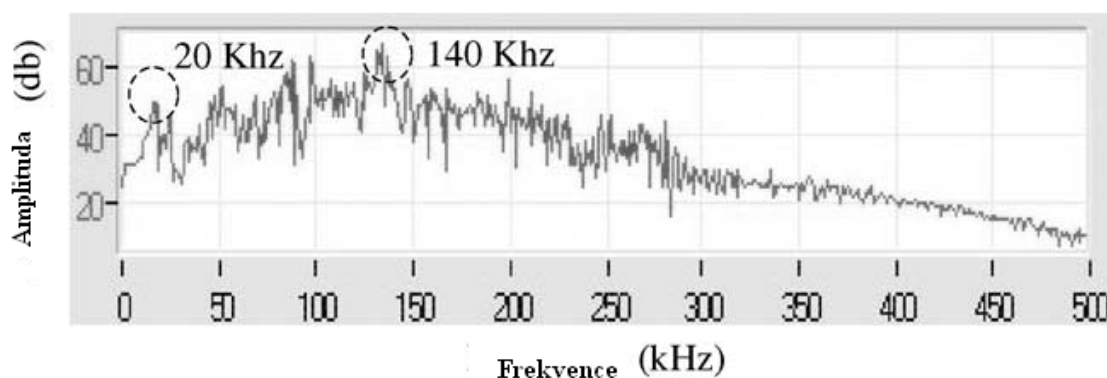
AE spektrum (viz obr. 5-9 a 5-10), ukazuje, že první vrchol amplitudy je 20 kHz bez ohledu na existenci bílé vrstvy.

Druhý vrchol amplitudy nastává při 120 kHz, kdy bílá vrstva chybí a na 140 kHz v přítomnosti bílé vrstvy. Druhý vrchol se zvětšuje se zvyšováním tloušťky bílé vrstvy. Zvyšováním tloušťky bílé vrstvy se také zvyšuje frekvence amplitudy druhého vrcholu. To nastává z důvodu zvýšení tepelného a mechanického zatížení obrobeneho povrchu.

Z toho lze odvodit, že v různých obráběcích sekvencích při těžkém soustružení by vytvářely různá mechanická a tepelná zatížení, a proto budou různé AE signály. Nicméně základní charakteristiky AE signálů a korelace s tvorbou bílé vrstvy v těžkém obrábění budou stabilní.



Obr. 5-9 AE amplituda versus frekvence [2]



Obr. 5-10 AE amplituda versus frekvence [2]

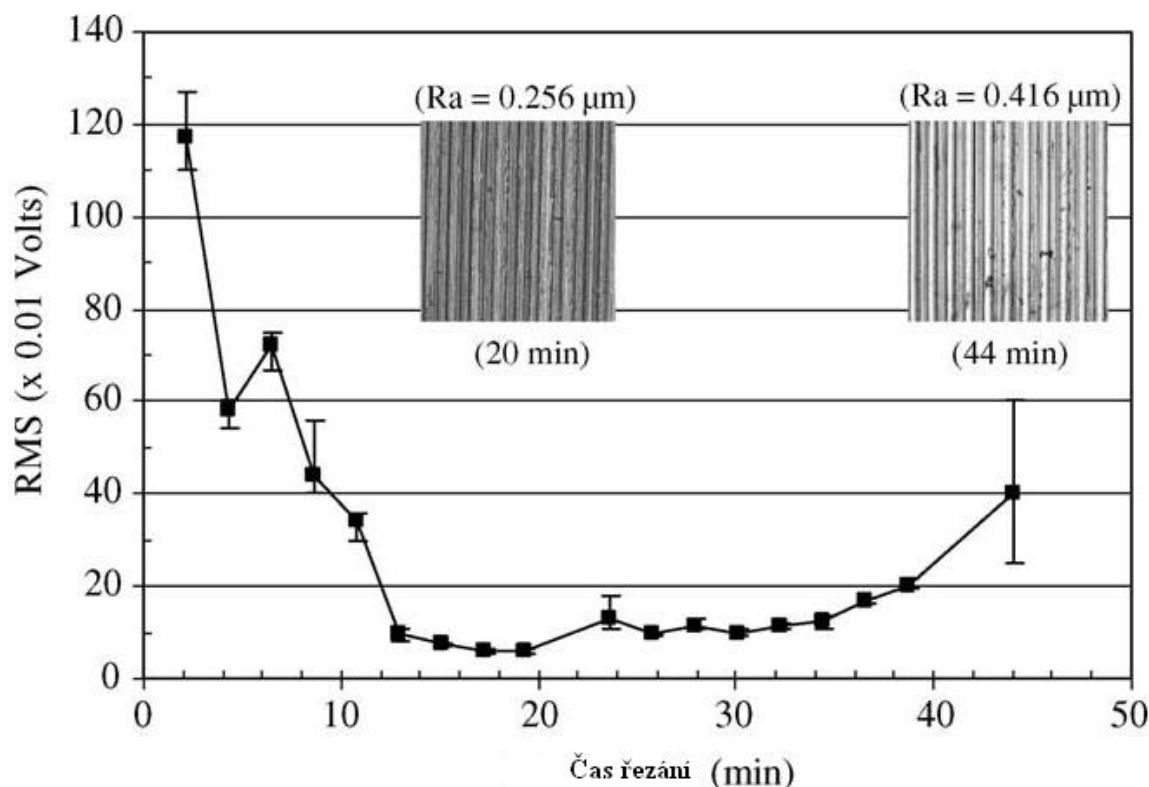
AE signálu versus povrchová úprava

Pro získání dalších poznatků o povaze AE signálů vyvolaných při těžkém obrábění, by měla struktura povrchu odpovídat přítomnosti a nepřítomnosti bílé vrstvy související s AE signály. Jinými slovy, mohou AE signály charakterizovat strukturu obrobeneho povrchu?

AE RMS

Stejně jako souvislost mezi AE RMS a bílou vrstvou, tak i AE RMS a struktura povrchu (viz obr. 8) vykazují podobný průběh. Za účelem porovnání obrobene plochy byla drsnost povrchu měřena snímačem a optickým obrazem.

Opatřebení hřbetu nástroje viz obr. 5-11. Počáteční vysoká RMS hodnota odpovídá dobré struktuře povrchu a nízká RMS hodnota odpovídá drsnému povrchu. Jak se dalo očekávat, AE RMS se zvyšuje opět se zhoršenou kvalitou povrchu v přítomnosti bílé vrstvy. Obrobene povrch změni barvu s objevením bílé vrstvy.



Obr. 5-11 AE RMS versus struktura povrchu [2]

AE frekvence

AE frekvence versus struktura povrchu (viz obr. 5-12) ukazuje, že frekvence je velmi stabilní, když drsnost povrchu bude malá (opotřebení hřbetu! 1,57 mm).

AE frekvence se snižuje se zhoršením kvality povrchu, ale prudce narůstá, když drsnost povrchu R_a je nad určitou hodnotu a na povrchu je tlustá bílá vrstva.

Experimentální data ukazují, že bílá vrstva výrazně zhoršuje obrobený povrch. Drsnost povrchu není řídicím parametrem pro AE signály. To znamená, že bílá vrstva je hlavním faktorem pro vyvolání vysokých AE frekvencí.

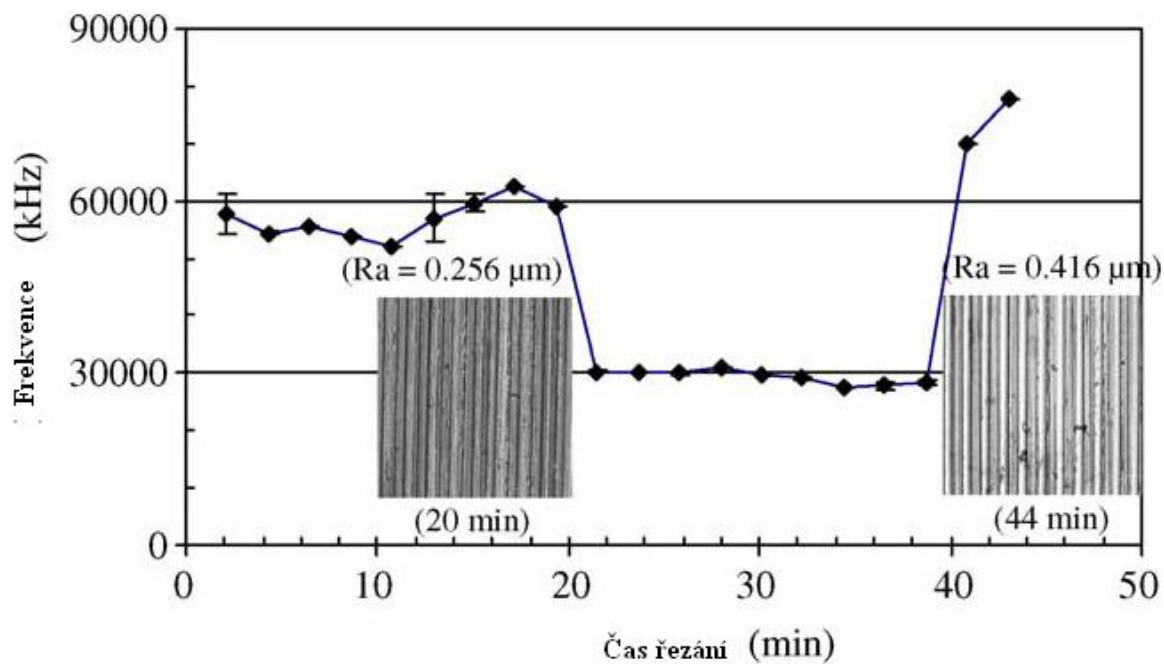
AE amplituda

Obr. 5-13 ukazuje, že neexistuje žádný zřejmý vztah mezi AE amplitudou a drsností povrchu, ačkoliv AE amplituda mírně klesne na počáteční fázi řezání, ale stoupá znovu, když se struktura povrchu zhoršuje.

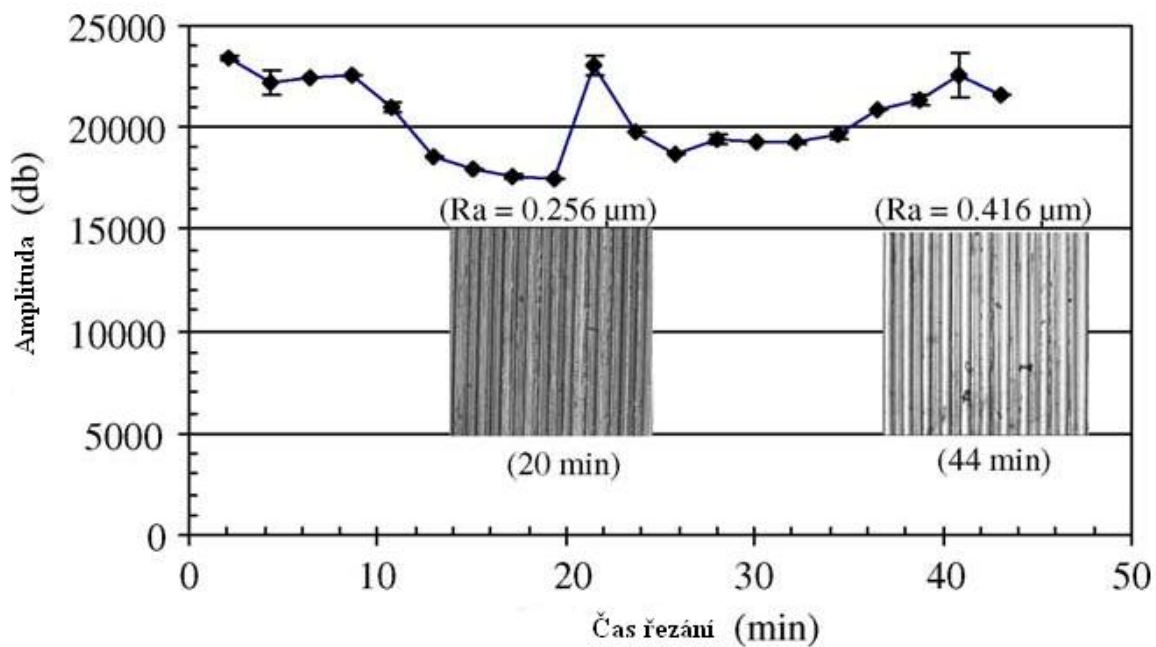
AE četnost

AE četnost versus struktura povrchu (viz obr. 5-14) ukazuje, že četnost klesá v prvních 10 minutách obrábění, pak se zvyšuje drsnost povrchu se zvětšením opotřebení hřbetu při přítomnosti bílé vrstvy.

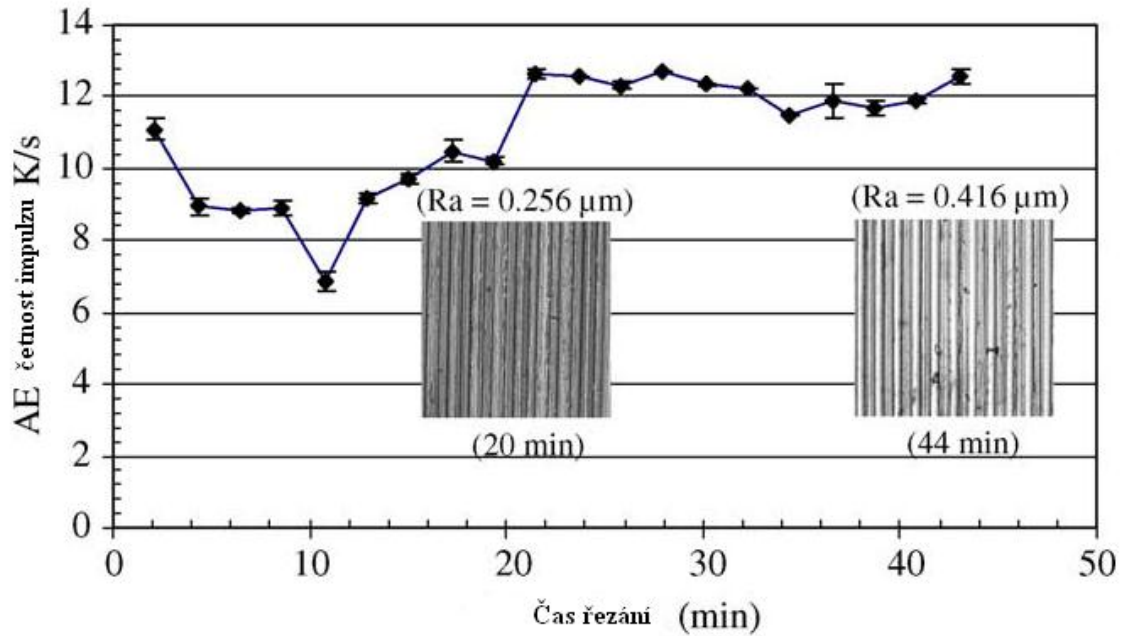
Nicméně četnost je relativně stabilní, i když se struktura povrchu výrazně zhoršuje. To znamená, že AE četnost může charakterizovat existenci bílé vrstvy nikoliv její tloušťku.



Obr. 5-12 AE frekvence versus struktura povrchu [2]



Obr. 5-13 AE amplituda versus struktura povrchu [2]



Obr. 5-14 AE četnost a struktura povrchu [2]

5.1 Průmyslový význam

Výsledky získané z projektu lze použít v různých průmyslových aplikacích:

- Monitorování nástroje a zajišťování kvality v oblasti přesného obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako Inconel a Titan.
- On-line kontrola procesu k dosažení maximální výkonnosti.

6 Závěr

V bakalářské práci bylo představeno několik nejvýznamnějších studií z různých světových univerzit a vědeckých ústavů týkajících se problematiky akustické emise při obrábění.

Do bakalářské práce byly také zahrnuty některé z nejvíce používaných a pokročilých metod zpracování signálu. Především jsem se zaměřila na popis spojité a diskrétní transformace, např. Fourierova, Gaborova a vlnková. AE signály se také zpracovávají statistickými metodami analýzy zastupujícími amplitudo- distribuční metodou a entropicko – distanční metodou zpracování signálu.

Taky v práci je zmíněno o takových metodách zpracování signálu jako Group Method of Data Handling, fuzzy c-mens shlukování, neuronových sítích a kombinaci fuzzy a neuronové sítě.

V kapitole 5, na příkladu frézování bylo uvedeno praktické využití Fourierovy, Gaborovy a vlnkové transformace. Byly ukázány závislosti AE signálu na řezných podmínkách. Při nižších rychlostech posuvu se objevují dvojitě dominantní vrcholy na rozdíl od vyšší rychlosti posuvu, při níž se vyvíjel jen jeden dominantní vrchol. Což může mít za následek větší namáhání nástroje. Experiment byl uskutečněn při stejných otáčkách vřetena a stejné hloubce řezu.

V dalším experimentu bylo předvedeno, jaký vliv má hloubka řezu na signál AE při stejných otáčkách vřetena a rychlosti posuvu. Bylo zjištěno, že při vyšší hloubce řezu se zvýší amplituda AE signálu, což může poukazovat na vyšší zatížení řezného nástroje.

Celkově se dá říct, že pro charakteristiku AE signálu s frekvenčním rozsahem 50 až 200kHz může být použita Fourierova a Gaborova transformace. Při nižších frekvencích je efektivnější vlnková metoda.

Na příkladě online monitorování bylo ukázáno, jak může být použit AE signál při tvorbě bílé vrstvy (poškození povrchu obrobku), za odpovídajícího opotřebením nástroje a odpovídající struktury povrchu.

Výsledky ukazují, že AE signály mohou být užitečné ke sledování faktoru integrity povrchu (mikrostruktura, pnutí, výrazné ovlivňování únavy a namáhání povrchu, vliv koroze na obráběné součásti), zejména:

AE RMS frekvence a četnost signálu jsou citlivé na existenci bílé vrstvy, opotřebením nástroje a na drsnost povrchu. Četnost AE není citlivá na tloušťku bílé vrstvy.

Tvorba bílé vrstvy je primárním faktorem pro vyvolání vysoké AE frekvence. Existuje vysoká korelace mezi AE frekvencí a strukturou povrchu.

Přítomnost bílé vrstvy zvyšuje AE amplitudu a příslušnou frekvenci.

Standardní výbava, která je schopna záznamu zvuku s hloubkou 16 bitů a frekvencí 44,1 kHz, může posloužit k řešení běžných praktických potřeb, nemůže však přinášet výsledky srovnatelné s výsledkami ve světě, kde se pracuje s rozsahy přesahujícími 300 kHz.

V současné době technologie založené na snímání AE je nejvíce intenzivně vyvíjející oblast pro rozvoj inteligentních systémů monitorování procesu obrábění. To je zdůvodněno tím, že AE je velmi citlivá na stav opotřebení nástroje a jeho zlomení taky AE signály silně závisí na parametrech řezného procesu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1]. RUBIO,E.M.,TETI,R.,BACIU,I.L. Advanced signal processing in acoustic emission monitoring systems for machining technology. Cardiff University, Manufacturing Engineering Centre,2006
- [2]. LI,X. A brief review:acoustic emission method for tool wear monitoring during turning, School of Electric Engineering, Yanshuan University, Qinhuandao, P.R. China, 2001
- [3]. Dr.CHEN, XiaoQi, ZANG, Hao, Dr. DIETMAR, Wildermuth. In – Process Tool Monitoring through Acoustic Emission Sensing, 2001
- [4]. GUO,Y.B.,AMMULA, S.C. Real – time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining, Department of Mechanical Engineering, The University of Alabama, USA,2004
- [5].[Online] [Citace: 9.7.2013] Dostupne z < <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005070801>>
- [6]. BEGGAN, C., WOULFE, M., YOUNG, P., BYRNE, G. Usind Acoustic Emission to Predict Surface Quality, Mechanical Engineering, University College Dublin, Ireland, 1999
- [7]. PONTUALE,G.,FARRELLY,F.A.,PETRI,A.,PITOLLI,L.,KROGH,F. Properties of Acoustic Emission Signals for Tool Condition Monitoring (TCM) Applications, Istituto di Acustica “O.M.Corbino”, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome, Italy
- [8]. LI,X.,YUAN,Z. Tool wear monitoring whith wavelet transform-fuzzy clustering method, 1998

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Zdroje AE při obrábění	4
Obr. 2-2 Rozdělení AE signálu.....	5
Obr. 2-3 a) Impulzní AE signál b) Kontinuální AE signál.....	6
Obr. 2-4 Typický snímač AE signálu. A-piezoelektrický element, B-podpora,	6
Obr. 2-5 Složky monitorovacího a ovládacího systému.....	7
Obr. 2-6 Úprava AE signálu a předzpracování.....	8
Obr. 4-1 Charakteristika impulzního signálu: 1. Signál překročil referenční hranici poprvé; 2. Doba náběhu; 3. Maximální amplituda; 4.Hraniční amplituda; 5. Doba trvání signálu; 6. Referenční počet.....	11
Obr. 5-1 AE signály s různým posuvem, kde abscisa(s),ordináta(V)	16
Obr. 5-2 AE signály s různou hloubkou řezu, abscisa(s),ordináta(V).....	17
Obr. 5-3 Vlnková analýza AE signálu.....	18
Obr. 5-4 Krátkodobá Fourierova transformační analýza AE signálu.....	19
Obr. 5-5 AE RMS versus mikrostruktura a opotřebení nástroje	20
Obr. 5-7 AE amplituda versus mikrostruktura	21
Obr. 5-6 AE frekvence versus mikrostruktura.....	21
Obr. 5-8 AE četnost versus mikrostruktura	22
Obr. 5-9 AE amplituda versus frekvence	23
Obr. 5-10 AE amplituda versus frekvence	23
Obr. 5-11 AE RMS versus struktura povrchu	24
Obr. 5-12 AE frekvence versus struktura povrchu	25
Obr. 5-13 AE amplituda versus struktura povrchu.....	25
Obr. 5-14 AE četnost a struktura povrchu.....	26