

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studium signálu akustické emise při různých technologiích obrábění

Autor: **Bc. Petr Doule**  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr DOULE**  
Osobní číslo: **S17N0071K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie – technologie obrábění**  
Téma práce: **Studium signálu akustické emise při různých technologiích obrábění**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Teoretický rozbor řešené problematiky
3. Návrh a realizace experimentálního měření
4. Vyhodnocení získaných dat
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:


- Elektronické informační zdroje dostupné z [www.knihovna.zcu.cz](http://www.knihovna.zcu.cz)
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- MM Průmyslové Spektrum, dostupné z [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)
- Strojírenská technologie, dostupné z <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz/>
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z: <http://sandvik.coromant.com>


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění


Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Kutlwašer, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

  
**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



  
**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2019

## **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**

Na tomto místě bych rád poděkoval své vedoucí práce Ing. Jaroslavě Fulemové, Ph. D. za její čas a rady při tvoření práce.

Velký dík patří konzultantovi práce Ing. Janu Kutlwašerovi, Ph. D. především za jeho čas, ochotu věnovat mi i svůj volný čas a cenné rady při vyhodnocování výsledků práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vypůjčení a obsluhu vysokorychlostní kamery a také panu Oldřichu Pavelkovi st. za obsluhu strojů, na kterých bylo prováděno měření.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za podporu v průběhu celého studia.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Doule	Jméno Petr	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Fulemová, Ph.D.	Jméno Jaroslava	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b><del>BAKALÁŘSKÁ</del></b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Studium signálu akustické emise při různých procesech obrábění		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	94	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	76	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	18
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce se zabývá akustickou emisí obecně a dále je zaměřena na vyhodnocení a zkoumání napětí RMS signálu při technologiích rovinné broušení, horizontální obrábění a vertikální frézování. Při těchto technologiích byly měněny řezné podmínky a sledován vývoj signálu. Pomocí pro zkoumání řezu byla vysokorychlostní kamera. Výsledky byly vyhodnoceny zvlášť a také porovnány mezi sebou.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p>	<p>RMS napětí, akustická emise, vysokorychlostní kamera, rovinné broušení, horizontální obrábění, vertikální frézování</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Doule	Name Petr	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Fulemová Ph.D.	Name Jaroslava	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Study of acoustic emission signal at various machining technologies		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	94	<b>TEXT PART</b>	76	<b>GRAPHICAL PART</b>	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis will explore acoustic emissions, with a specific focus on the evaluation and investigation of Root Mean Square (RMS) signal voltage in the technologies of surface grinding, horizontal shaping and vertical milling. With these technologies, the cutting conditions were changed and the signal development was continually monitored. A high-speed camera was used to examine the section. The results were later evaluated separately and subsequently compared to analyse the individual results.
<b>KEY WORDS</b>	RMS voltage, acoustic emission, high-speed camera, surface grinding, horizontal shaping, vertical milling

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
1 Úvod .....	11
2 Charakteristika akustické emise obecně .....	12
2.1 Základní terminologie a parametry akustické emise .....	13
2.2 Vyhodnocení akustické emise .....	15
2.2.1 Základní parametry při vyhodnocování akustického signálu .....	15
2.3 Získání RMS signálu .....	15
2.4 Povaha signálu akustická emise při obrábění .....	16
2.5 Kaiserův jev .....	17
2.6 Felicity jev .....	18
3 Akustická emise v obrábění .....	19
3.1 Sledování stavu řezných nástrojů použitím AE .....	19
3.2 Zdroje akustické emise doprovázející vznik třísky .....	19
3.2.1 Zdroje AE při obrábění .....	20
3.2.2 Další zdroje signálu AE .....	21
4 Výzkumy zabývající se AE v obrábění .....	22
5 Rovinné broušení .....	24
6 Horizontální obrážení .....	26
7 Vertikální frézování .....	27
8 Experimentální měření .....	28
8.1 Cíl měření .....	28
8.2 Metodika měření .....	28
8.2.1 Měřicí systém .....	29
8.2.2 Vysokorychlostní kamera .....	31
8.2.3 Obrobek .....	32
8.3 Rovinné broušení – měření a vyhodnocení signálu RMS .....	33
8.3.1 Metodika měření při rovinném broušení .....	33
8.3.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při rovinném broušení .....	36
8.4 Horizontální obrážení – měření a vyhodnocení signálu RMS .....	44
8.4.1 Metodika měření při horizontálním obrážení .....	44
8.4.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při horizontálním obrážení .....	46
8.5 Vertikální frézování – měření a vyhodnocení signálu RMS .....	51
8.5.1 Metodika měření při vertikálním frézování .....	51
8.5.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při vertikálním frézování .....	54



9	Porovnání technologií a vyhodnocení .....	66
10	Závěr.....	68
11	Použitá literatura .....	69
	Seznam obrázků: .....	72
	Seznam tabulek: .....	74
	Seznam grafů:.....	75
	Příloha č. 1.....	77
	Příloha č. 2.....	81
	Příloha č. 3.....	88

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
$a_{ef}$	[mm]	šířka záběru frézy
$v_{fb}$	[mm/min]	kyvadlová rychlost posuvu stolu brusky
$v_{ff}$	[mm/min]	posuvová rychlost stolu frézky
$v_{cb}$	[m/s]	řezná rychlost brusky
$v_{cf}$	[m/min]	řezná rychlost frézky
$v_{co}$	[m/min]	řezná rychlost obrážky
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$n_b$	[ot/min]	počet otáček vřetene za minutu brusky
$n_f$	[ot/min]	počet otáček vřetene za minutu frézky
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
RMS	[V]	střední kvadratická úroveň signálu
AE	[Hz]	akustická emise
$\gamma_n$	[°]	úhel čela
$h_p$	[mm]	hloubka plastické deformace
$h_e$	[mm]	hloubka elastické deformace
$r_n$	[mm]	poloměr zrna
$v_z$	[m/min]	zpětný pohyb nástroje
$f_{dz}$	[mm/dz]	posuvový pohyb stolu obrážky
$U_{RMS}$	[V]	napětí za RMS převodníkem
$U_{AE}$	[V]	napětí za filtrem
$D_k$	[mm]	naměřený průměr brusného kotouče
$D_f$	[mm]	průměr frézy
$l_o$	[mm]	délka obrobku
$b_o$	[mm]	šířka obrobku
$t_{p\check{c}h}$	[s]	naměřená průměrná časová hodnota
kHz	[kHz]	jednotka frekvence – kilohertz
MHz	[MHz]	jednotka frekvence – megahertz
$Z_f$	[1]	počet zubů frézy
$n_s$	[ot/s]	počet otáček za jednu sekundu
$t_{f1}$	[s]	čas jedné otáčky
$t_{u13}$	[s]	časový úsek náj. frézy a výj. frézy
$t_{u2}$	[s]	časový úsek záběru frézy v celé šířce
$R_f$	[mm]	poloměr frézy

# 1 Úvod

Zvuk, vydávaný nástrojem vůči obrobku při obrábění, ať už jde o frézování, soustružení, broušení či jiné metody, byl již od počátku jednou z indicií pro dobré podmínky řezu. Proto jsou soudobé akustické metody založeny na měřících postupech, které jsou přesnější. Veškeré strojírenské podniky, zabývající se obráběním, se snaží o co největší produktivitu při co nejnižších nákladech. S využitím akustické emise (AE) je možné sledovat procesy obrábění takzvaně online po celou dobu řezu. Jedná se o nedestruktivní metodu zkoušení. Pokud se s jejím využitím dokáže předejít například zlomení nástroje nebo vyrobení zmetkového kusu kvůli velkému opotřebení řezných destiček, je toto monitorování správný krok vpřed. Může se však dále uvažovat i o vlivu na drsnost povrchu a dalších faktorech, na které se při obrábění klade důraz.

Tato práce se v teoretické části zaměřuje na problematiku akustické emise obecně. Měření AE se využívá pro mnoho různých odvětví průmyslu (například při kontrole mostů, objemových nádrží atd.). Dále je však zaměřena pouze na procesy obrábění. Je zde uvedeno i několik výzkumů zabývajících se měřením AE. Jelikož je AE spojena i s deformací materiálu, jsou zde konstatovány i důležité poznatky, které se týkají použitých technologií při experimentu.

V teoretické části jsou obsaženy také informace o řadou odborníků odhalovaném spojitém a nespojitém signálu AE. Nicméně v experimentálním měření bylo využito pouze emisního RMS signálu, který se těmito signály nevyjadřuje.

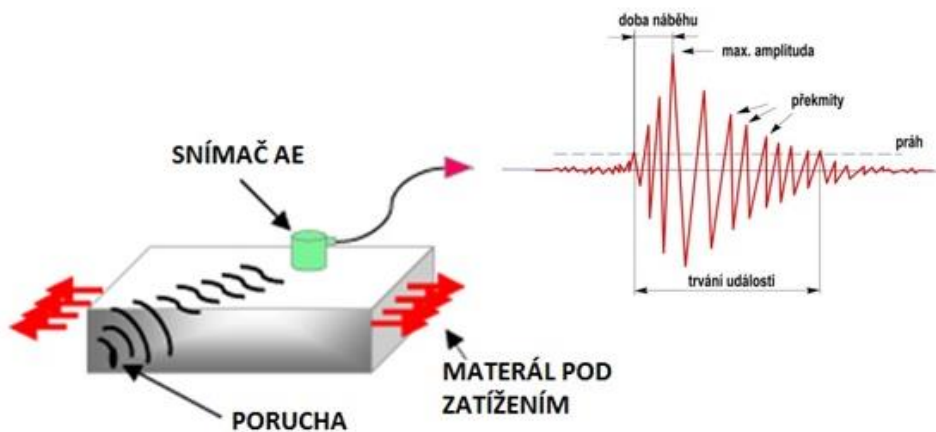
V poslední řadě je popsán a proveden vlastní návrh a realizace experimentálního měření při již zmíněných technologiích obrábění, vyhodnocení získaných dat jejich popsáním a následnou diskuzí a porovnáním s dalšími možnými výsledky.

Jelikož má signál AE vysoké vzorkovací frekvence, které nejsme schopni použitým měřícím systémem zpracovat, bylo rozhodnuto o zpracování emisního RMS signálu, jenž je snadněji zpracovatelný. Práce se tedy v experimentální části nezabývá zpracováním celkového signálu AE.

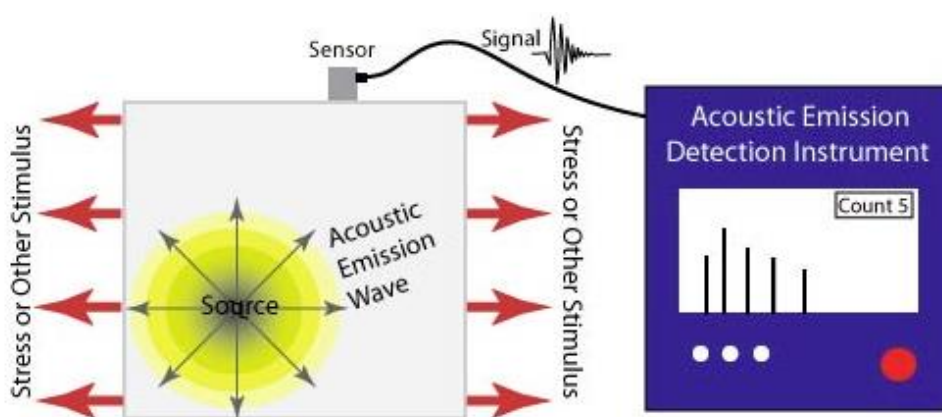
Konečným cílem diplomové práce bylo změření a vyhodnocení napětí emisního RMS signálu při technologiích rovinné broušení, horizontální obrážení a vertikální frézování. Při každé technologii byly měněny řezné podmínky za účelem sledování vývoje signálu a jeho porovnání. Získané signály byly také prozkoumány ve vyhodnocovacím programu v závislosti na čase. Při měření byla použita vysokorychlostní kamera snímající krátký časový úsek řezu každé použité technologie. Na závěr proběhlo porovnání technologií mezi sebou.

## 2 Charakteristika akustické emise obecně

Akustická emise je fyzikální jev, který nastává v materiálu například v důsledku dynamických procesů, tedy působením vnitřních či vnějších sil, a dochází při něm k uvolňování akumulované energie (mikro praskání, šíření trhlin atd.) ve formě napět'ových vln. Tyto vlny se dále šíří materiálem od místa zdroje směrem na povrch. Při průchodu napět'ové vlny materiálem se část energie přemění na teplo, část vyvolá na povrchu materiálu tzv. povrchovou Rayleighovu (akustickou) vlnu a zbývající energie se prostřednictvím odražené vlny vrátí zpět do materiálu. Vlnění, které se následně dostane na povrch, může být zaznamenáno pomocí piezoelektrických snímačů od různých výrobců a převedeno na elektrický signál, označovaný jako emisní. Vzniklá amplituda se potom pohybuje řádově v mikrometrech. [1]

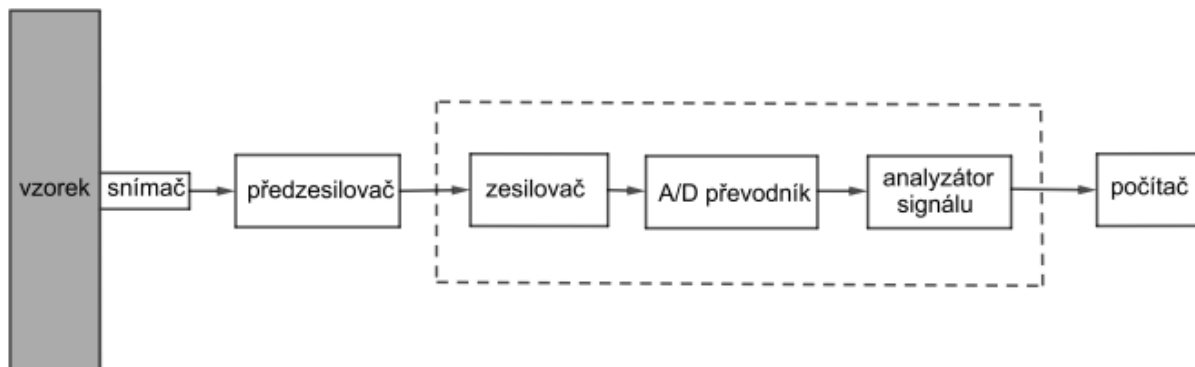


Obrázek 1: Princip AE a zobrazení vlny signálu (Zdroj: [8])



Obrázek 2: Schéma detekce a zpracování AE (Zdroj: [4])

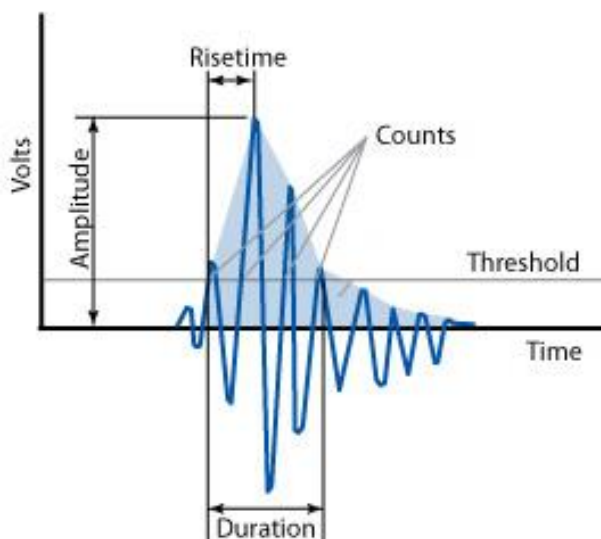
Uspořádání měřicí aparatury pro snímání a zpracování akustické emise je samozřejmě složeno ze vzorku, na němž chceme tento signál sledovat, a snímače umístěného na vzorku (např. pomocí lepidla, pásky, šroubu a nyní i magnetu), z něhož signál putuje do předzesilovače a zesilovače. Signál se poté dostane do převodníku převádějícího analogový signál na digitální (A/D) a přes analyzátor signálu až do výstupního zařízení, tedy počítače s vyhodnocovacím softwarem. [2]



Obrázek 3: Schéma detekce a zpracování signálu AE (Zdroj: [2])

Akustická emise je krátké a rychlé uvolnění nahromaděné energie ve formě elastických vln z lokalizovaných zdrojů uvnitř materiálu. [3]

## 2.1 Základní terminologie a parametry akustické emise



Obrázek 4: Vlna akustické emise (Zdroj: [4])

**Amplituda** (Amplitude) – Největší měřené napětí v decibelech (dB), má tvar vlny. Určuje detekovatelnost signálu. Signály s nižší amplitudou, které jsou pod nastaveným minimálním prahem (Threshold), nejsou zaznamenány.

**Doba náběhu** (Risetime) – Časový interval mezi prvním protnutím vlny amplitudy s prahem a vrcholem signálu. Doba náběhu se používá pro posouzení signálu. Tento interval se týká šíření vlny mezi zdrojem události akustické emise a senzorem.

**Trvání události** (Duration) – Časový interval mezi prvním a posledním protnutím vlny amplitudy s prahem. Trvání události lze využít k zjišťování různých typů zdrojů a odfiltrování hluku. Tento parametr, stejně jako překmit (Counts), závisí na velikosti signálu a akustice materiálu.

**Překmit** (Counts) – Počet překmitů vlny amplitudy vysílaných měřicím obvodem, kdy překročila prahovou hodnotu. V závislosti na materiálu a velikosti akustické emise může jeden zásah vyvolat jeden nebo více překmitů. [4]

Hlavním úkolem při zpracování AE signálu je nalezení a popis impulzů, jejich časové lokace, amplitudy, fáze a oscilační frekvence. Tyto informace poukazují na náhlu emisi elastické energie pocházející zevnitř materiálu. Jedním z nejčastějších problémů ve zpracování AE je výtah takových fyzikálních parametrů ze signálů AE. Tento problém je způsoben tím, že signál není stacionární a často obsahuje překrývající přechody, jejichž průběhy a čas, kdy nastanou, jsou neznámé a zahrnují odchylky z hlediska času a frekvence. Takové události jsou ohroženy šumem nebo se částečně překrývají v časovém rozsahu. Jedná se o sekundární události ovlivňující jejich strukturu. [10]

**Emisní signál** - Je signál získaný detekcí AE. Popisuje se tvarem, amplitudou, časem vzniku, energií a dobou trvání.

**Emisní událost** - Materiálová změna, která způsobuje AE. Signál je tvořen jedním nebo více kmity.

**Emisní kmit** - Průběh emisního signálu v jedné periodě frekvence, která má z celého frekvenčního spektra maximální amplitudu.

**Emisní překmit** - Překročení nastavené úrovně prahu.

**Časová četnost emisních překmitů** - Počet emisních překmitů za časový interval.

**Časová četnost emisních událostí** - Počet emisních událostí za časový interval.

**Počet emisních překmitů** - Celkový součet emisních překmitů za časový úsek.

**Počet emisních událostí** - Celkový součet emisních událostí za časový úsek.

**Pík** (Peak) - vrchol, špička, zvýšená intenzita signálu. [9]

## 2.2 Vyhodnocení akustické emise

Odhalení původu akustické emise je prioritou jejího vyhodnocování během měření. Principem je vyhodnocení akustického zdroje, když měřený materiál zatížíme na nebo nad jeho nominální hodnotu zátěže. Odezva měřené struktury na tuto zátěž se následně vyhodnocuje měřícím systémem. [11]

Pomocí různých snímačů dostaneme elektrický signál, který je následně zpracován dle předchozího schématu (obrázek 3). [11]

### 2.2.1 Základní parametry při vyhodnocování akustického signálu

- **RMS napětí** (Root Mean Square) - Střední kvadratická úroveň signálu, tedy intenzita, efektivní hodnota signálu, energie signálu. Měří se ve voltech (V) nebo milivoltech (mV).
- **Počet překmitů** nad úroveň nastaveného prahu či více prahových úrovní - Počet překmitů signálu za daný čas.
- **Frekvenční spektrum signálu** - Vypočítá se z digitalizovaného signálu emise. [11]

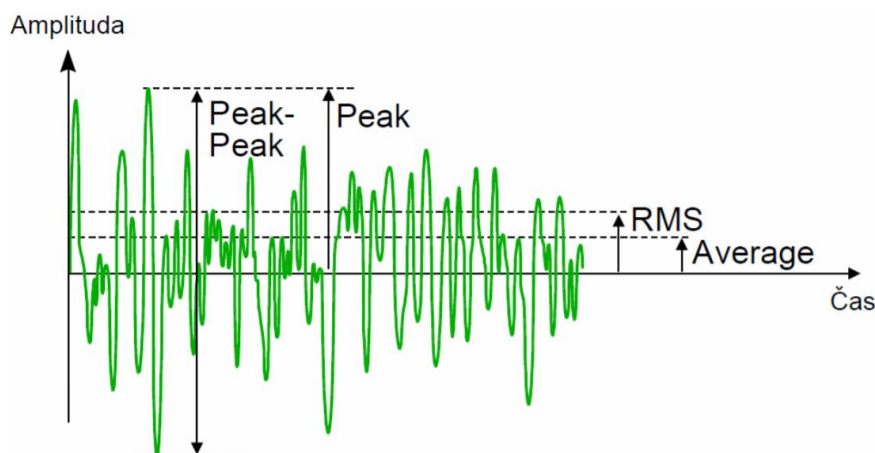
## 2.3 Získání RMS signálu

RMS signál je získán pomocí výpočtových převodníků a vychází z matematické definice signál umocnit na druhou - integrovat – odmocnit. [5]

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_{AE}^2 * dt}$$

$U_{RMS}$  - napětí za RMS převodníkem

$U_{AE}$  - napětí za filtrem

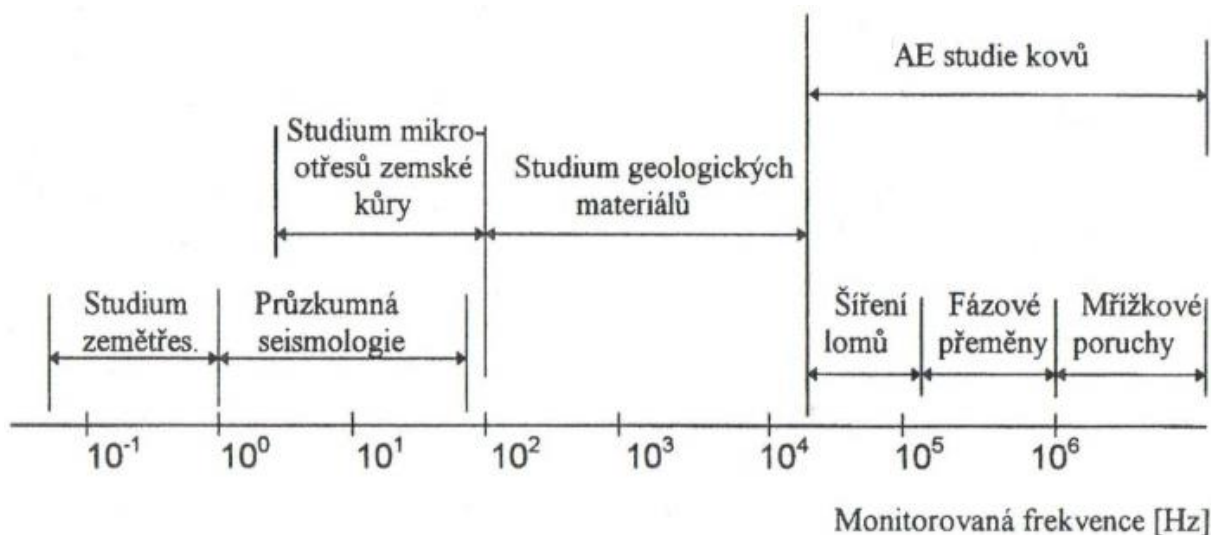


Obrázek 5: Vlna akustické emise (Zdroj: [16])

## 2.4 Povaha signálu akustická emise při obrábění

Vznik AE je z fyzikálního pohledu brán jako okamžitý odraz nastupující materiálové deformace. Materiálová deformace, například lomy a mikrotrhliny, jsou tedy spojeny s procesem obrábění. Změny a materiálové deformace probíhající při tvorbě třísky se projevují náhodným ultrazvukovým signálem tvořeným uvolněnou energií uvnitř materiálu. Signál AE je vhodný k měření zejména v ultrazvukové oblasti vzhledem k širokému frekvenčnímu rozsahu. Díky rozsahu signálu AE jsou vyloučeny vlastní kmity stroje, které jsou hlavně ve slyšitelném pásmu zvukového spektra, a také vliv prostředí. Jelikož je signál AE spojen s fyzikální podstatou tvoření třísky, je měřitelný neustále během celého procesu obrábění. [1]

Signál, který je získán při detekci AE, může být posuzován počtem napětových vln o určitém rozsahu amplitudy uvolněných za jednotku času. Touto veličinou je definována rychlost akustické emise. Podle tvaru signálu AE (vlny) získaného během měřeného procesu vnějšího namáhání materiálu se rozeznávají dva typy AE, a to spojitá (kontinuální) a nespojitá (impulzní) akustická emise. [1]

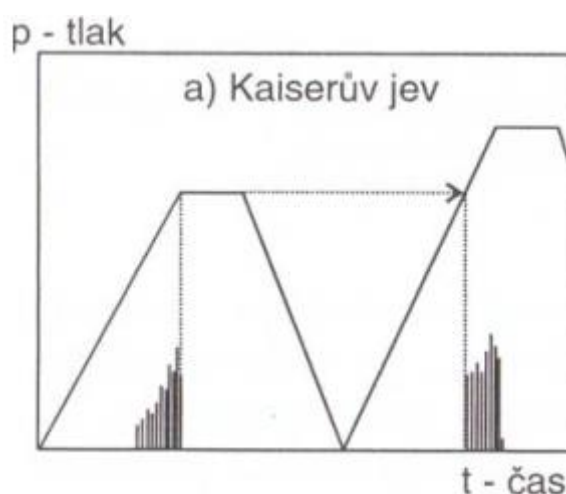


Obrázek 6: Schematické rozdělení akustické emise v závislosti na frekvenci uvolňovaných vln (Zdroj: [1])



## 2.5 Kaiserův jev

Tento jev publikovaný v roce 1950 Josephem Kaiserserem popisuje nevratnost procesů, které probíhají v zatěžovaném materiálu. V něm nejdříve nastávají elastické deformace, při větší zátěži, po překročení meze kluzu daného materiálu, vzniká plastická deformace a ta je zdrojem elastických vln. Tyto vlny je možné snímat jako akustickou emisi. Pokud zatěžování snížíme pod mez kluzu, vlny emise ustanou. Opětovné zatížení materiálu generuje vlny až po překročení přechodného maximálního zatížení. Při zatěžování pod úroveň přechodného maximálního zatížení akustickou emisi nedetekujeme. [7,11]



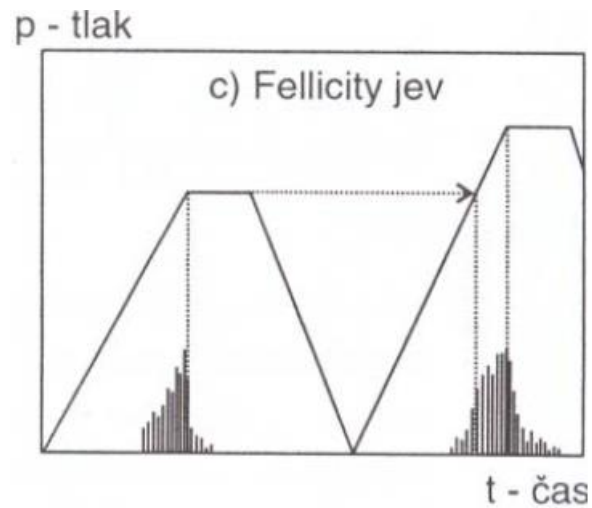
Obrázek 7: Kaiserův jev (Zdroj: [11])

Pokud je v konstrukci sledován signál akustické emise při nižší úrovni zatížení, než je předchozí, došlo od okamžiku posledního zatížení například k zeslabení nosného průřezu, k nějaké změně vlastností materiálu a nejčastěji ke vzniku či nárůstu defektu. To způsobí v místě koncentrace napětí dodatečné lokální zvýšení napětí. [7]

Kaiserův jev nesleduje svírání a rozevírání trhliny. Zkoušky, které nepatří do uvedeného schématu (obrázek 7) a nepřesahují provozní zatížení konstrukce, zjišťují takzvaný Felicity jev. Jedná se o narušení Kaiserova jevu. [7]

## 2.6 Felicity jev

Jak už bylo zmíněno, Felicity jev (obrázek 8) narušuje Kaiserův jev, tudíž neplatí pro všechny materiály stejně. Například v kompozitních materiálech se generuje akustická emise už před překročením předchozího maximálního zatížení. Elastické vlny se objevují s menší energií při podobném zatížení. [7,13]



Obrázek 8: Felicity jev (Zdroj: [11])

### 3 Akustická emise v obrábění

V obrábění, ať už jde o hrubování nebo dokončovací operace s menším úběrem třísky, deformujeme určitými způsoby jak obrobek, tak i nástroj. Pro sledování těchto složitých procesů je třeba využít různých snímacích zařízení k získání užitečných informací. Na základě těchto dat se mohou vyhodnocovat a dále optimalizovat řezné procesy. Sledování akustického signálu má tu výhodu, že ho můžeme sledovat takzvaně online během celého řezného procesu.

#### 3.1 Sledování stavu řezných nástrojů použitím AE

V současné době existuje několik metod ke sledování nebo zjištění stavu opotřebených řezných nástrojů. Základní dělení je na přímé a nepřímé. Mezi nepřímé metody řadíme i akustickou emisi. Slouží pro monitorování procesu řezání a opotřebených nástrojů. Frekvenční rozsah tohoto signálu AE je daleko větší, než je šum prostředí a vibrace stroje. To je hlavní výhoda jejího použití. [1]

Stav břitu řezného nástroje je důležitým kritériem při řezném procesu. Řada parametrů, jako je opotřebením břitu nástroje, jeho intenzita či destrukce, ovlivňuje řezání. [10]

Při vzniku trhlin, povrchovém tření a odvodu třísky vzniká v důsledku plasticko-mechanických procesů v obráběcích procesech akustická emise. Intenzita AE roste i s opotřebením nástroje, kdy se mění kontaktní plochy mezi nástrojem a obrobkem. [1]

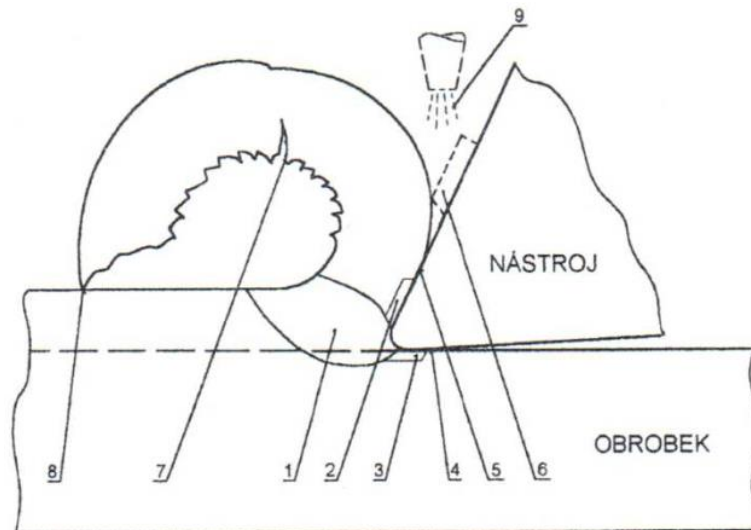
Opotřebením nástroje je vyhodnoceno parametrem RMS. Někdy mikrotrhliny v nástroji varují před zlomením nástroje, a tudíž vysílají AE signál. Toho může být využito pro řízení procesů nebo monitorování opotřebených nástrojů. [10]

#### 3.2 Zdroje akustické emise doprovázející vznik třísky

Jednotlivé nespojitě kmity s větší amplitudou lze celkem dobře odlišit z poměrně plynulého signálu akustické emise. Doprovází je anomální či nežádoucí jevy. Mezi tyto jevy řadíme například katastrofické opotřebením, poškození nebo dokonce i zničení nástroje. Při kontaktu a tření mezi obrobkem a odvádějící třískou nebo nástrojem vznikají poněkud menší, ale podobné zákmitý signálu. V soustavách používaných pro monitorizaci tyto jevy vedou k signalizaci havárie. [1]

### 3.2.1 Zdroje AE při obrábění

Na obrázku (obrázek 9) je zobrazeno možné vymezení několika zdrojů akustické emise v oblasti vzniku třísky. Tyto zdroje signálu akustické emise mají rozdílnou fyzikálně-mechanickou podstatu. [1]



Obrázek 9: Vymezení zdrojů akustické emise (Zdroj: [1])

Mezi zdroje akustické emise se spojitým emisním signálem, které se nacházejí v kořenu třísky a neoddelitelně doprovázejí plastickou deformaci, lze uvést následující:

- 1) Zóna primární plastické deformace
- 2) Zóna sekundární plastické deformace - tato oblast závisí i na tření, k tomu dochází na čelní ploše břitu
- 3) Zóna terciární plastické deformace - vliv hřbetu nástroje (zamačkování)
- 4) Intenzivní tření v zóně kontaktu nástroj - materiál; mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem obrobku
- 5) Tření mezi čelem nástroje a třískou
- 6) Tření mezi lamačem či utvařečem třísky k nucenému odchodu třísky (pokud je nástroj utvařečem vybaven)
- 7) Lámání třísky - zdroj nespojitého signálu AE, které je dán odchodem třísky z místa řezu
- 8) Kontakt třísky s obrobkem - zdroj nespojitého signálu AE
- 9) Použití řezné kapaliny - projeví se v signálu AE během procesu obrábění [1]

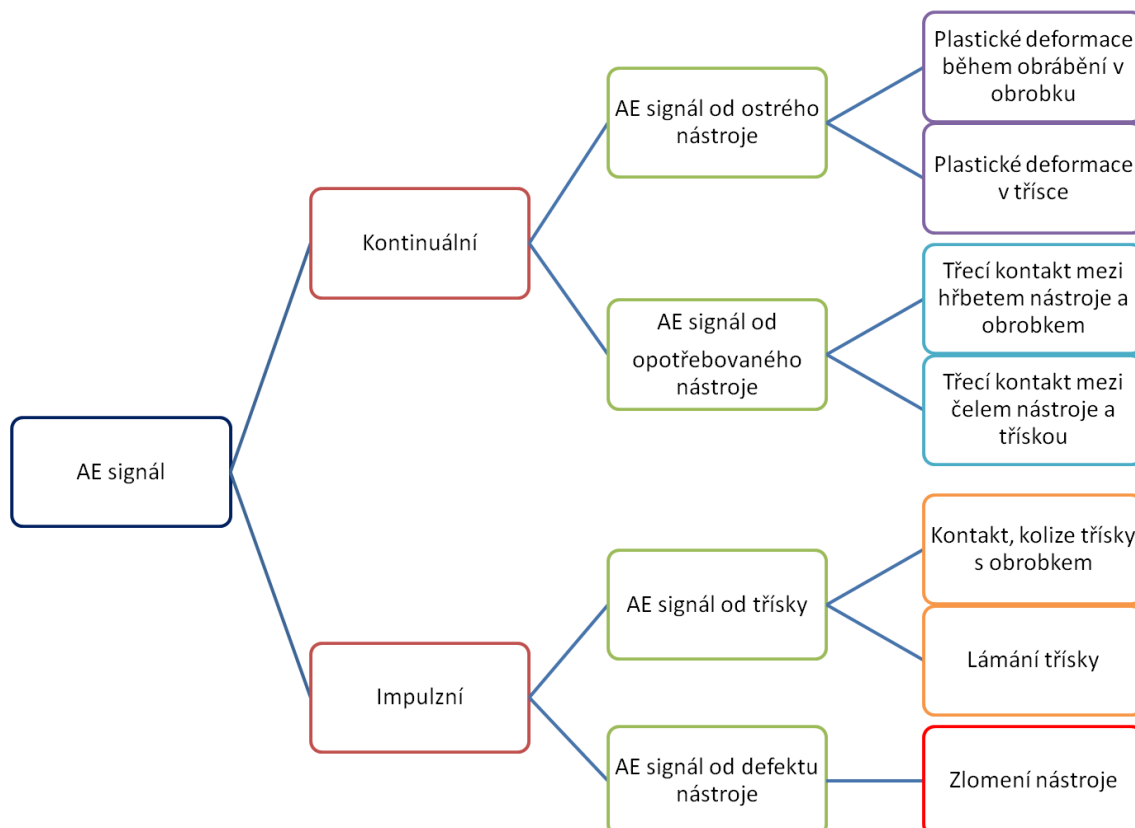
### 3.2.2 Další zdroje signálu AE

- vznik, odchod nebo utržení nárůstku patří mezi energetické zdroje AE s mohutnými vrcholy amplitud
- vylamování a vydrolování materiálu nástroje doprovázené vznikem a rozvojem mikrotrhliny, to předchází destrukci nástroje
- navinutí třísky na nástroj nebo obrobek se také projeví ve snímaném signálu AE, může k tomu dojít při plynulé, špatně tvářené třísce [1]

Tyto zdroje signálu AE se projevují v určitém pásmu frekvencí a mají vlastní specifickou intenzitu. Signál AE vyvolaný od tření a plastických deformací má spojitý (kontinuální) charakter. V dalších případech má AE nespojitý (impulzní) charakter a je více energická. [1]

#### Schéma zdrojů signálu AE

Kontinuální signál je sledován v zónách plastických deformací v obrobku, třísce nebo při tření mezi hřbetem nástroje a obrobku či tření mezi čelem nástroje a třískou. Impulzní signál je sledován při kontaktu třísky s obrobkem, lámání třísky a při zlomení nástroje. Rozdělení AE signálu je ke zhlédnutí na následujícím obrázku (obrázek 10).



Obrázek 10: Možné zdroje signálu AE při obrábění (Zdroj: [12])

## 4 Výzkumy zabývající se AE v obrábění

Uekita Masahiro a Yasuhiro Takaya se ve své práci *Tool condition monitoring for form milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals* zabývají monitorováním stavu frézovacího nástroje při frézování velkoobjemových dílců, a to systémem pro sledování stavu nástroje TCM (tool condition monitoring). Autoři uvádějí, že akustická emise poskytuje komplexní informace o stavu nástroje, týkající se opotřebení nástroje, šíření trhlin a adhezivního opotřebení. Podle autorů lze akustickou emisí zjistit anomální události týkající se kvality povrchu. [24]

Paulo Roberto de Aquiar, Eduardi Carlos Bianchi a Rubens Chinali Canarim se ve své práci *Monitoring of Grinding Burn by Acoustic Emission* zabývají výsledky statistických nástrojů a fuzzy modelování při broušení detekováním a digitálním zpracováním generovaných signálů akustické emise během procesu. [25]

## **Stručné shrnutí výsledků experimentu potvrzujících možnost použití celkového počtu impulzů ke sledování procesu obrábění**

Celkový počet emisních překmitů signálu akustické emise se jeví jako nejvhodnější k vyhodnocení stavu opotřebení řezného nástroje. **Tyto závěry mimo jiné shrnul ve své práci Ing. Jan Žižka, CSc. [1].** Akustická emise byla měřena při obrábění na horizontální obrázečce, a to z důvodu použití jednobřitého nástroje, který koná hlavní řezný pohyb. Dalším důvodem bylo pevné upnutí obrobku.

- Po provedených experimentech lze doporučit sledování stavu řezného nástroje měřeními akustické emise v pásmu frekvencí 0,3 až 1 MHz.
- Čím je více (Čím více je) nástroj opotřeбенý, tím se zvětšuje počet impulzů AE.
- S kladnějším úhlem čela řezného nástroje klesá počet impulzů nástroje. Tento jev je doprovázen poklesem koeficientu tření.
- Vlastnosti materiálu nástroje nijak zásadně neovlivňují počet impulzů akustické emise.
- Vlastnosti materiálu obrobku ovlivňují počet impulzů akustické emise.
- S hloubkou řezu v podstatě stoupá počet impulzů akustické emise. Průběh je však ovlivněn vlastnostmi materiálu obrobku, konstrukcí a také geometrií řezného nástroje.
- Minimální počet impulzů akustické emise sledujeme při řezných podmínkách bez vibrací a tvorby nárůstu.
- S řeznou rychlostí se mění počet impulzů akustické emise. Při velmi nízkých rychlostech klesá a dosahuje svého minima. Při nižších a středních rychlostech stoupá a dosahuje svého maxima a s dalším růstem řezné rychlosti klesá. Při rychlostech nad 400 m/min přestává být signál akustické emise detekován.
- Fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu a jejich závislost na teplotě ovlivňují signál akustické emise.

## 5 Rovinné broušení

Rovinné broušení je jednou z dokončovacích operací, při které jsou obráběny rovinné plochy. Podle způsobu práce se rozdělují na další skupiny. Podle způsobu práce se rozdělují na brusky pracující obvodem či čelem brousícího kotouče, podle osy vřeteny pak na brusky vodorovné a svislé). [17]

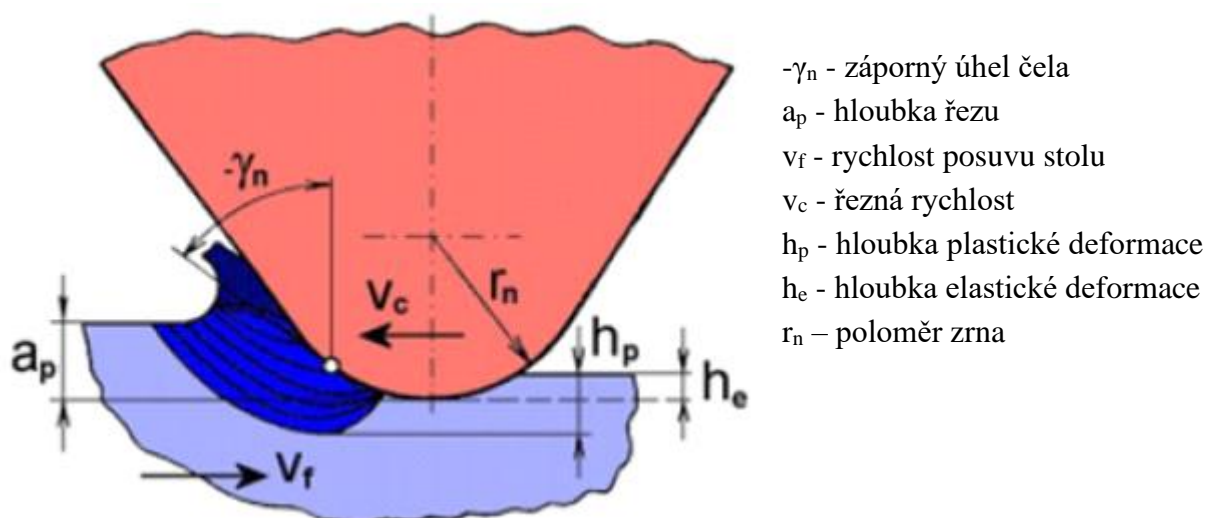
Pro experiment v této práci byla konkrétně použita rovinná bruska vodorovná pracující obvodem brusného kotouče s kyvadlovým neboli vratným pohybem stolu, kdy po každém podélném pohybu stolu následuje příčný posuv stolu a poté znovu pohyb podélný v opačném směru. Upnutí obrobků se provádí na magnetickou desku umístěnou na pracovním stole.

U rovinné brusky použité pro experiment je hlavní řezný pohyb rotační vykonávaný nástrojem. Vedlejší pohyb je posuv, který vykonává stůl s obrobkem, a přísuv, který vykonává nástroj. Přísuv udává hloubku řezu.

Nástroj používaný pro rovinné broušení je brusný kotouč zvolený o různých rozměrech dle parametrů stroje a také vůči požadavkům na obrobek. Brusný kotouč se skládá ze zrn brusiva a pojiva, které je drží pohromadě. Brusná zrna jsou nerovnoměrně rozmístěna v celém brusném kotouči. Díky tomu se jedná o mnohobřítý nástroj s nedefinovanou geometrií řezných hran. [18]

Charakteristickými znaky brousícího kotouče jsou: druh brusiva, pojivo, zrnitost, tvrdost, geometrický tvar a velikost. [18]

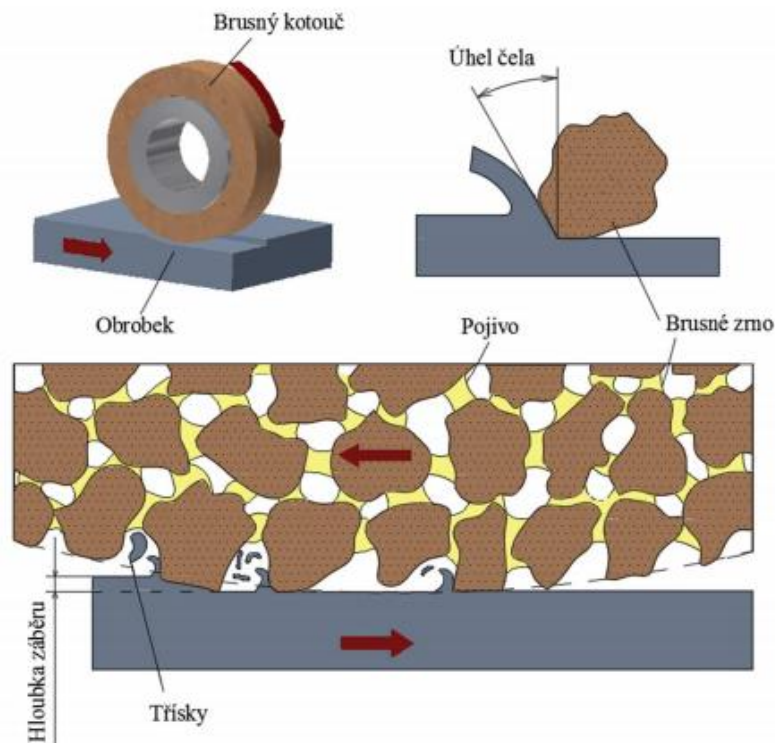
Při broušení vznikají jiskry, což jsou v podstatě drobné třísky neboli roztavené částice obráběného materiálu. Třísky jsou charakterizovány malým průřezem, asi  $10^{-3} \text{ mm}^2$ . Broušení je tedy mikrořezání povrchu obrobku zrní brusiva a proces probíhá při značných řezných rychlostech nejčastěji do 50 m/s. [18, 19]



Obrázek 11: Úhly jednotlivých zrn brusiva (Zdroj: [19])



Tříška je odebírána nepravidelně, a to z důvodu nepravidelného rozmístění a různých geometrických forem zrn v brousícím kotouči. [19]



Obrázek 12: Princip broušení (Zdroj: [20])

Oblast primární plastické deformace ovlivňují především záporné úhly čela jednotlivých zrn, které jsou obvykle velké. Zrna nejsou schopna přenášet velké řezné síly kvůli slabému upevnění zrn pojivem. [19]

**Nesousledné broušení** - podélný směr posuvu stolu je opačný než směr rotace nástroje

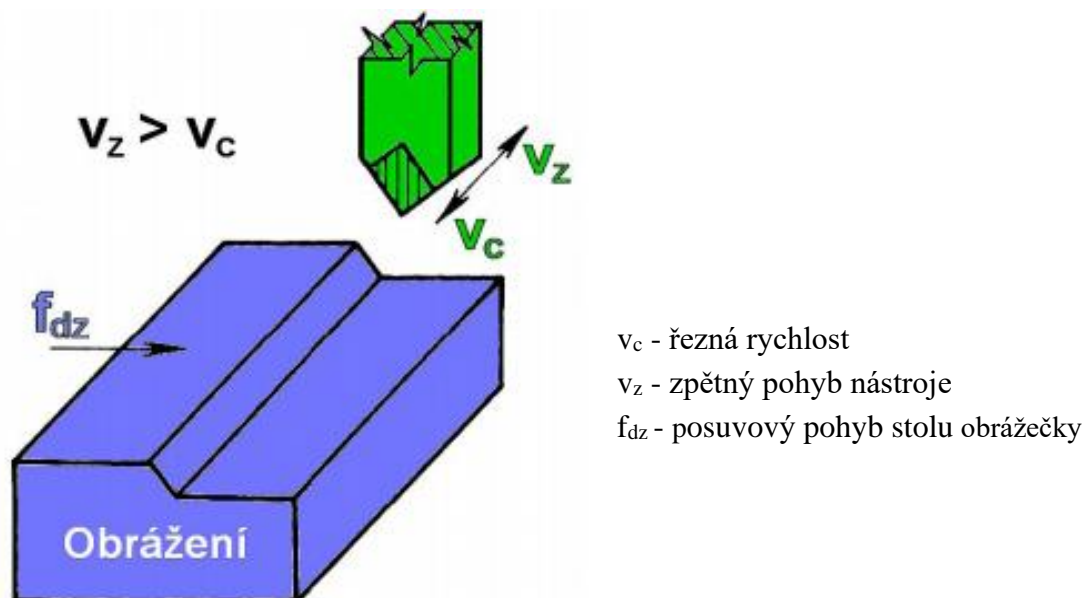
**Sousledné broušení** - podélný směr posuvu stolu je stejný jako směr rotace nástroje

## 6 Horizontální obrázení

Horizontální obrázení se používá pro obrábění rovinných ploch (vodorovných i šikmých) jednobřitým nástrojem. Charakteristickým pohybem horizontálního obrázení je vodorovný pohyb smykadla, ve kterém je upnut nástroj. Pohon smykadla může být hydraulický nebo mechanický. Posuvový pohyb stolu, na němž je upnut obrobek, je odvozen od pohybového šroubu přes rohatku a západku. [22]

Hlavní řezný pohyb je přímočarý vratný a vykonává ho nástroj. Posuvový pohyb stolu s obrobkem je přerušovaný, probíhá vždy na konci pracovního dvojzdvihu, přičemž je kolmý na směr hlavního řezného pohybu. Nevýhodou je zpětný pohyb vykonávaný nástrojem. Při tomto pohybu nevykonává nástroj žádný úběr třísky z obrobku. Tato skutečnost snižuje efektivitu obrábění. Aby se nevýhoda alespoň trochu vykompenzovala, jsou obrážečky konstruovány tak, aby rychlost zpětného pohybu byla vyšší než rychlost řezného pohybu. [22]

Obrázek 13 představuje kinematiku řezného procesu.



Obrázek 13: Kinematika řezného procesu při obrázení (Zdroj: [19])

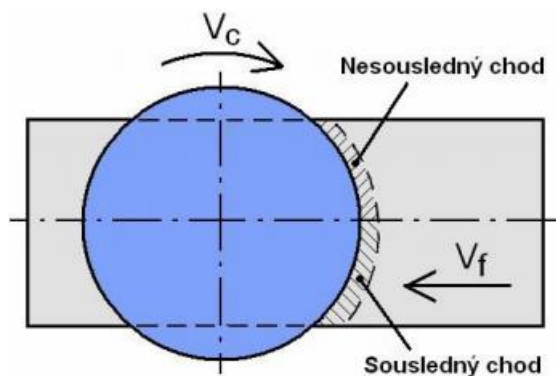
Pro obrázení se používají obrážecí nože různých typů a velikostí. Pro experiment v této práci byl však použit hoblovací nůž, který je definován níže v podkapitole metodika měření při horizontálním obrázení.

## 7 Vertikální frézování

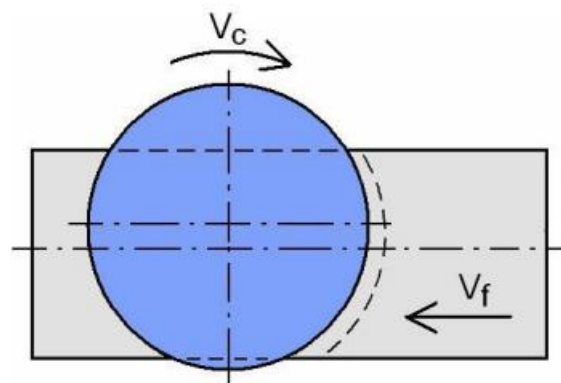
Vertikální frézování patří mezi nejrozšířenější metody obrábění. Velká výkonnost při dosažení dobrých kvalit povrchu obrobku je velkou předností. Při frézování je obráběcí proces přerušovaný a každý břit při něm odřezává třísky proměnné tloušťky. Hlavní pohyb při frézování je rotační, který vykonává nástroj. Vedlejší pohyb je posuv, který vykonává stůl s obrobkem, a je obvykle přímočarý. [19]

Jelikož je osa nástroje kolmá na obráběnou plochu, jedná se o frézování čelní, tedy čelem nástroje. Hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje. [19]

Čelní frézování se rozděluje na symetrické a nesymetrické. V případě symetrického frézování je osa frézy shodná s osou obráběné plochy. U nesymetrického frézování je osa frézy mimo osu obráběné plochy. Čelní frézování není dále přímo rozdělováno na sousledné a nesousledné, jelikož dochází k oběma jevům současně.



Obrázek 14: Symetrické frézování  
(Zdroj: [23])



Obrázek 15: Nesymetrické frézování  
(Zdroj: [23])

$v_{cf}$  - řezná rychlost frézky

$v_{ff}$  - posuvová rychlost (stolu) frézky

## 8 Experimentální měření

### 8.1 Cíl měření

Cílem měření je prozkoumání emisního RMS signálu, změření jeho napětí a vyhodnocení při změně rezných podmínek, dále pak prozkoumání záznamu z vysokorychlostní kamery a případné spojení některých jevů s RMS signálem a rovněž porovnání technologií z hlediska geometrie nástroje a jejich vlivu na signál akustické emise.

Měření proběhlo při technologiích:

- Rovinné broušení - nedefinovaná geometrie
- Horizontální obrážení - jeden břit
- Vertikální frézování - více břitů

### 8.2 Metodika měření

Měření bylo uskutečněno v areálu Západočeské univerzity v Plzni v budově Fakulty strojní v laboratořích Katedry technologie obrábění. Měření a vyhodnocení akustické emise probíhalo ze střední kvadratické úrovně signálu, tedy z napětí emisního RMS signálu.

Měření probíhalo na strojích:

- Rovinná bruska BERNARDO BSG 2550 AHD
- Horizontální obrázečka STRIGON GH 560/U
- Vertikální frézka TOS FNGJ 20

### 8.2.1 Měřicí systém

Již v úvodu bylo zmíněno, že signál AE má vysoké vzorkovací frekvence, které nejsme schopni použitým měřicím systémem zpracovat. Proto byl zpracován a vyhodnocen snadněji zpracovatelný emisní signál RMS.

Pro detekci akustické emise byl použit měřicí systém od firmy KISTLER. Skládá se z univerzálního systému sběru dat v kombinaci s DynoWare (typ 5697A), 1-kanálové piezotronové spojky pro akustické emise s vestavěným RMS převodníkem (typ 5125C0), který se používá k napájení senzoru a ke zpracování signálu. Důležitou součástí je také piezoelektrický snímač akustické emise (typ 8125C1050000), který byl v tomto měření přimontován pomocí šroubu M5 přímo na obráběný polotovár.



Obrázek 16: Použitý měřicí systém pro detekci akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ)

Piezoelektrický snímač akustické emise se skládá z pouzdra senzoru (15 x 16 x 23,5 mm) piezoelektrického snímacího prvku a zabudovaného převodníku. Pouzdro senzoru je vyrobeno z nerezové oceli. Snímací prvek je vyroben z piezoelektrické keramiky a namontován na tenké ocelové membráně. Výstup ze snímače je zajištěn pomocí opleteného kabelu.



Obrázek 17: Piezoelektrický snímač AE (Zdroj: VLASTNÍ)

Filtry konkrétní 1 - kanálové piezotronové spojky pro akustické emise s vestavěným RMS převodníkem (typ 5125C) jsou v rozsahu od 50 kHz - 1 MHz. Pro tento experiment byl použit filtr typu 5327A500 s frekvencí 500 kHz.

Časová konstanta pro tento typ je v rozmezí 0,12 ms - 25 ms. Pro tento experiment byla použita časová konstanta typu 5328A0.112 s integrovanou časovou konstantou 0,12 ms.

Časová konstanta lze tedy měnit výběrem modulu RMS. Integrace časové konstanty  $\tau$  určuje čas, za který se vytvoří hodnota střední kvadratické úrovně. Níže je uvedena rovnice hodnot RMS (jak RMS signál vzniká).

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_{AE}^2 * dt}$$

$U_{RMS}$  - napětí za RMS převodníkem

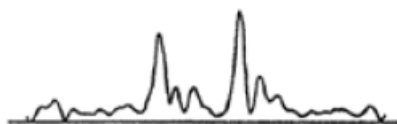
$U_{AE}$  - napětí za filtrem

**AE výstup (filtr)** - příklad signálu za filtry pásma propustnosti 50 kHz - 1 MHz



Obrázek 18: AE signál za filtry (Zdroj: [13])

**AE výstup (RMS)** - příklad signálu za převodníkem RMS pro  $\tau = 1,2$  ms



Obrázek 19: Ae signál za RMS převodníkem (Zdroj: [13])

Tyto informace o měřícím systému jsou získány z dodaných manuálů při jeho koupi, nebo také z internetových stránek firmy KISTLER, manuál pro daný měřicí systém. Zdroj: [13]

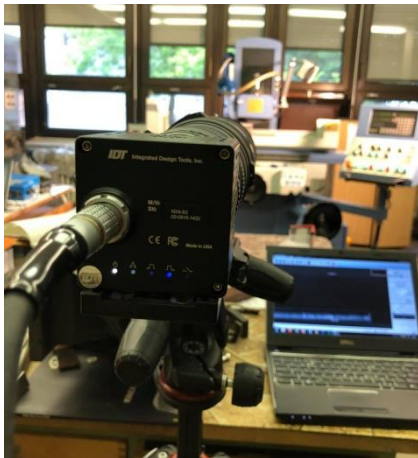
## 8.2.2 Vysokorychlostní kamera

Pro zefektivnění pozorování procesu obrábění a případnou pomoc vyhodnocení RMS signálu bylo využito pro všechny technologie natáčení krátkého záznamu na vysokorychlostní kameru.

Obtížným úkolem bylo nastavení pozice vysokorychlostní kamery. Při rovinném broušení a vertikálním frézování byla kamera nastavena na pozici snímání řezného nástroje, jelikož se nástroj při procesu řezání neposunoval. Hlavní řezný pohyb u těchto technologií je rotační. Vedlejší pohyb, tedy posuv, vykonával obrobek. Po každém měření, tedy obrobení, bylo nutno zaostřovat pro lepší kvalitu záznamu. Dále se musela pozice kamery nastavit tak, aby dobře snímala odvod třísky, a to hlavně při vertikálním frézování.

Při vodorovném obrázení sice hlavní řezný pohyb vykonává také nástroj, ale jeho pohyb není rotační, nýbrž přímočarý vratný (pohybuje se). Proto byla kamera nastavena na pozici snímání obrobku, který se pohyboval pouze přísuvem.

Konkrétně byla použita vysokorychlostní kamera od společnosti Integrated Design Tools, Inc. (IDT) označená NX4-S3 s APO telekonvertorem 2x EX DG a optickým stabilizátorem obrazu 70 - 200 mm 1:2,8 APO DG HSM od firmy SIGMA.



Obrázek 20: Vysokorychlostní kamera (Zdroj: VLASTNÍ)

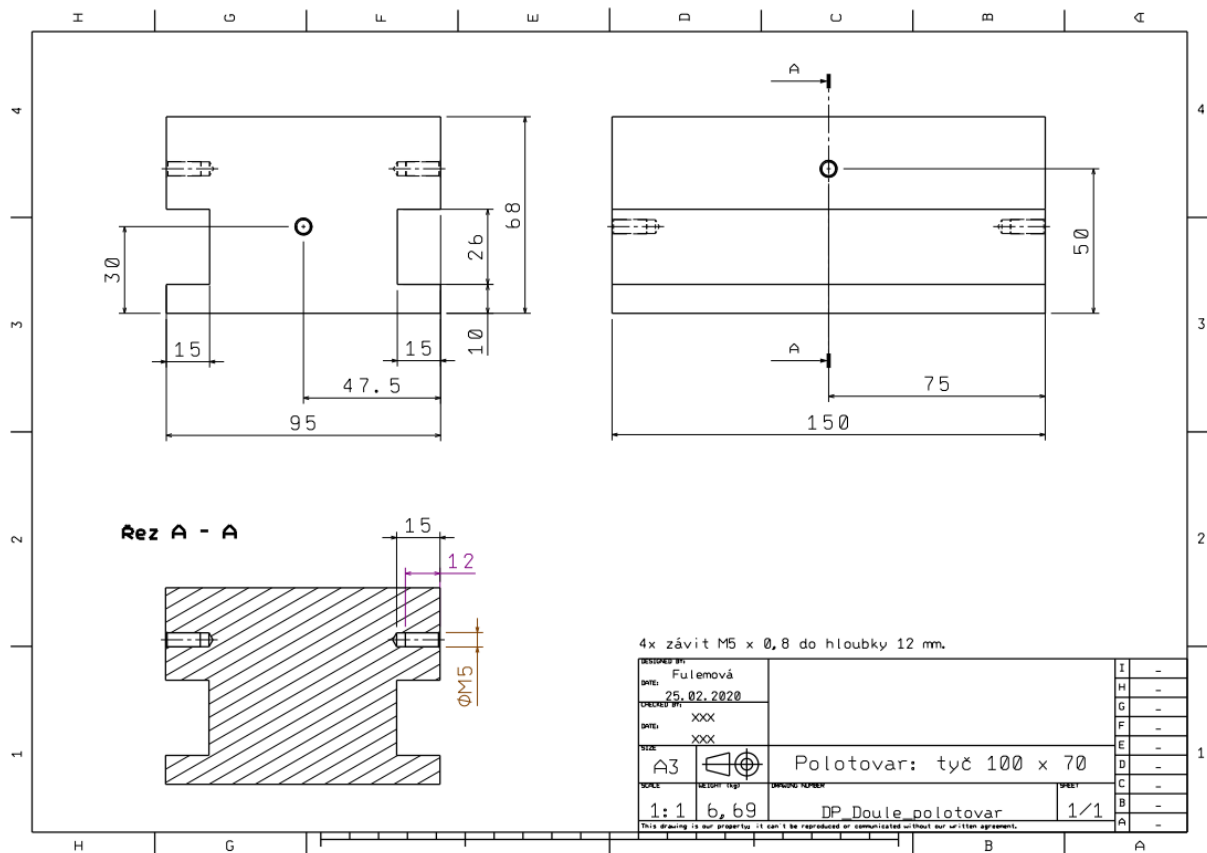


Obrázek 21: Vysokorychlostní kamera se zapojením (Zdroj: VLASTNÍ)

Aby byl záznam dobře čitelný, nebylo pro žádnou z použitých technologií použito chlazení emulzí ani jiné chlazení. Také proud emulze by mohl narušovat měření emisního RMS signálu.

### 8.2.3 Obrobek

Jako vzorek pro všechna měření byl použit předobrobený polotovár z oceli C45 (ČSN 12 050). Úběr materiálu probíhal vždy ze stejné strany polotovaru, a to v pořadí broušení, obrážení a frézování. Jelikož u všech použitých technologií vykonává hlavní řezný pohyb nástroj, nebylo možné snímač přimontovat přímo na nástroj. Při broušení a frézování je to pohyb rotační. Při hoblování je hlavní řezný pohyb přímočarý vratný, tudíž by nějaká možnost montáže snímače na nástroj byla. Nicméně pro zachování stejnorodosti měření byly do polotovaru vyvrtány celkem čtyři díry se závitem M5, do kterých se pomocí šroubu přimontoval snímač.



Obrázek 22: Výkres před obrobeného polotovaru z oceli C45 (Zdroj: Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.)

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle	0,42-	0,50-	0,17-	max.	max.	max.	max.	max.
ČSN	0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040

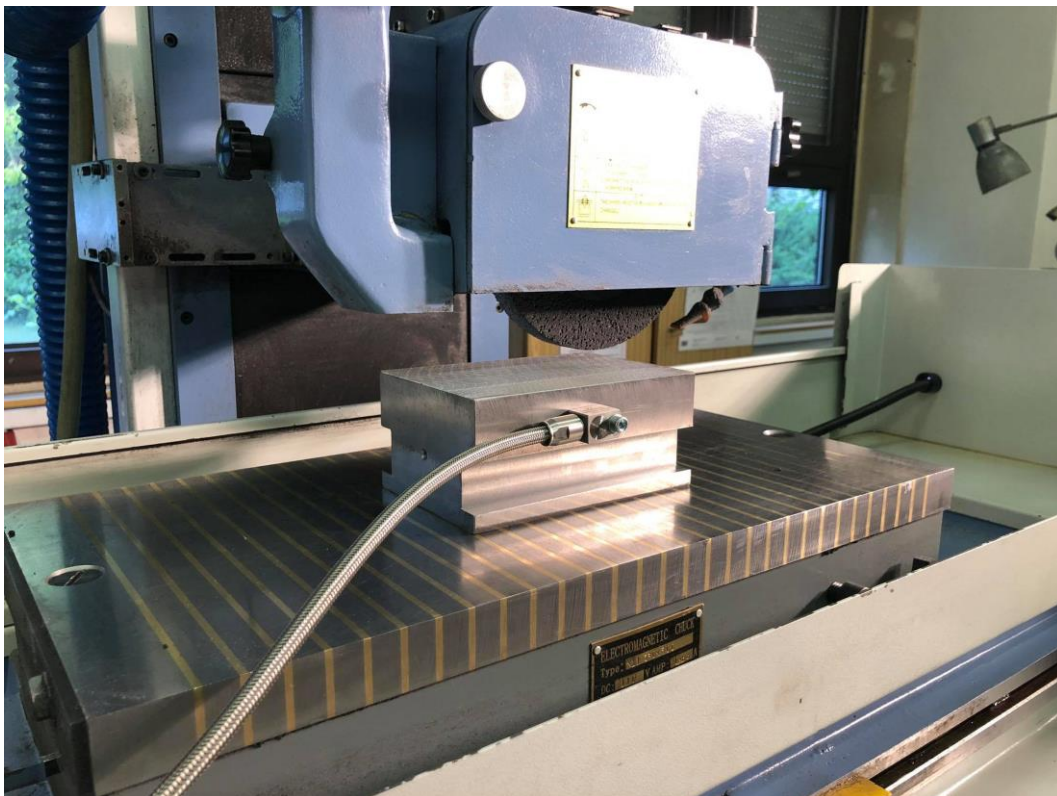
Tabulka 1: Chemické složení oceli C45 v % (Zdroj: [21])



## 8.3 Rovinné broušení – měření a vyhodnocení signálu RMS

### 8.3.1 Metodika měření při rovinném broušení

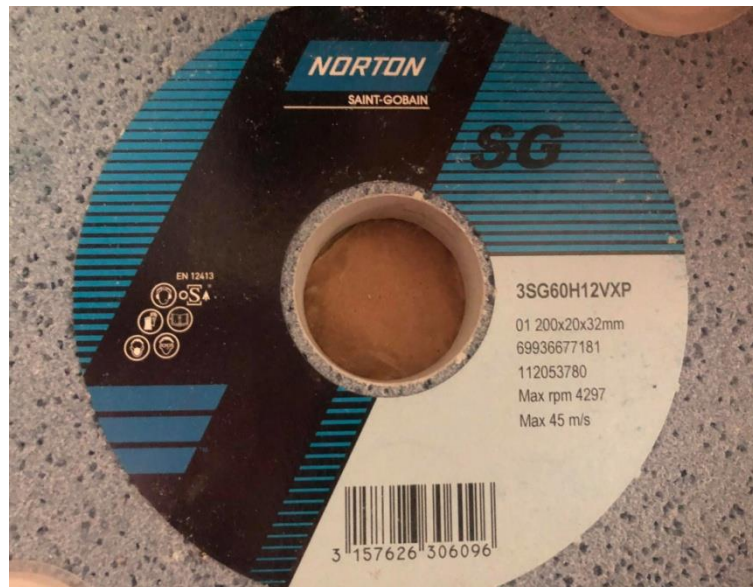
Broušení probíhalo na rovinné brusce BERNARDO BSG 2550 AHD za konstantní řezné rychlosti, konstantní rychlosti stolu (kyvný pohyb) a konstantního příčného přísuvu. Změny probíhaly v hloubce řezu (dle tabulky 3) a to tak, že se při dané hloubce řezu přebrousila celá plocha, i když už čas měření skončil. Při rovinném broušení se změnila hloubka řezu celkem pětkrát, a to po jedné setině milimetru. Přejezd brusného kotouče byl přes délku obrobku, tedy přes rozměr 150 milimetrů dle výkresu (obrázek 22). Před měřením se celá plocha přebrousila. Měření započalo vždy až při záběru brusného kotouče v jeho celé šířce. Jelikož je pohyb stolu a tudíž i obrobku, kyvadlový (vratný), jedná se o **sousledné** a **nesousledné** broušení. Měření vždy započalo před najetím brusného kotouče do obrobku - zahájení nesousledného broušení. Obrobek byl upnut na magnetickou desku. Měřicí systém byl nastaven na rozsah signálu 0-5 V. Délka záznamů na 10 s.



Obrázek 23: Upnutí obrobku na magnetickou desku rovinné brusky BERNARDO BSG 2550 AHD a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ)

Otáčky vřetene	$n_b = 1450$ ot/min
Rychlost stolu hydraulická	7-23 m/min
Automatický posuv příčný	0,1 - 8 mm/Hub
Šířka kotouče	$B_k = 20$ mm
Naměřený průměr brusného kotouče	$\text{Ø}D_k = 175$ mm

Tabulka 2: Technická data rovinné brusky BERNARDO BSG 2550 AHD, naměřené rozměry brusného kotouče (Zdroj: Technická příručka rovinné brusky BERNARDO)



Obrázek 24: Použitý brusný kotouč NORTON (Zdroj: VLASTNÍ)

Jako nástroj byl použit brusný kotouč NORTON s označením 3SG60H12VXP. Nový brusný kotouč má dle označení největší  $\text{Ø}200$  mm. Nicméně před měřením byl již brusný kotouč používán, proto musíme vycházet z naměřeného průměru brusného kotouče dle tabulky 2.

Z otáček vřetene ( $n_b$ ) a průměru kotouče ( $\text{Ø}D_k$ ) vypočteme řeznou rychlost.

$$\text{Řezná rychlost} - v_{cb} = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_b}{1000} \text{ [m/s]}; v_{cb} = \frac{\pi \cdot 175 \cdot 1450}{1000 \cdot 60} = 13,29 \text{ [m/s]}$$

$v_{cb}$  - řezná rychlost brusky

$D_k$  - naměřený průměr brusného kotouče

$n_b$  - otáčky vřetene brusky

Měření	Hloubka řezu $a_p$ [mm]
1	0,02
2	0,03
3	0,04
4	0,05
5	0,06

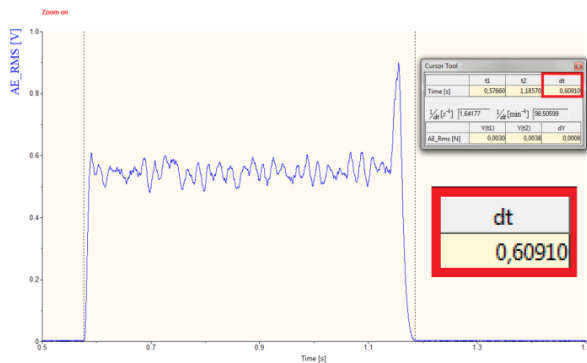
Tabulka 3: Řezné podmínky při rovinném broušení

Jelikož se u rovinné brusky BERNARDO BSG 2550 AHD rychlost stolu nastavuje hydraulicky, není možné z nastavení odečíst rychlost stolu, která je momentálně pro daný proces broušení nastavena. Známe pouze technická data, kde je uveden údaj rychlosti stolu v rozmezí 7-23 m/min.

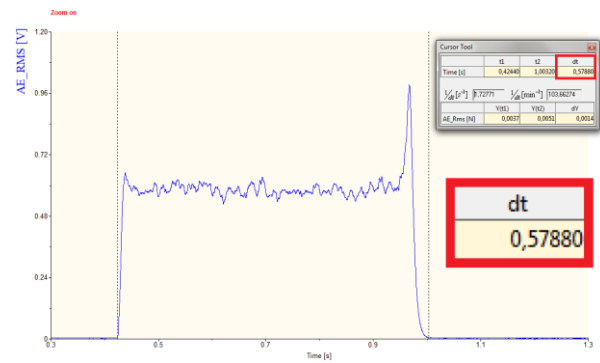
Při měření akustické emise, tedy emisního RMS signálu při rovinném broušení, bylo měření nastaveno po dobu 10 sekund. Brusný kotouč délkovou plochu za tuto nastavenou dobu přebrousil několikrát. Dané úseky signálu jsou viditelně rozděleny, neboť jak už bylo zmíněno, pohyb stolu je kyvadlový. Brusný kotouč do materiálu tedy najede a zase vyjede. Napětí signálu při nájezdu brusného kotouče do obrobku dosáhne určité hodnoty a podle podmínek procesu broušení se dále vyvíjí. Při vyjetí brusného kotouče z materiálu opět klesne, jelikož už nedochází k žádnému styku brusného kotouče s obrobkem. Tento proces se opakuje. Z grafu lze tudíž odečíst jednotlivé úseky a zjistit kolikrát brusný kotouč přešel délkovou plochu za nastavenou dobu.

### 8.3.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při rovinném broušení

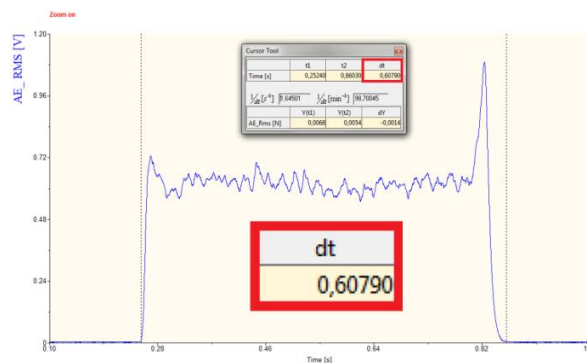
Ve vyhodnocovacím programu DynoWare jsou různé možnosti s naměřenými daty pracovat. Jednou z nich je i změření času trvání emisního RMS signálu (RMS napětí) jednotlivých úseků (přejezdů brusného kotouče). Za situace, kdy známe délku broušené plochy (150 mm) a čas, za který byla přebroušena v jednom přejezdu brusného kotouče, můžeme snadno dopočítat rychlost kyvadlové rychlosti stolu. Vypočtená rychlost nemůže být úplně přesná, kvůli nepřesnosti měření. Nicméně tato hodnota může být velice věrohodná.



Graf 1: Měření času úseku rovinného broušení při  $a_p = 0,02$  mm, zoom časového úseku 0,5-1,5 s



Graf 2: Měření času úseku rovinného broušení při  $a_p = 0,04$  mm, zoom časového úseku 0,3-1,3 s



Graf 3: Měření času úseku rovinného broušení při  $a_p = 0,06$  mm, zoom časového úseku 0,0-1,0 s

Ze shora uvedených grafů 1, 2 a 3 změříme hodnotu časových úseků po dobu, kdy byl emisní RMS signál zaznamenan. Pro změření časů byly vybrány první časové úseky v grafech při hloubce řezu  $a_p = 0,02$  mm,  $a_p = 0,04$  mm,  $a_p = 0,06$  mm (tabulka 4). Sečtením těchto časových hodnot a vydělením jejich počtem dle následujících vzorců, získáme průměrnou časovou hodnotu zaznamenaných signálů. Jak už bylo zmíněno, známe délku broušené plochy, a pokud tedy známe i průměrnou časovou hodnotu, lze snadno dopočítat kyvadlovou rychlost stolu.

Měření	Hloubka řezu $a_p$ [mm]	Naměřená hodnota času [s]
1	0,02	0,60910
3	0,04	0,57880
5	0,06	0,60790
<b>Průměrná časová hodnota [s]</b>		<b>0,5986</b>

Tabulka 4: Naměřené hodnoty času při rovinném broušení při různých hloubkách řezu

$$\frac{v_{fb}}{l_o} = \frac{60}{t_{p\check{c}h}} \Rightarrow v_{fb} \text{ [mm/min]}$$

$v_{fb}$  - kyvadlová rychlost posuvu stolu

$l_o$  - délka broušené plochy obrobku

$t_{p\check{c}h}$  - naměřená průměrná časová hodnota

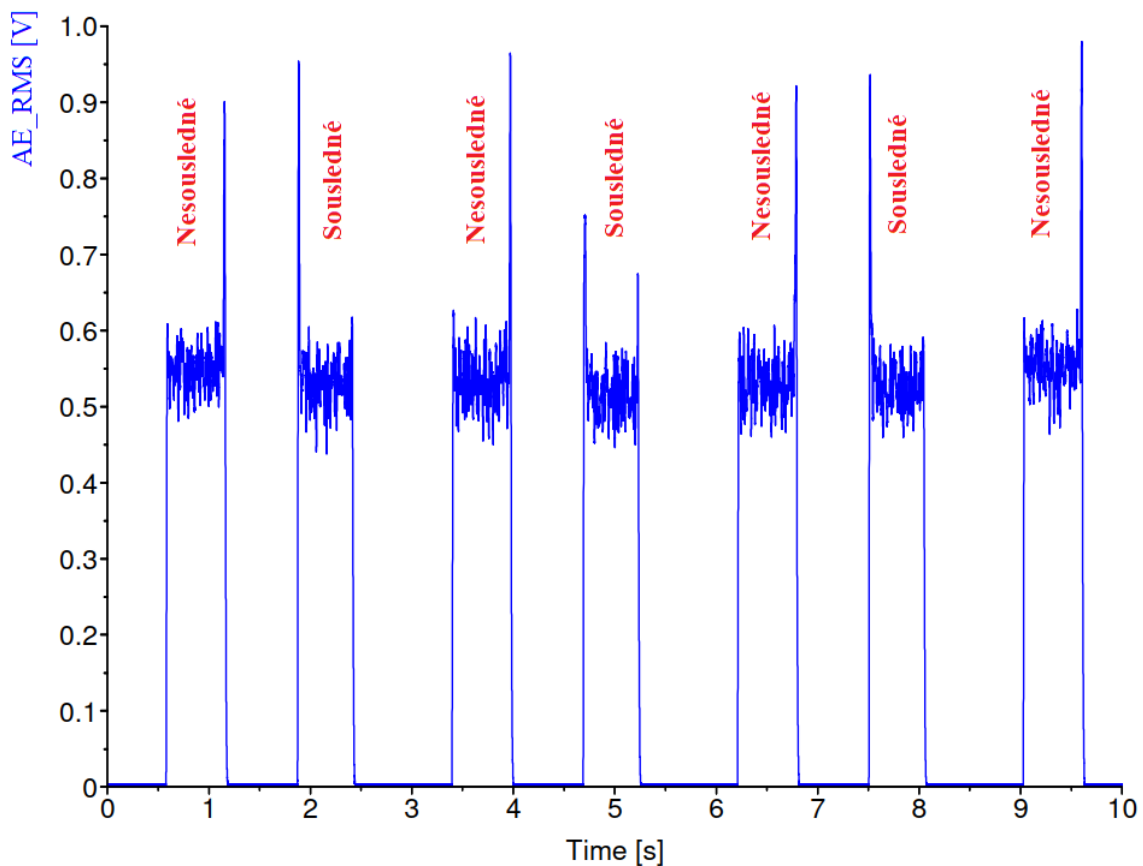
60 - čas 1 minuty v sekundách (pro výpočet)

$$\frac{v_{fb}}{150} = \frac{60}{0,5986} \Rightarrow v_{fb} = \frac{60}{0,5986} * 150 \Rightarrow v_{fb} = 15\,035 \text{ [mm/min]}$$

$$v_{fb} = 15,035 \text{ [m/min]}$$

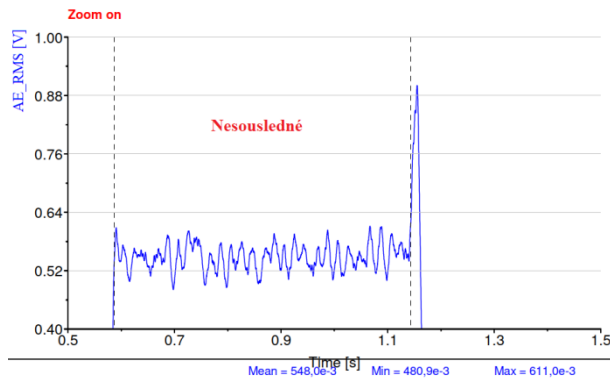
Na grafu 4 jsou zobrazeny jednotlivé úseky přejezdů brusného kotouče, tedy času trvání emisního RMS signálu. Úseků je celkem sedm. Z toho čtyři úseky jsou měřeny při nesousledném rovinném broušení a tři úseky při sousledném rovinném broušení. Nicméně četnost úseků není podstatná, může být vždy odlišná díky časové prodlevě spuštění měření.

Pokud zanedbáme největší píky napětí emisního RMS signálu, je z grafu 4 dále zřejmé, že průměrná hodnota emisního RMS signálu je při nesousledném rovinném broušení vyšší (chybí čárka) nežli u sousledného rovinného broušení. Tuto skutečnost potvrzuje i zoom na dané časové úseky s následným změřením hodnot napětí emisního RMS signálu v daných úsecích dle následujících grafů.

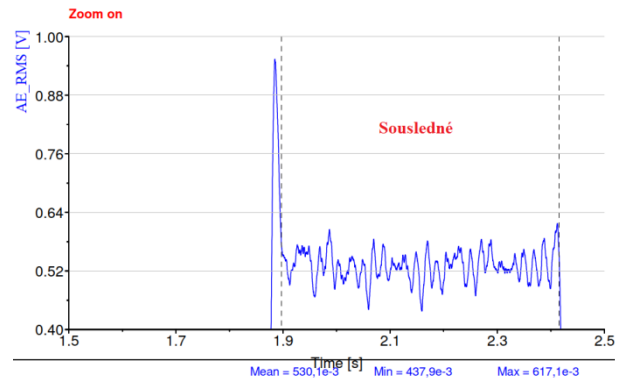


Graf 4: Rovinné broušení při  $a_p = 0,02$  mm, časový úsek 0-10 s

Při nesousledném rovinném broušení – graf 5 – odečteme průměrnou hodnotu RMS signálu 0,5480V. Při sousledném rovinném broušení – graf 6 – odečteme průměrnou hodnotu RMS signálu 0,5301V. Průměrná hodnota RMS signálu při nesousledném rovinném broušení je vyšší než při sousledném rovinném broušení. Abychom tuto skutečnost potvrdili, porovnáme hodnoty z dalších měření při stejném i větším úběru třísky  $a_p$ .



Graf 5: Rovinné broušení nesousledné při  $a_p = 0,02$  mm, zoom časového úseku 0,5-1,5 s



Graf 6: Rovinné broušení sousledné při  $a_p = 0,02$  mm, zoom časového úseku 1,5-2,5 s

Graf 5 a 6 slouží jako předloha pro nastínění měření. Další grafy měření pro rovinné broušení jsou k nalezení v přílohách.

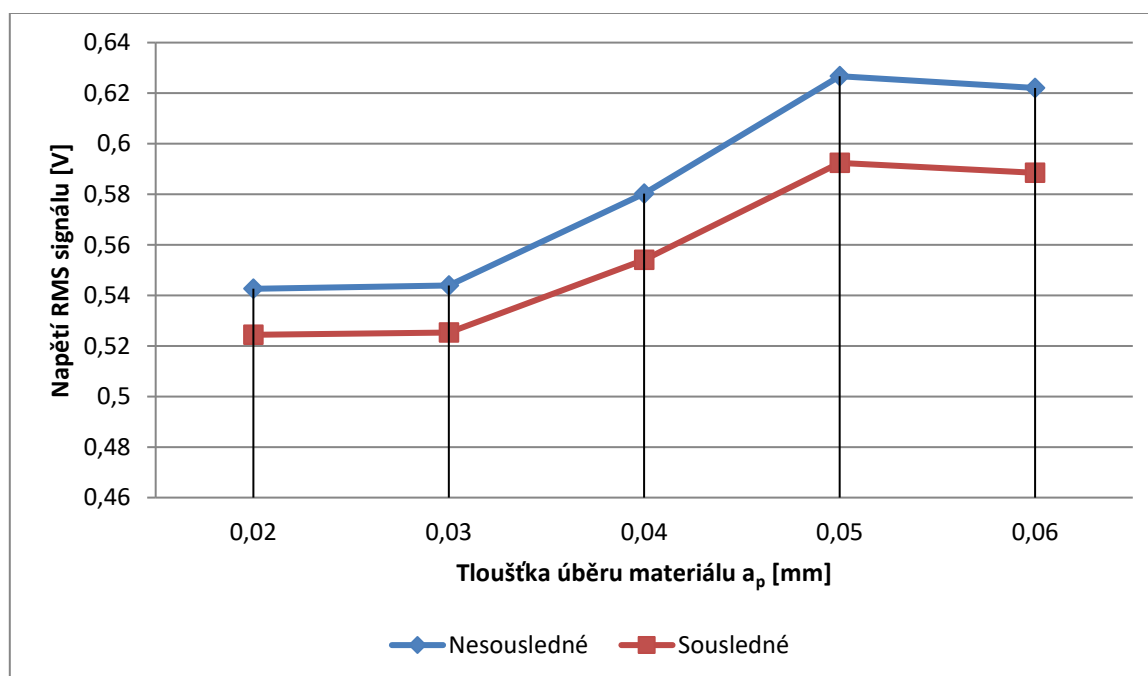
$a_p$ [mm]	0,02		0,03	
Smysl broušení	Nesousledné	Sousledné	Nesousledné	Sousledné
Naměřené střední hodnoty [V]	0,5480	0,5301	0,5577	0,5313
	0,5361	0,5161	0,5388	0,5224
	0,5319	0,5271	0,5371	0,5222
	0,5545	x	0,5419	x
<b>Průměrná hodnota [V]</b>	<b>0,5426</b>	<b>0,5244</b>	<b>0,5439</b>	<b>0,5253</b>

Tabulka 5: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro hloubku řezu  $a_p = 0,02$  a  $0,03$  mm.

$a_p$ [mm]	0,04		0,05		0,06	
Smysl broušení	Nesousledné	Sousledné	Nesousledné	Sousledné	Nesousledné	Sousledné
Naměřené střední hodnoty [V]	0,5831	0,5636	0,6323	0,5954	0,6200	0,5891
	0,5791	0,5492	0,6200	0,5905	0,6289	0,5896
	0,5782	0,5563	0,6320	0,5981	0,6204	0,5837
	0,5807	0,5468	0,6224	0,5857	0,6188	0,5915
<b>Průměrná hodnota [V]</b>	<b>0,5803</b>	<b>0,5540</b>	<b>0,6267</b>	<b>0,5924</b>	<b>0,6220</b>	<b>0,5885</b>

Tabulka 6: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro hloubku řezu  $a_p = 0,04$ ;  $0,05$  a  $0,06$  mm.

V tabulce 5 při hloubce řezu  $a_p = 0,02$  a  $0,03$  mm nejsou uvedeny poslední naměřené údaje při sousledném broušení. Stalo se tak z důvodu předčasného spuštění měření.



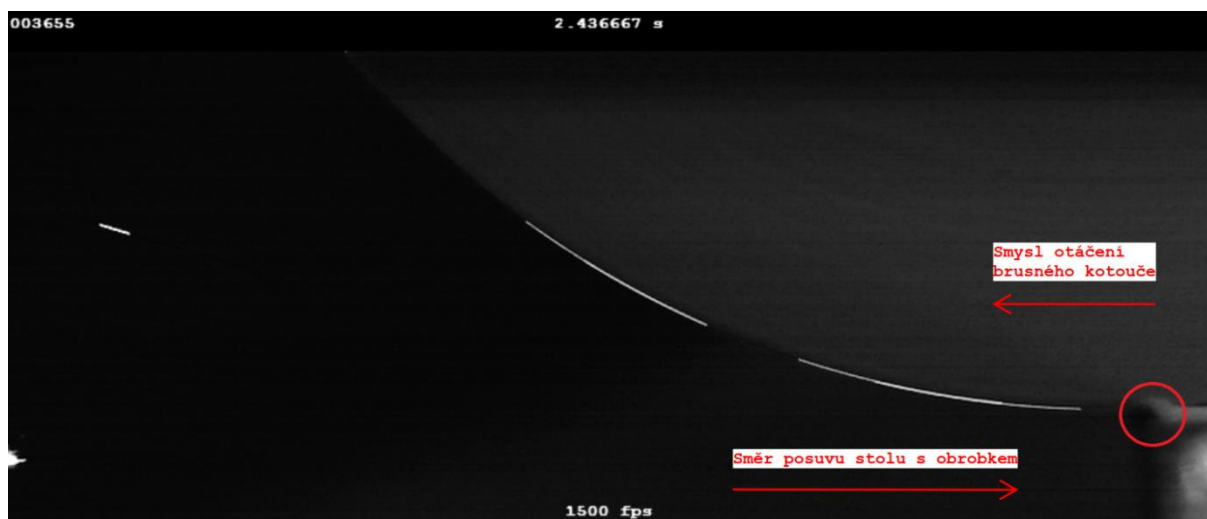
Graf 7: Vliv hloubky řezu  $a_p$  na průběh napětí při nesousledném a sousledném broušení



Po porovnání středních hodnot napětí z grafu 7 je patrné, že při nesousledném rovinném broušení je dosaženo vyšších hodnot emisního RMS signálu, než je tomu při sousledném rovinném broušení, a to při každé změně hloubky řezu. Tento následek je při nesousledném rovinném broušení nejspíše vyvolán většími plastickými deformacemi materiálu v místě řezu.

Z hloubky řezu  $a_p = 0,02$  mm na  $a_p = 0,03$  mm se dá pozorovat mírný nárůst napětí, a to jak při nesousledném, tak i sousledném rovinném broušení. Dále pak při zvýšení hloubky řezu na  $a_p = 0,04$  mm se napětí zvýší skokově, to samé platí pro  $a_p = 0,05$  mm. Pokud bude sledován rozdíl napětí mezi nesousledným a sousledným rovinným broušením, je vidět, že napětí RMS signálu při zvyšování úběru materiálu roste souběžně, ale zároveň se hodnoty napětí začínají více lišit. Zajímavou se stala hodnota hloubky řezu  $a_p = 0,06$ . Zde nastal mírný pokles napětí v obou případech. Další měření při stejných podmínkách a při zvětšování hloubky řezu by nám odhalilo, zda tento pokles napětí bude pokračovat nebo se jedná pouze o odchylku v měření. Také je tu možnost, že se při těchto hodnotách hloubky řezu stává řez stabilnějším, tudíž hodnoty napětí budou klesat až do kritického bodu. Poté, při dalším zvětšování hloubky řezu až na určitou hodnotu, bude napětí opět mírně nebo dokonce skokově růst.

Při vyhodnocení byly zanedbány největší píky napětí emisního RMS signálu a to z důvodu správnosti vyhodnocení. Tyto píky se objevují pouze při přejetí brusným kotoučem u jednoho okraje obrobku. U druhého okraje obrobku se vyskytují také, nicméně s mnohem menším napětím. Důvodem tohoto jevu může být malý otřep na hraně obrobku, který při vyjíždění i najíždění brusného kotouče do obrobku způsobí odchylku v signálu. Možný otřep znázorněn na obrázku 25.

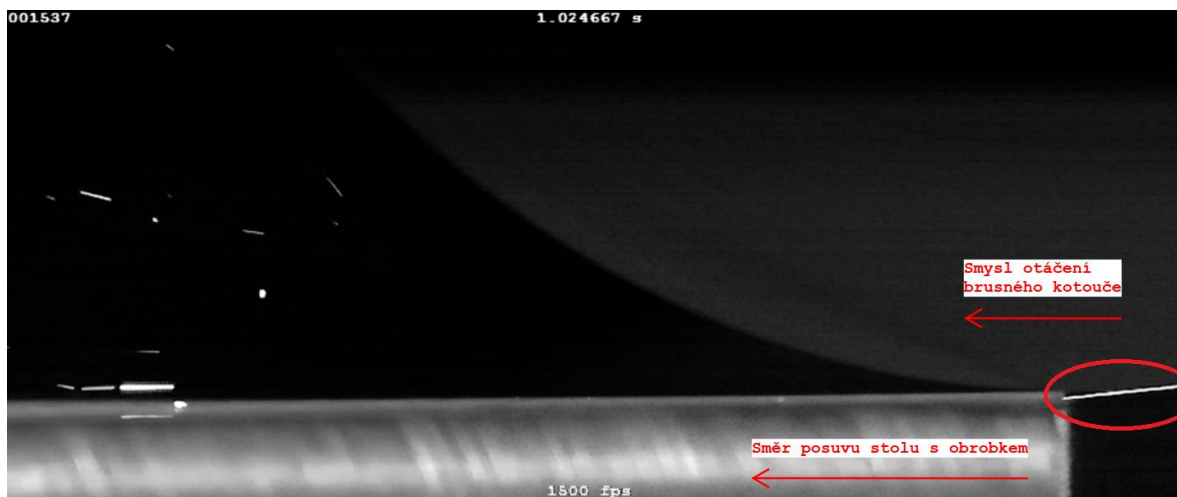


Obrázek 25: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při nesousledném rovinném broušení,  $a_p = 0,04$  mm (Zdroj: VLASTNÍ)

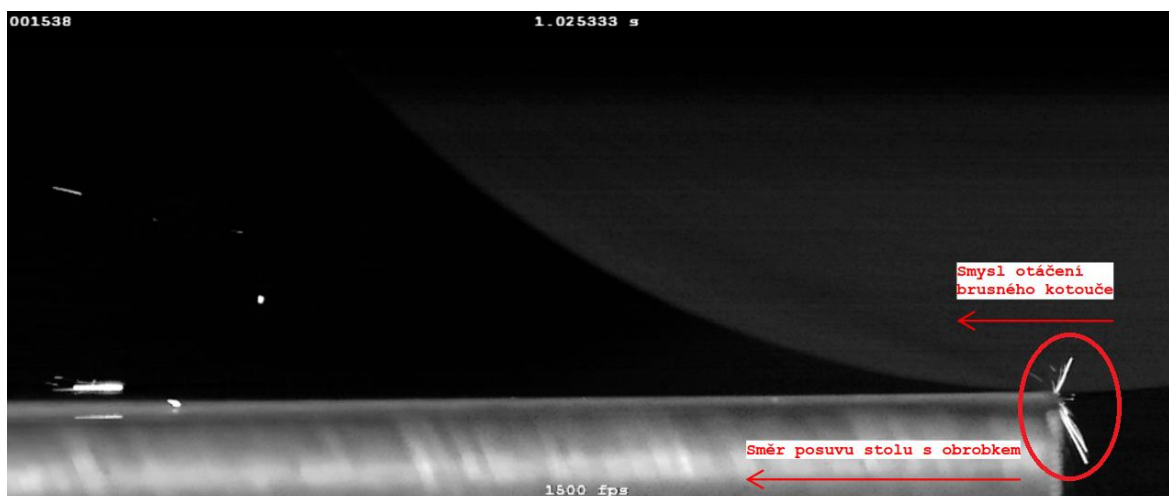
Dalším důvodem mohou být pružné deformace materiálu. Při nesousledném rovinném broušení se brusný kotouč točí směrem proti posuvu stolu s obrobkem. Na konci obrobku, když z něho vyjíždí brusný kotouč, mohou pružné deformace materiálu při uvolnění sil, a tudíž uvolnění pružných deformací, způsobit takzvané zpětné naražení materiálu do brusného kotouče a způsobit odchylku v signálu.

Při nájezdu brusného kotouče do obrobku, tentokrát už započítím sousledného rovinného broušení, můžeme v grafu opět pozorovat vysoký nárůst napětí. Tato odchylka bude nejspíše způsobena stejnými důvody jako při nesousledném rovinném broušení anebo dokonce jejich kombinací. Pro zjištění, zda tyto odchylky měření způsobuje ořep, by se mohl při dalším možném měření ořep vždy odstranit při každém přejetí brusného kotouče.

Výjezd brusného kotouče z obrobku při sousledném rovinném broušení ukazuje v grafu opět menší nárůst napětí. Na obrázcích 26 a 27 můžeme vidět možnou příčinu této odchylky.



Obrázek 26: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při sousledném rovinném broušení,  $a_p = 0,04 \text{ mm}$  – první část (Zdroj: VLASTNÍ)



Obrázek 27: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při sousledném rovinném broušení,  $a_p = 0,04 \text{ mm}$  – druhá část (Zdroj: VLASTNÍ)

Brusný kotouč má geometrii břitu tvořenou zrny nepravidelného tvaru a rozmístění. Tudiž tato odchylka v měření může být způsobena naražením některých zrn do materiálu při výjezdu brusného kotouče z obrobku i odváděnou třískou.

## 8.4 Horizontální obrázení – měření a vyhodnocení signálu RMS

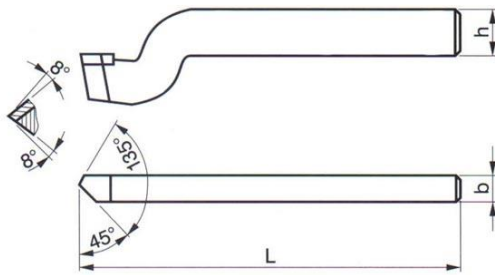
### 8.4.1 Metodika měření při horizontálním obrázení

Obrázení probíhalo na horizontální obrázečce STRIGON GH 560/U za proměnlivé řezné rychlosti. Změny probíhaly také v hloubce řezu (tabulka 7). Vedlejší posuv stolu s obrobkem (do záběru) je dán úvrátí smykadla a odvozuje se od jeho pohybu táhlem se západkou. Před zahájením měření byla již plocha pro obrobení připravena z předchozí operace rovinného broušení. Při horizontálním obrázení se změnila hloubka řezu celkem třikrát, a to po jedné desetíně milimetru. Řezná rychlost se měnila pro každou hloubku řezu dvakrát. Při horizontálním obrázení se neobrážela celá plocha na jednu hloubku řezu. Když skončil daný čas pro měření, stroj se zastavil, změnila se hloubka řezu nebo řezná rychlost a pokračovalo se v dalším měření. Měření vždy započalo před najetím obrázečícího nože do obrobku. Přejezd obrázečícího nože byl přes šířku obrobku, tedy přes rozměr 95 milimetrů dle výkresu (obrázek 22). Obrobek byl upnut na pracovní stůl pomocí upínek, jejichž použití bylo snadné, jelikož v obrobku byly již přichystány drážky pro jeho uchycení. Měřicí systém byl nastaven na rozsah signálu 0 - 0,5 V. Délka záznamů na 10 s.



Obrázek 28: Upnutí obrobku na pracovní stůl horizontální obrázečky STRIGON GH 560/U pomocí upínek a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ)

Jako obrážecí nástroj byl použit hoblovací nůž pravý z rychlořezné oceli o rozměrech  $L = 250 \text{ mm}$ ,  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $h = 25 \text{ mm}$  s neutrálním úhlem čela.



Obrázek 29: Rozměry hoblovacího nože  
(Zdroj: [14])



Obrázek 30: Detail použitého hoblovacího nože (Zdroj: VLASTNÍ)

Jednotlivé podmínky řezu při určitých měřeních pro horizontální obrážení jsou uvedeny v následující tabulce 7. Veškeré grafy k horizontálnímu obrážení jsou k nalezení v přílohách.

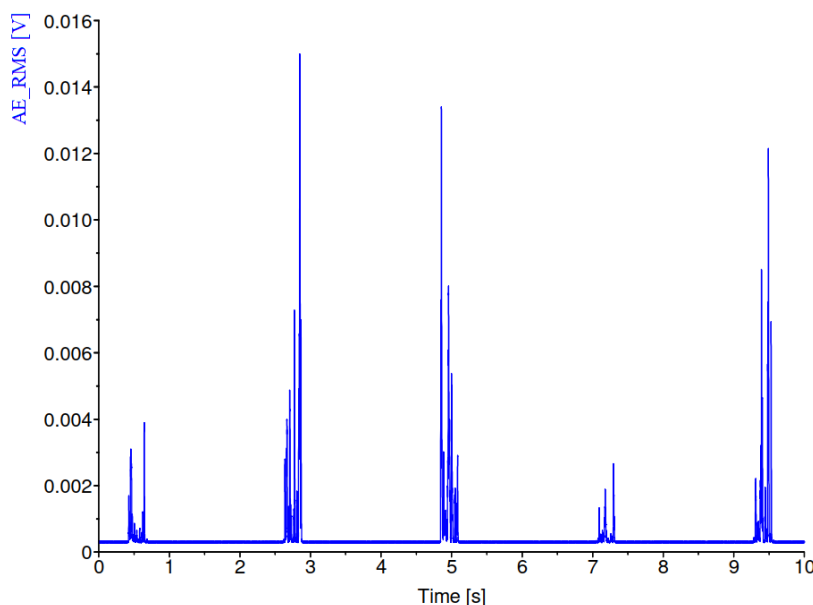
Hloubka řezu $a_p$ [mm]	0,1		0,2		0,3	
$v_{co}$ [m/min]	25		25		25	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
$v_{co}$ [m/min]	35		35		35	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření

Tabulka 7: Řezné podmínky při horizontálním obrážení

Při měření akustické emise, tedy emisního RMS signálu při horizontálním obrážení, bylo měření nastaveno po dobu 10 sekund. Hoblovací nůž plochu přes šířku obrobku za tuto nastavenou dobu obrobil několikrát. Se zvyšováním řezné rychlosti se zvyšuje počet přejezdů za nastavený čas. Dané úseky signálu jsou viditelně rozděleny, jelikož pohyb nástroje je přímočarý vratný. Hoblovací nůž do materiálu tedy najede a zase vyjede. Před dalším najetím do obrobku se musí vrátit do původní pozice. Napětí signálu při nájezdu hoblovacího nože do obrobku dosáhne určité hodnoty a podle podmínek procesu obrážení se dále vyvíjí. Při vyjetí hoblovacího nože z materiálu opět klesne, jelikož už nedochází k žádnému styku hoblovacího nože s obrobkem. Tento proces se opakuje. Z grafu je možné odečíst jednotlivé úseky a kolikrát hoblovací nůž přešel přes šířku obrobku za nastavenou dobu.

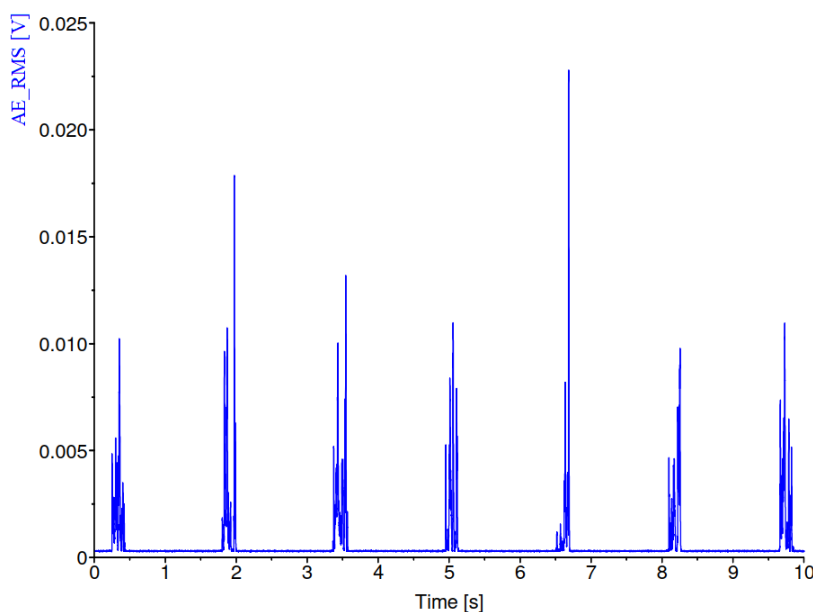
### 8.4.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při horizontálním obrázení

Na grafu 8 jsou patrné jednotlivé úseky přejezdů hoblovacího nože, tedy času trvání emisního RMS signálu. Úseků je celkem pět. Nicméně na četnosti úseků absolutně nezáleží, četnost úseků měření může být vždy odlišná díky časové prodlevě spuštění měření.



Graf 8: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,1 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 25 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s

Pokud však nebude časová prodleva spuštění měření znatelně odlišná, můžeme pozorovat mezi grafy 8 a 9 rozdíl v počtu přejezdů za určitý čas. V grafu 9 je vidět větší zaznamenaný počet přejezdů hoblovacího nože, a to celkem sedm. Tento fakt značí o zvýšení řezné rychlosti.



Graf 9: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,1 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 35 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s

Pokud grafy 8 a 9 porovnáme podle napětí emisního RMS signálu, můžeme na první pohled pozorovat při větší řezné rychlosti také zvýšení napětí.

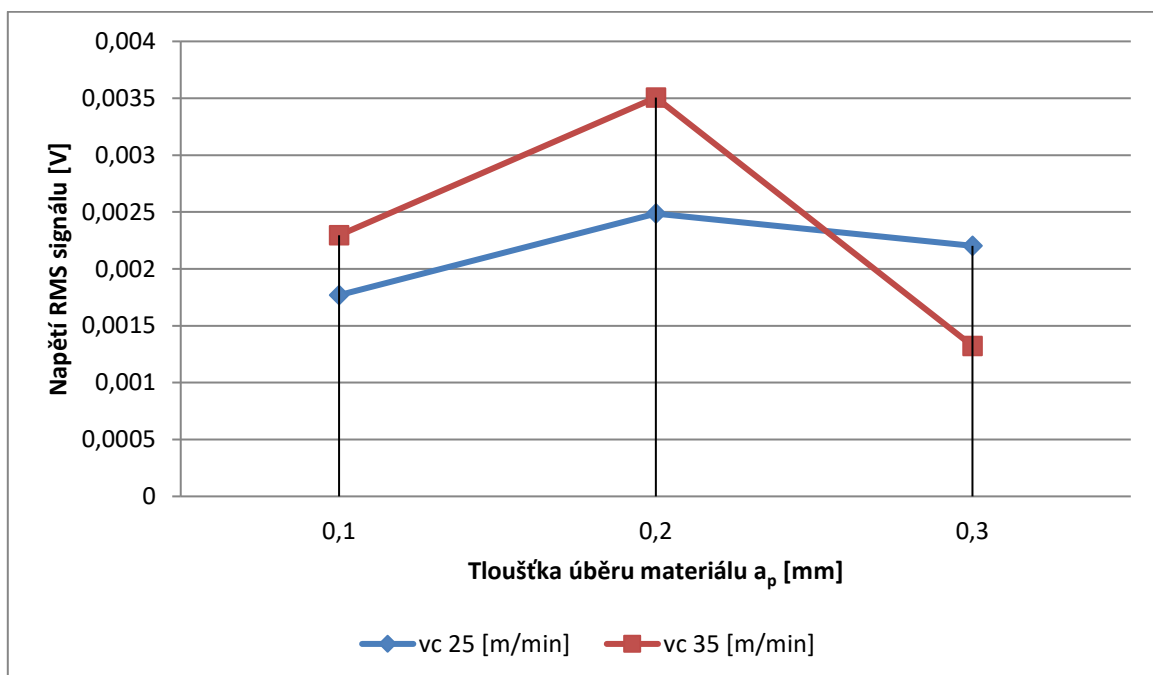
$a_p$ [mm]	<b>0,1</b>		<b>0,2</b>		<b>0,3</b>	
$v_{co}$ [m/min]	25		25		25	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
<b>Naměřené střední hodnoty [V]</b>	0,000711	0,002587	0,002827	0,003093	0,003772	0,000330
	0,001895	0,002646	0,003114	0,001752	0,004269	0,002939
	0,001947	0,002073	0,001711	0,004303	0,001798	0,001115
	0,000543	0,002281	0,002440	0,001756	0,002499	0,001705
	0,001615	0,001393	0,001988	0,001877	0,003162	0,000427
<b>Průměrná hodnota každého měření [V]</b>	<b>0,001342</b>	<b>0,002196</b>	<b>0,002416</b>	<b>0,002556</b>	<b>0,003100</b>	<b>0,001303</b>
<b>Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]</b>	<b>0,001769</b>		<b>0,002486</b>		<b>0,002202</b>	

Tabulka 8: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro řeznou rychlost  $v_{co} = 25$  [m/min]

$a_p$ [mm]	<b>0,1</b>		<b>0,2</b>		<b>0,3</b>	
$v_{co}$ [m/min]	35		35		35	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
<b>Naměřené střední hodnoty [V]</b>	0,002188	0,001967	0,003792	0,003699	0,000596	0,002515
	0,002639	0,002240	0,004065	0,004138	0,001317	0,002067
	0,002638	0,001906	0,002874	0,003590	0,000549	0,000694
	0,002473	0,002064	0,002240	0,003633	0,000792	0,000662
	0,001985	0,001495	0,002221	0,002511	0,000543	0,000744
	0,002426	0,003419	0,005250	0,004803	0,000552	0,000884
	0,002709	0,001983	0,004253	0,002010	0,002980	0,003662
<b>Průměrná hodnota každého měření [V]</b>	<b>0,002437</b>	<b>0,002153</b>	<b>0,003528</b>	<b>0,003483</b>	<b>0,001047</b>	<b>0,001598</b>
<b>Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]</b>	<b>0,002295</b>		<b>0,003506</b>		<b>0,001323</b>	

Tabulka 9: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro řeznou rychlost  $v_{co} = 35$  [m/min]

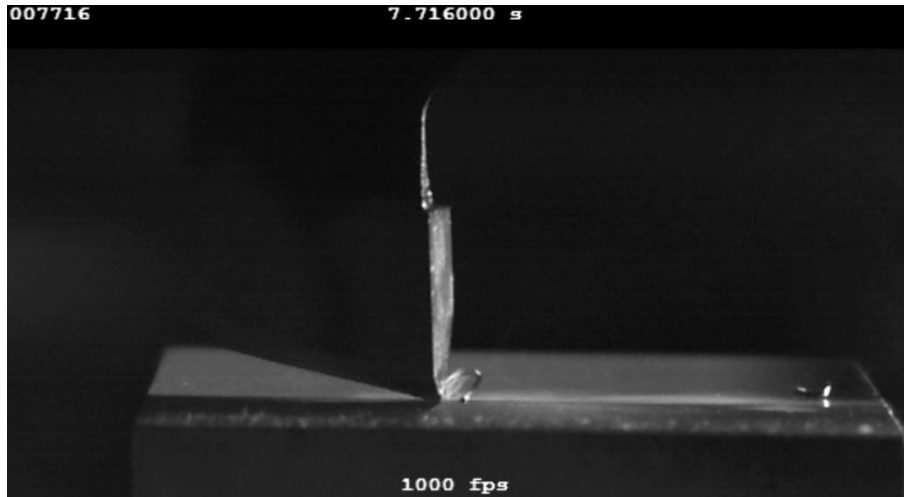
Pokud nahlédneme do tabulky 8 a 9, zjistíme, že naměřené hodnoty napětí jsou mnohem menší, než tomu bylo u rovinného broušení. Je tomu tak z důvodu jiné geometrie nástroje. Jak už bylo zmíněno v sekci rovinného broušení, brusný kotouč má geometrii břitu tvořenou zrny nepravidelného tvaru. Jednotlivá zrna naráží do obrobku a způsobují určité hodnoty napětí při nepravidelném úběru materiálu. V případě horizontálního obrážení používáme jednoduchý nástroj, který je jednobřítý s určenou geometrií. Tříška se tvoří kontinuálně při stejné hloubce řezu od najetí nástroje do obrobku až po vyjetí. Tuto skutečnost je možno pozorovat na záznamu a na obrázcích 31 - 36. Na obrázcích můžeme také pozorovat vinutí třísky po obrobku. Z toho lze usoudit, že takto nízké naměřené hodnoty se budou nejspíše týkat kontaktu mezi třískou a obrobkem.



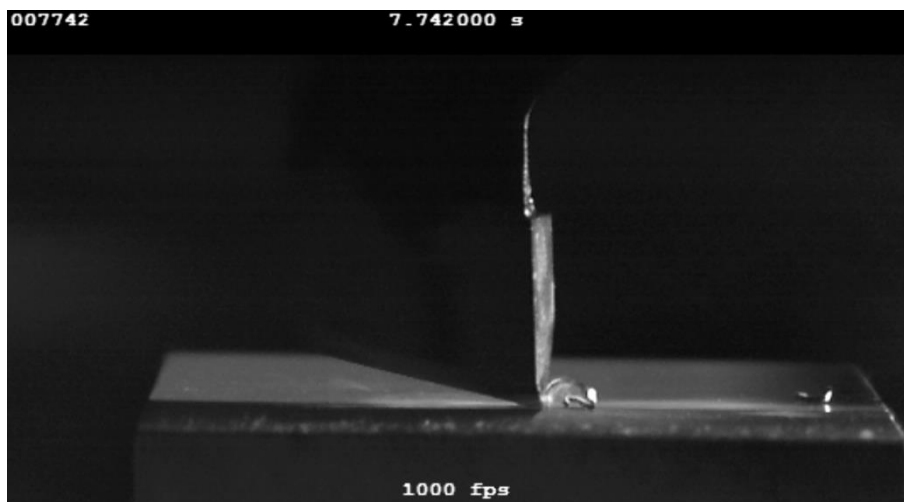
Graf 10: Vliv hloubky řezu  $a_p$  a řezné rychlosti  $v_{co}$  na průběh napětí při horizontálním obrážení

V grafu 10 je vidět o něco vyšší nárůst napětí při řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  m/min oproti  $v_{co} = 25$  m/min. To však platí při hloubce řezu  $a_p = 0,1$  mm a  $a_p = 0,2$  mm. Při zvýšení hloubky řezu na  $a_p = 0,3$  a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  m/min napětí rapidně klesá. Může tomu být díky odvalování kontinuálně vytvořené třísky po povrchu obrobku namísto narážení nebo sunutí třísky po povrchu obrobku. Tento jev lze pozorovat na obrázcích 31, 32 a 33, na nichž je vidět tříška, která naráží nebo se sune po povrchu obrobku. Na dalších obrázcích 34, 35 a 36, se tříška odvaluje po povrchu obrobku.

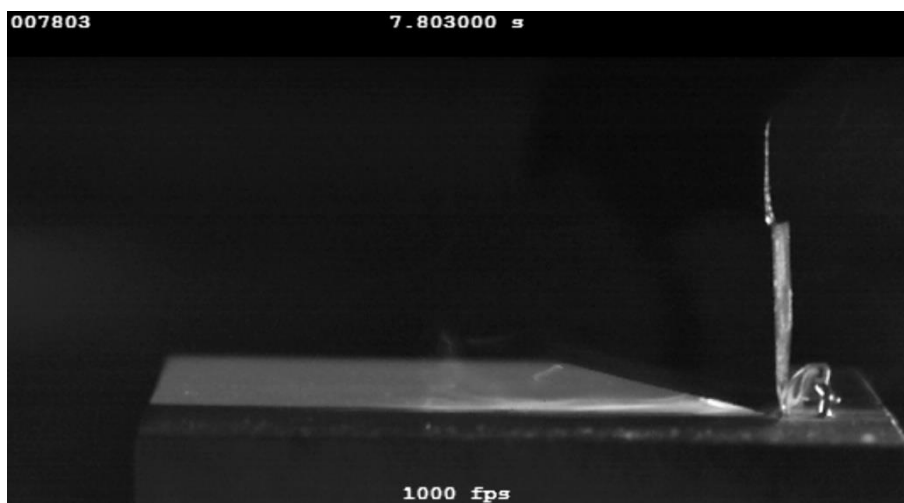




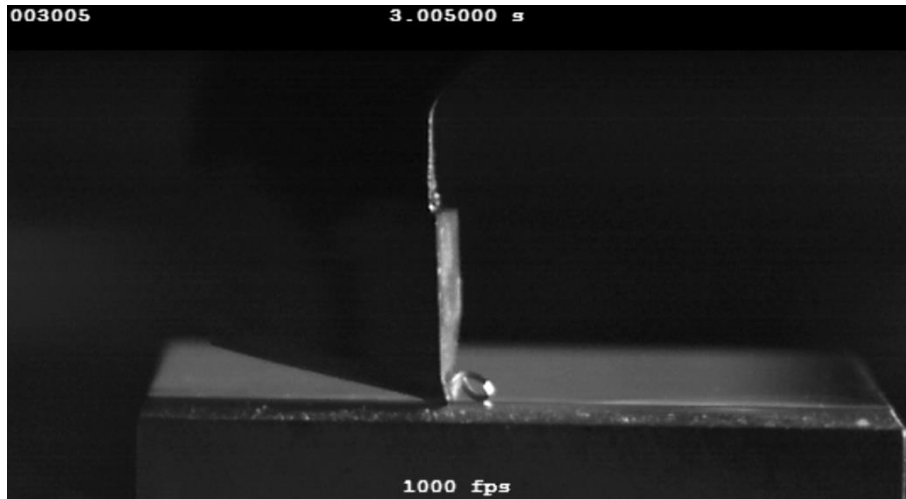
Obrázek 31: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - první část (Zdroj: VLASTNÍ)



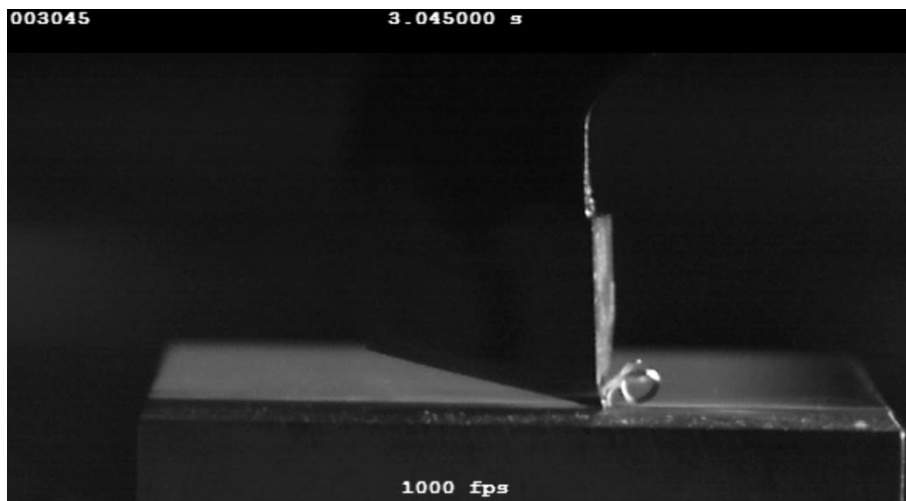
Obrázek 32: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - druhá část (Zdroj: VLASTNÍ)



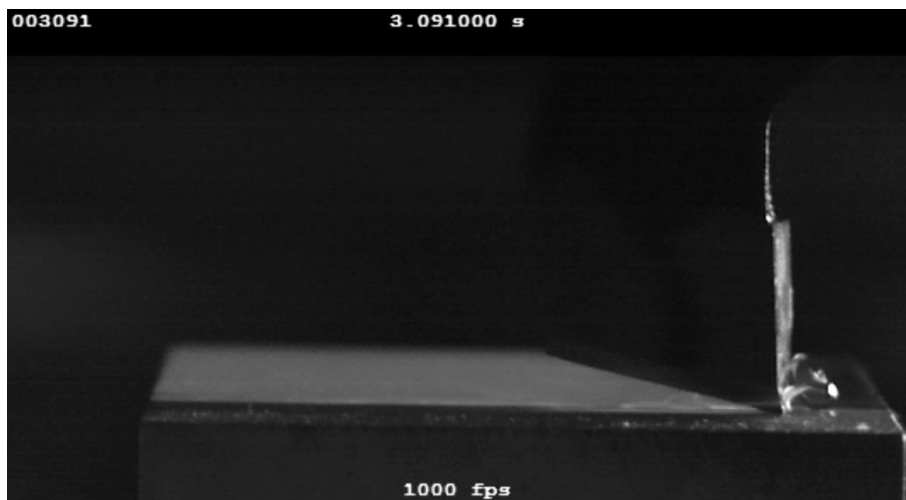
Obrázek 33: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - třetí část (Zdroj: VLASTNÍ)



Obrázek 34: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,3$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - první část (Zdroj: VLASTNÍ)



Obrázek 35: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,3$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - druhá část (Zdroj: VLASTNÍ)



Obrázek 36: Horizontální obrázení při hloubce řezu  $a_p = 0,3$  mm a řezné rychlosti  $v_{co} = 35$  - třetí část (Zdroj: VLASTNÍ)

## 8.5 Vertikální frézování – měření a vyhodnocení signálu RMS

### 8.5.1 Metodika měření při vertikálním frézování

Frézování probíhalo na vertikální frézce TOS FNGJ 20 za proměnlivých otáček nástroje a konstantní rychlosti posuvu stolu. Změny probíhaly také v hloubce řezu (dle tabulky 11). Při vertikálním frézování se změnila hloubka řezu celkem třikrát, a to po pěti desetinách milimetru. Rychlost otáček se měnila pro každou hloubku řezu dvakrát. Před zahájením měření byla celá plocha z předchozího měření přefrézována. Měření vždy započalo před najetím frézy do obrobku. Přejezd frézy byl přes šířku obrobku, tedy přes rozměr 95 (nemůžeš mít číslo na jedné řádce a milimetry na druhé) milimetrů dle výkresu (obrázek 22). Před započítáním dalšího měření byla celá plocha přefrézována na stejný rozměr. Pro měření bylo použito **symetrické** frézování. Obrobek byl upnut na pracovní stůl pomocí upínek, jejichž použití bylo jednoduché, jelikož v obrobku byly již přichystány drážky pro jeho uchycení. Měřicí systém byl nastaven na rozsah signálu 0 – 10 V. Délka záznamů 45 s. Délka záznamu byla upravena tak, aby byl zaznamenán emisní RMS signál v celém průběhu frézování, tedy jak při nájezdu, tak při výjezdu frézy z obrobku.



Obrázek 37: Upnutí obrobku na pracovní stůl vertikální frézky TOS FNGJ 20 pomocí upínek a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ)

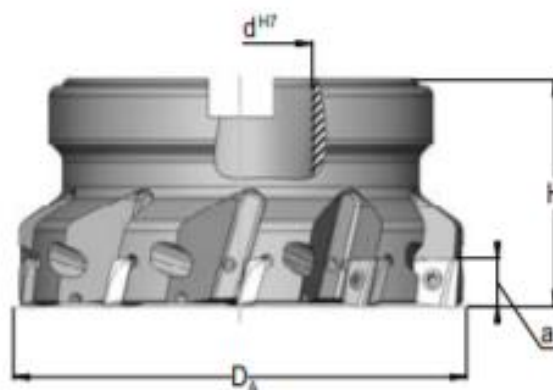
Rychlost posuvu stolu	$v_{ff} = 160 \text{ mm/min}$
Průměr frézy	$\text{Ø}D_f = 50 \text{ mm}$
Šířka záběru frézy	$a_{ef} = 50 \text{ mm}$
Počet zubů frézy	$z_f = 6$

Tabulka 10: Nastavené řezné podmínky pro vertikální frézování

V tabulce 10 je vidět, že průměr frézy  $\text{Ø}D_f = 50 \text{ mm}$  a šířka záběru frézy  $a_e = 50 \text{ mm}$  se shodují. To znamená, že frézování probíhalo při plném záběru frézy. Jedná se tedy o frézování symetrické, jelikož osa frézy prochází středem obráběné plochy. Rychlost posuvu stolu byla nastavena pro všechna měření konstantní, tedy  $v_{ff} = 160 \text{ mm/min}$ .



Obrázek 38: Fréza AVANTEC 04M.0540.150 (Zdroj: VLASTNÍ)



Obrázek 39: Fréza AVANTEC 04M.0540.150 (Zdroj: [15])

Jako nástroj pro vertikální frézování byla použita čelní nástrčná válcová fréza se šesti vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) a průměru  $\text{Ø}D_f = 50 \text{ mm}$ . Tělo frézy je od společnosti AVANTEC typu MEGAVANT HC90 s označením 04M.0540.150. Použité VBD jsou od téže společnosti s označením MO.1003.021.10 SKY77 s kladným úhlem čela.

Frézovací nástroj se svou geometrií opět liší od předchozích technologií. Nástroj má určenou geometrii oproti brusnému kotouči a zároveň je vícebřitý oproti hoblovacímu noži.

Hloubka řezu $a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n_f$ [ot/min]	630		630		630	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
$n_f$ [ot/min]	800		800		800	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření

Tabulka 11: Řezné podmínky při vertikálním frézování

Výpočet řezné rychlosti se provede z nastavených otáček a průměru frézy  $\text{Ø}D_f$ .

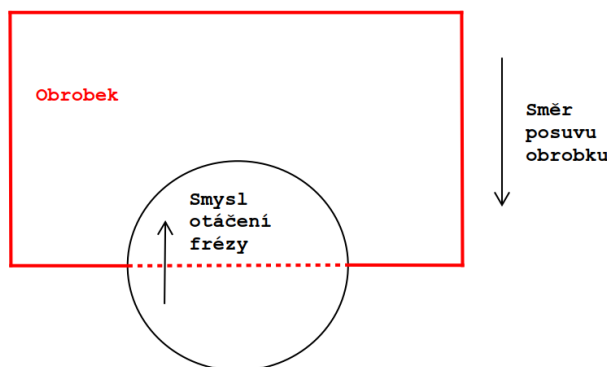
Řezná rychlost při otáčkách  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  -  $V_{cf} = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n_f}{1000}$  [m/min];

$$V_{cf} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 630}{1000} = 99 \text{ [m/min]}$$

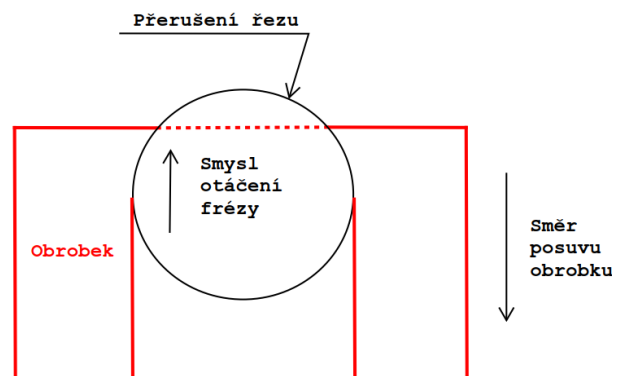
Řezná rychlost při otáčkách  $n_f = 800 \text{ ot/min}$  -  $V_{cf} = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n_f}{1000}$  [m/min];

$$V_{cf} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 800}{1000} = 125,7 \text{ [m/min]}$$

Při měření akustické emise, tedy emisního RMS signálu při vertikálním frézování, bylo měření nastaveno po dobu 45 sekund, protože se zaznamenával celý proces frézování. Přejetí frézy přes celou šířku obrobku dle nastavených podmínek, to je rozdíl oproti předešlým metodám, kde bylo zaznamenáno několik přejetí nástroje přes obrobek. Signál je tedy jen jeden v celém záznamu. Pokud nahlédneme do grafu 11, který je použit jako předloha signálu, můžeme pozorovat postupný vývoj napětí signálu. Fréza postupně najíždí do materiálu, kde dochází ke zvětšení šířky záběru (zvětšení úhlu opásání) až na její maximum. Tento proces má vliv i na vývoj signálu. Při postupném zvětšování šířky záběru frézy se zvyšuje i napětí signálu a poté se začne ustalovat. Při výjezdu frézy z materiálu je opět vidět pokles napětí, avšak při jiném průběhu, než je tomu při najíždění. Je tomu tak z důvodu více přerušovaného řezu při vyjíždění frézy z obrobku (obrázek 41).

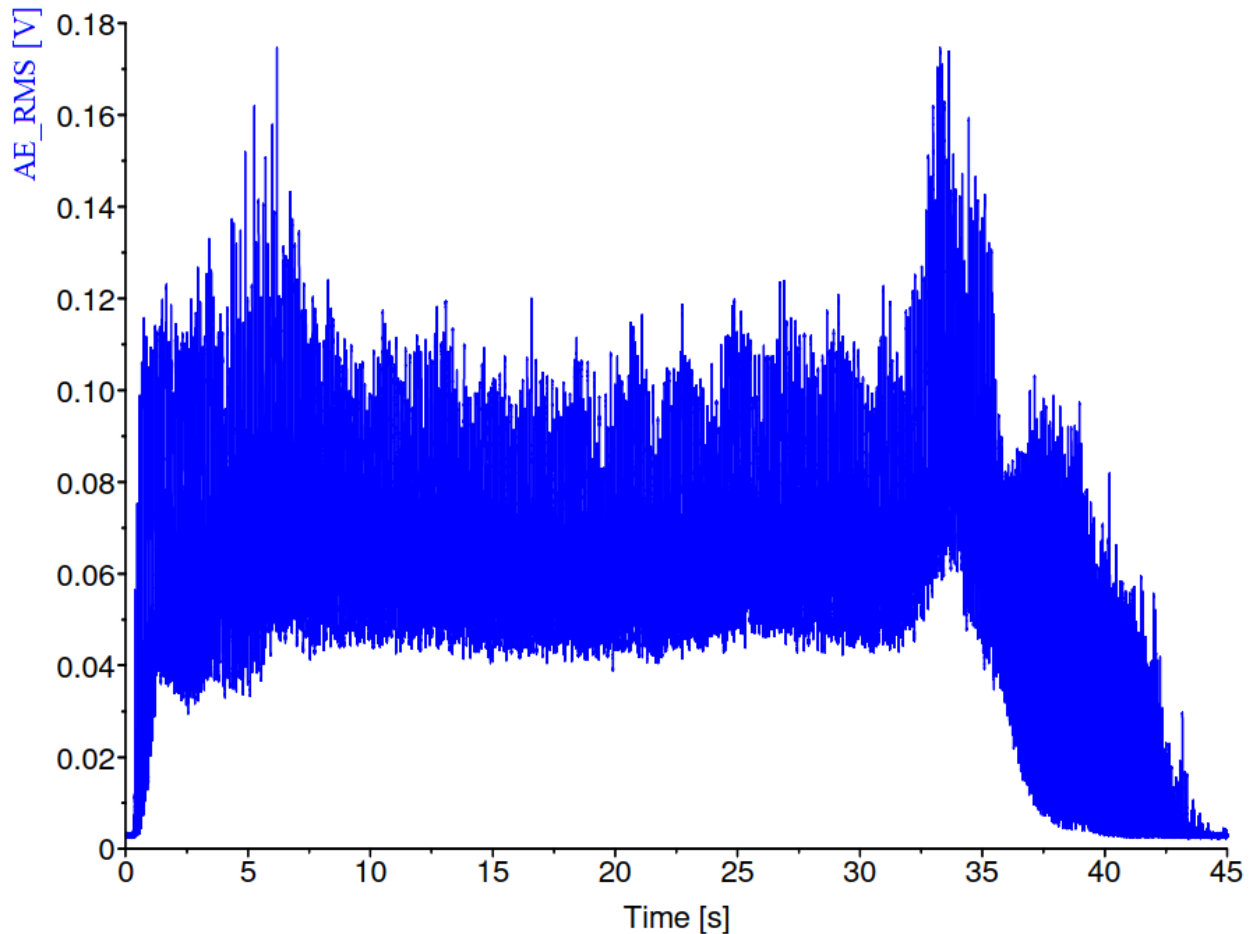


Obrázek 40: Fréza v plné šířce záběru  
(Zdroj: VLASTNÍ)



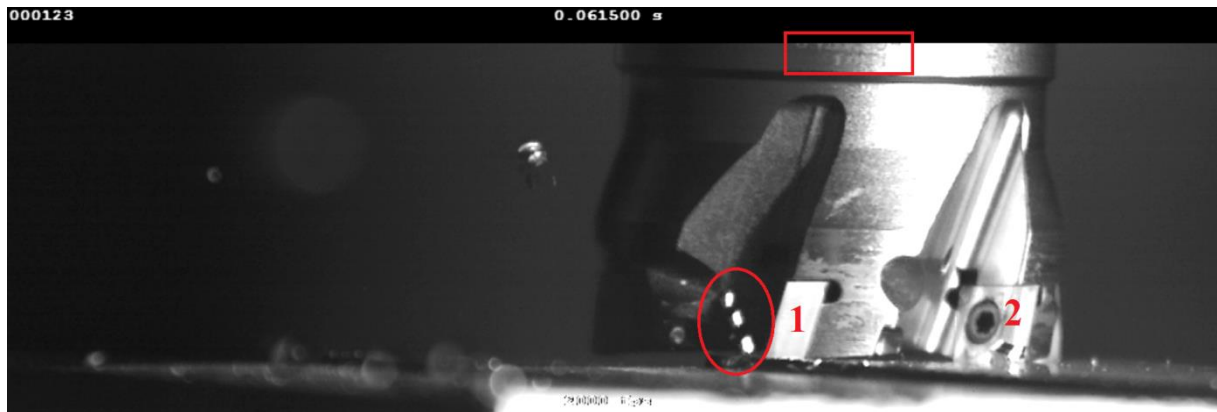
Obrázek 41: Fréza při výjezdu z obrobku  
(Zdroj: VLASTNÍ)

### 8.5.2 Vyhodnocení emisního RMS signálu při vertikálním frézování



Graf 11: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$ , časový úsek 0-45 s

V grafu 11 můžeme dále pozorovat jednotlivé nejvyšší píky, a to téměř v celém záznamu. Tyto píky jsou zřejmě způsobeny buď špatně usazenou VBD v tělese frézy, nebo větším otupením břitu, než u ostatních VBD. Tento předpoklad vychází z podkladů uvedených níže. Tento jev nebyl pro měření vytvořen účelně, nicméně byl odhalen také díky vysokorychlostní kameře. Na záznamu je vidět konkrétní VBD, která buď odebere mnohem menší třísku než ostatní VBD, nebo prakticky vůbec žádnou. Záznam byl pořízen při najíždění frézy do materiálu, tedy na začátku frézování.



Obrázek 42: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  - destička 1 a 2  
(Zdroj: VLASTNÍ)

Na obrázku 42 je vidět fréza s označenými VBD (dále jen destičky) čísly 1 a 2. Destička označená číslem 1 byla určena podle hůře čitelného označení těla frézy ze záznamu. Na obrázku je dále vidět tvoření třísky s jejím následným odvedením.



Obrázek 43: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  - destička 2 a 3  
(Zdroj: VLASTNÍ)

Z obrázku 43 je vidět podobný jev jako na předchozím obrázku. Tentokrát se však jedná o destičky označené čísly 2 a 3, kde je opět vidět tvoření třísky.



Obrázek 44: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  - destička 3 a 4  
(Zdroj: VLASTNÍ)

Na obrázku 44 je vidět tvoření třísky u destičky označené číslem 3. U destičky číslo 4 zatím nelze pozorovat žádné tvoření třísky jako u předchozích destiček.



Obrázek 45: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  - destička 4 a 5  
(Zdroj: VLASTNÍ)

Ani na obrázku 45 není vidět žádné tvoření třísky u destičky označené číslem 4. Zde by mohlo nastávat vyšší tření mezi destičkou a obrobkem oproti ostatním destičkám a dále také docházet k vyšší plastické deformaci materiálu. Tento jev by se měl projevit na napětí emisního RMS signálu. U destičky číslo 5 je opět vidět tvoření třísky.



Tato zjištění vedla k prozkoumání signálu ve vyhodnocovacím programu. Byly vybrány určité časové úseky, které se přiblížily (zoom), a změřil se čas jedné otáčky frézy. Čas jedné otáčky frézy se vypočítal z nastavených otáček pro každý konkrétní záznam.

#### Výpočet času jedné otáčky frézy při $n_f = 630$ ot/min

$$n_s = \frac{n}{60} \Rightarrow n_s = \frac{630}{60} \Rightarrow n_s = 10,5 \text{ [ot/s]}$$

$$t_{f1} = \frac{1}{n_s} * 1 \Rightarrow t_{f1} = \frac{1}{10,5} * 1 \Rightarrow t_{f1} = 0,0952381 \text{ [s]}$$

#### Výpočet času jedné otáčky frézy při $n_f = 800$ ot/min

$$n_s = \frac{n}{60} \Rightarrow n_s = \frac{800}{60} \Rightarrow n_s = 13,333 \text{ [ot/s]}$$

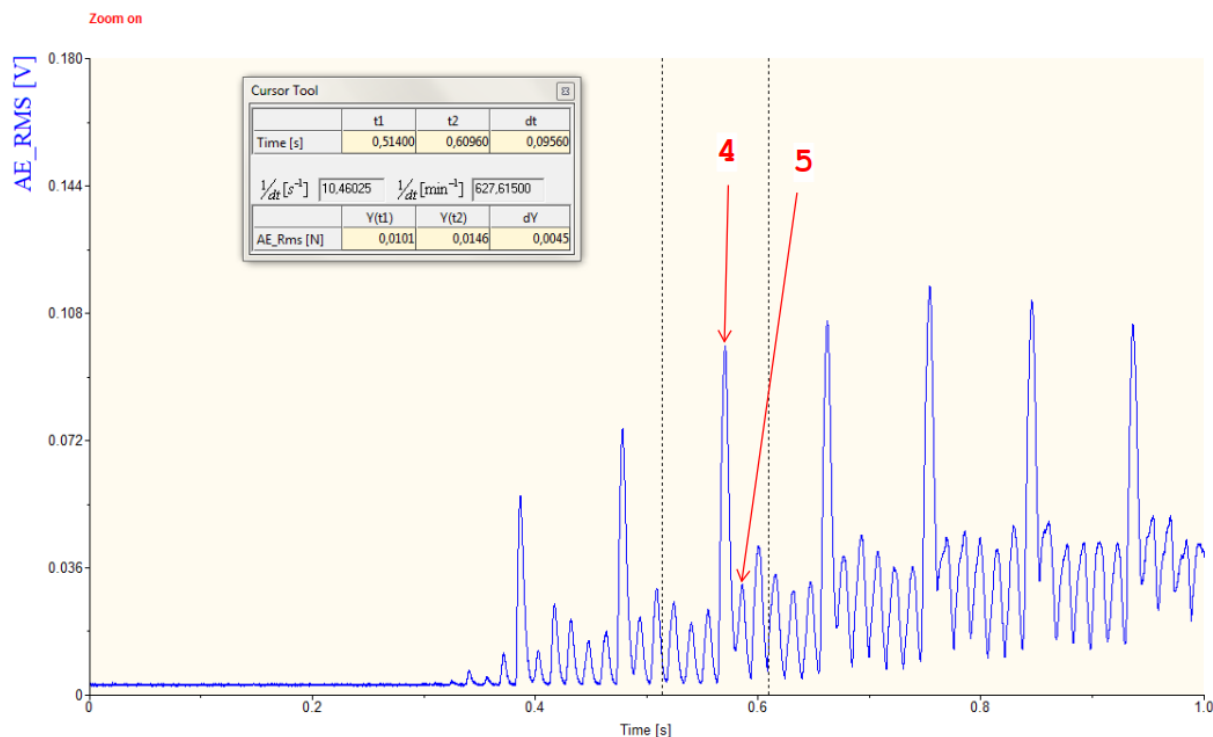
$$t_{f1} = \frac{1}{n_s} * 1 \Rightarrow t_{f1} = \frac{1}{13,333} * 1 \Rightarrow t_{f1} = 0,075 \text{ [s]}$$

$n_f$  - nastavené otáčky

$n_s$  - počet otáček za jednu sekundu

$t_{f1}$  - čas jedné otáčky

60 - čas 1 minuty v sekundách



Graf 12: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n = 630 \text{ ot/min}$ , časový úsek 0-1 s

Pokud vypočtený čas, za nějž fréza udělá jednu otáčku, zakomponujeme do časové osy grafu 12, zjistíme, že v daném časovém rozsahu pro jednu otáčku se vyskytuje celkem šest píků. Tento počet odpovídá celkovému počtu zubů frézy. Z toho se dá usoudit, že každý jednotlivý pík představuje jeden záběr zubu neboli destičky.

Největší pík z časového úseku jedné otáčky přitom nejspíše představuje destičku, která je na obrázcích ze záznamu výše označena číslem 4. Jak už bylo zmíněno, tato destička odebere mnohem menší třísku než ostatní destičky, nebo prakticky vůbec žádnou. Větším třením a deformacemi tedy vzniká nárůst napětí, který je také zaznamenán v grafu.

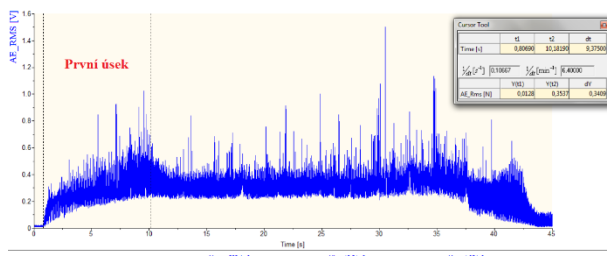
V úvahu můžeme brát i fakt, že největší pík by mohl představovat destičku číslo 5. Tato destička by měla odebírat větší třísku z důvodu minimálního úběru třísky předešlé destičky číslo 4. Tento jev by se potom tedy měl projevit mnohem větším poklesem píku (destičky 4), který předchází tomu největšímu (destičky 5). Z grafu 12 je zjevné, že tomu tak není. Naopak lze vyzorovat, že na největší pík navazuje mnohem rychleji pík následující, označený číslem 5.

Graf 12 je pořízen dle časové osy při nájezdu frézy do obrobku, kdy fréza nezabírá celou svou šířkou. I díky tomu jsou dobře rozeznatelné jednotlivé záběry zubů, jelikož při záběru celé šířky frézy působí na signál více faktorů ovlivňujících signál. Také se musí počítat s tím, že každý zub je mnohem delší dobu v záběru. Tato myšlenka vznikla po prozkoumání časového úseku, kdy fréza již byla v plné šířce záběru dle grafu 13.

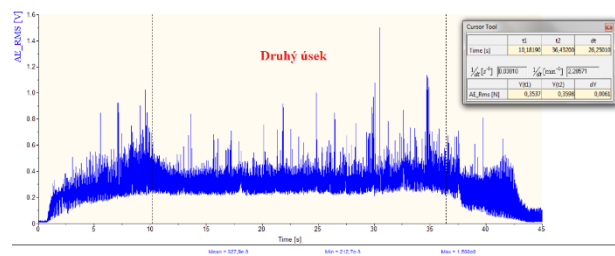


Graf 13: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $n_f = 630 \text{ ot/min}$ , časový úsek 20-20,5 s

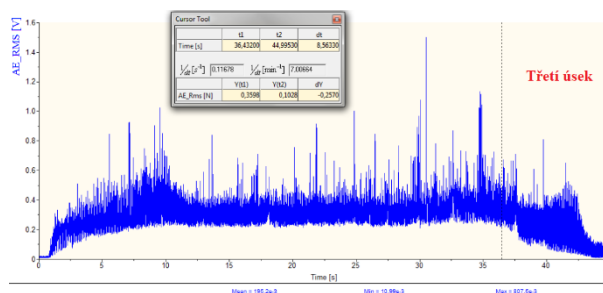
V grafu 13 jsou vidět nejednoznačné záběry zubů oproti situaci při nájezdu frézy do obrobku. Dále můžeme pozorovat znovu nejvyšší píky, které by měla představovat destička s číslem 4. Tento jev potvrzuje úvahu, že jednotlivé nejvyšší píky v celém záznamu jsou tvořeny destičkou číslo 4.



Graf 14: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ ,  $n_f = 800 \text{ ot/min}$ , časový úsek 0-45 s – první úsek



Graf 15: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ ,  $n_f = 800 \text{ ot/min}$ , časový úsek 0-45 s – druhý úsek



Graf 16: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ ,  $n_f = 800 \text{ ot/min}$ , časový úsek 0-45 s – třetí úsek

Každé měření při otáčkách  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  bylo vyhodnoceno ve vyhodnocovacím programu způsobem, kdy se naměřený signál rozdělil do tří částí (předloha dle grafů 14, 15 a 16). První částí byl stanoven časový úsek při najíždění frézy do obrobku. Tento úsek je charakterizován od prvního kontaktu s obrobkem až do najetí celou šířkou záběru frézy. To je tedy poloměr frézy. Další, druhou částí, byl stanoven časový úsek, kdy fréza frézovala celou svou šířkou záběru. Tento úsek je charakterizován, když už je fréza celým poloměrem v obrobku až po přejetí šířky obrobku, kdy fréza začíná postupně vyjíždět. Jako poslední, třetí část, byl stanoven úsek vyjíždění frézy z obrobku. Tento úsek je stejný jako první úsek, protože se počítá opět s poloměrem frézy.

$$t_{u13} = \frac{R_f}{v_f} * 60 \Rightarrow t_{u13} = \frac{25}{160} * 60 \Rightarrow t_{u13} = 9,375 \text{ [s]}$$

$$t_{u2} = \frac{h - R_f}{v_f} * 60 \Rightarrow t_{u2} = \frac{95 - 25}{160} * 60 \Rightarrow t_{u2} = 26,25 \text{ [s]}$$

$t_{u13}$  - časový úsek najíždění frézy do obrobku a vyjíždění frézy z obrobku

$t_{u2}$  - časový úsek záběru frézy v celé šířce

$b_o$  - šířka obrobku

$R_f$  - poloměr frézy

$v_{ff}$  - rychlost posuvu stolu

60 - čas 1 minuty v sekundách

Před najetím frézy do obrobku je v signálu samozřejmě znatelná prodleva signálu, jelikož spuštění měření proběhlo ještě před tím, než došlo ke kontaktu frézy s obrobkem. Proto měřený úsek započíná při prvním viditelném píku (první kontakt destičky s obrobkem).

Pro vyhodnocení byly použity střední (průměrné) hodnoty jednotlivých úseků.

Při měřeních se vyskytla chyba, a to v podobě délky záznamů. Nastavený čas záznamů byl z nastavené rychlosti posuvu stolu vůči šířce obrobku a poloměru frézy vypočítán správně. Nicméně k tomuto vypočtenému času se měl připočítat ještě čas prodlevy spuštění měření, odhadem alespoň 3 - 5 sekund. Z toho vyplývá, že třetí časový úsek při výjezdu frézy z obrobku není zaznamenán celý. Délka chybějícího záznamu se liší podle časové prodlevy spuštění měření.

Jak je z grafů v přílohách vidět, napětí ke konci záznamů (v třetí části) klesá a na některých již signál prakticky není detekován. U všech záznamů chybí přibližně 1 - 1,5 sekundy. Jelikož třetí časový úsek má hranici s druhým časovým úsekem, byla od této hranice odměřena určitá část z každého signálu a tyto naměřené hodnoty vyhodnoceny, i když nejsou v plném rozsahu, kdy fréza přestala odebírat materiál.

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n$ [ot/min]	630		630		630	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,1513	0,1534	0,0647	0,1292	0,1969	0,1842
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,1524		0,09695		0,1906	

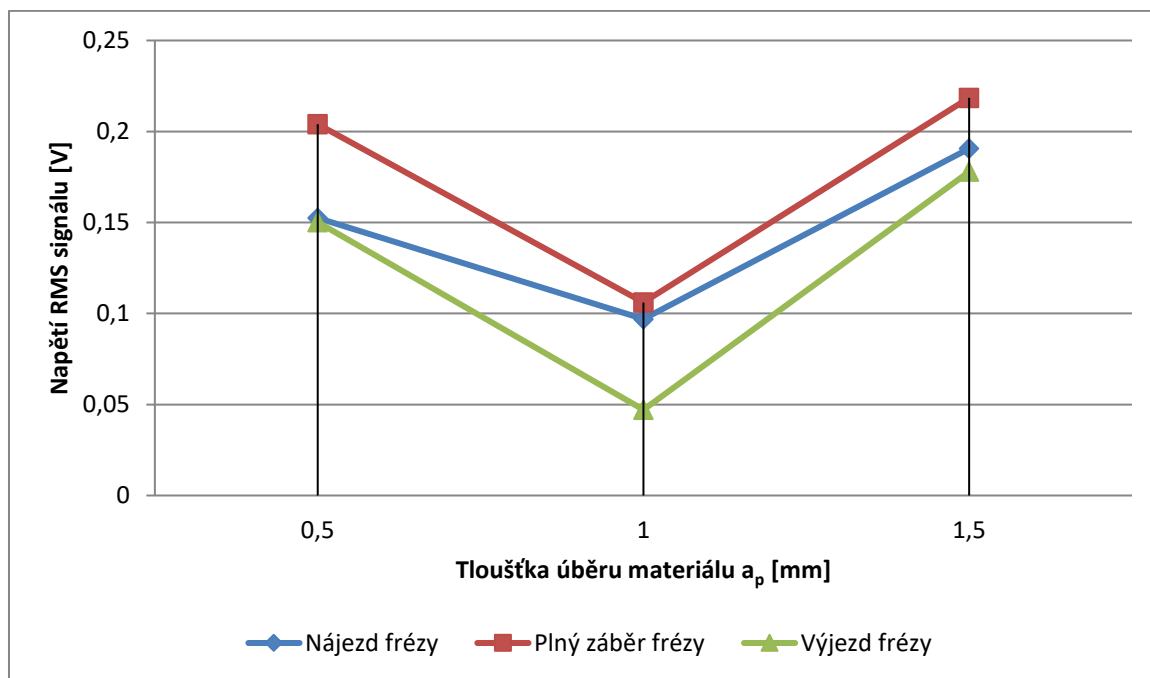
Tabulka 12: Hodnoty měření vertikálního frézování **při nájezdu frézy** do obrobku pro otáčky  $n_f = 630$  ot/min

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n$ [ot/min]	630		630		630	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,2037	0,2042	0,0674	0,1448	0,2339	0,2030
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,2040		0,1061		0,2185	

Tabulka 13: Hodnoty měření vertikálního frézování **při záběru celé šířky frézy** pro otáčky  $n_f = 630$  ot/min

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n$ [ot/min]	630		630		630	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,1358	0,1644	0,0267	0,0675	0,1761	0,1796
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,1501		0,0471		0,1779	

Tabulka 14: Hodnoty měření vertikálního frézování **při výjezdu frézy** z obrobku pro otáčky  $n_f = 630$  ot/min



Graf 17: Vliv hloubky řezu  $a_p$  na průběh napětí při třech úsecích a konstantních otáčkách  $n_f = 630$  ot/min

Po porovnání středních hodnot napětí z grafu 17 je patrný průběh napětí při třech úsecích v závislosti na hloubce řezu.

Při celé šířce záběru frézy lze pozorovat největší střední hodnotu napětí oproti nájezdu frézy do obrobku, ale i výjezdu frézy z obrobku, a to při všech hloubkách řezu. Při hloubce řezu  $a_p = 1$  mm je vidět největší pokles napětí pro všechny úseky. Dalo by se tedy říci, že z hlediska napětí emisního RMS signálu při hloubce řezu  $a_p = 1$  mm je řezný proces neoptimálnější, protože napětí je zde naměřeno nejmenší.

Z grafu 17 lze také vyzkoušet, že nejmenší hodnoty napětí jsou vždy při výjezdu frézy z obrobku.

V předešlém vyhodnocení napětí signálu při otáčkách  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  byl signál rozdělen do tří částí. Stejný způsob vyhodnocení byl použit pro měření při otáčkách  $n_f = 800 \text{ ot/min}$ , jelikož se rychlost posuvu stolu nemění.

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n_f$ [ot/min]	800		800		800	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,2694	0,2584	0,2586	0,2729	0,3079	0,2935
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,2639		0,2658		0,3007	

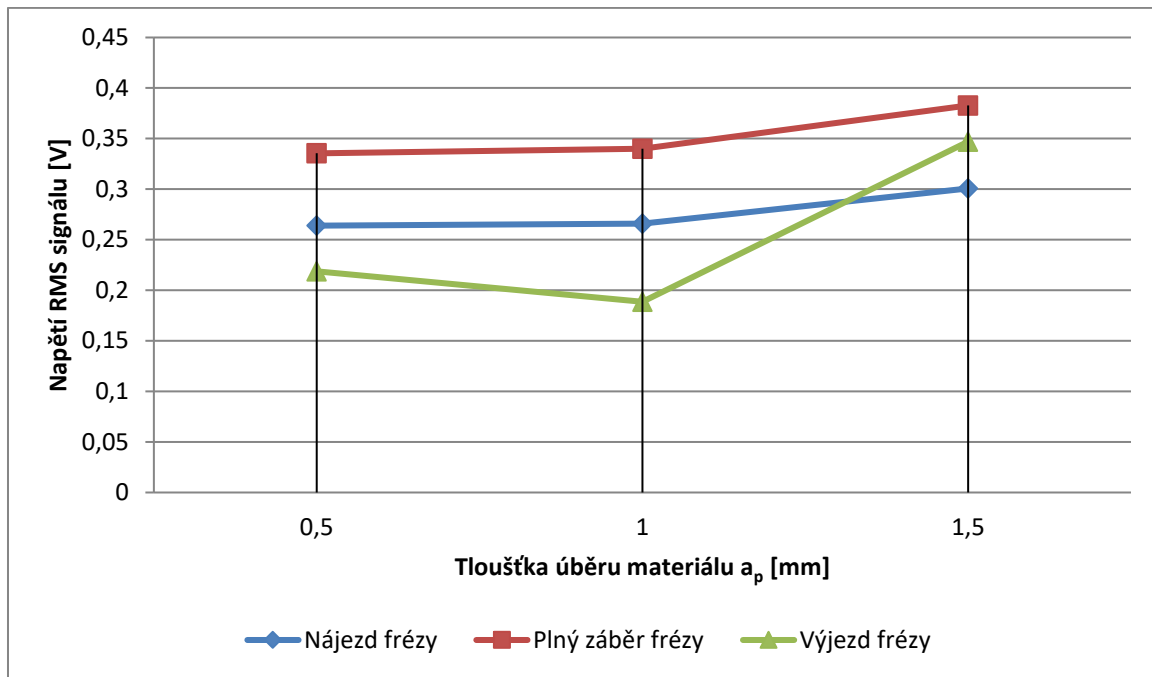
Tabulka 15: Hodnoty měření vertikálního frézování **při nájezdu frézy** do obrobku pro otáčky  $n_f = 800 \text{ ot/min}$

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n_f$ [ot/min]	800		800		800	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,3279	0,3428	0,3450	0,3348	0,3576	0,4080
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,3354		0,3399		0,3828	

Tabulka 16: Hodnoty měření vertikálního frézování **při záběru celé šířky frézy** pro otáčky  $n_f = 800 \text{ ot/min}$

$a_p$ [mm]	0,5		1		1,5	
$n_f$ [ot/min]	800		800		800	
	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření	1.měření	2.měření
Naměřené střední hodnoty [V]	0,1952	0,2421	0,2048	0,1724	0,2792	0,4147
Průměrná hodnota dvou měření při stejných podmínkách řezu [V]	0,2187		0,1886		0,3470	

Tabulka 17: Hodnoty měření vertikálního frézování **při výjezdu frézy** z obrobku pro otáčky  $n_f = 800 \text{ ot/min}$



Graf 18: Vliv hloubky řezu  $a_p$  na průběh napětí při třech úsecích a konstantních otáčkách  $n_f = 800$  ot/min

Po porovnání středních hodnot napětí z grafu 18 je vidět průběh napětí při třech úsecích v závislosti na hloubce řezu.

Při celé šířce záběru frézy lze pozorovat největší střední hodnotu napětí oproti nájezdu frézy do obrobku, ale i výjezdu frézy z obrobku, a to při všech hloubkách řezu, podobně jako je tomu u předchozího vyhodnocení při otáčkách  $n_f = 630$  ot/min. Rozdíl oproti předchozímu vyhodnocení je vidět při hloubce řezu  $a_p = 1$  mm, kde napětí výrazně nekleslo. Naopak oproti hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm se mírně zvýšilo, a to jak při nájezdu frézy, tak i při celé šířce záběru frézy. Stejně je tomu i při hloubce řezu  $a_p = 1,5$  mm, kdy se napětí opět zvýšilo. Co se týče napětí při výjezdu frézy z obrobku, tak při hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm je napětí vyšší, než při hloubce řezu  $a_p = 1$  mm. Při hloubce řezu  $a_p = 1,5$  mm se napětí rapidně zvýšilo. Výše tohoto napětí může být ovlivněna možnými otřepy na konci obrobku při výjezdu frézy.

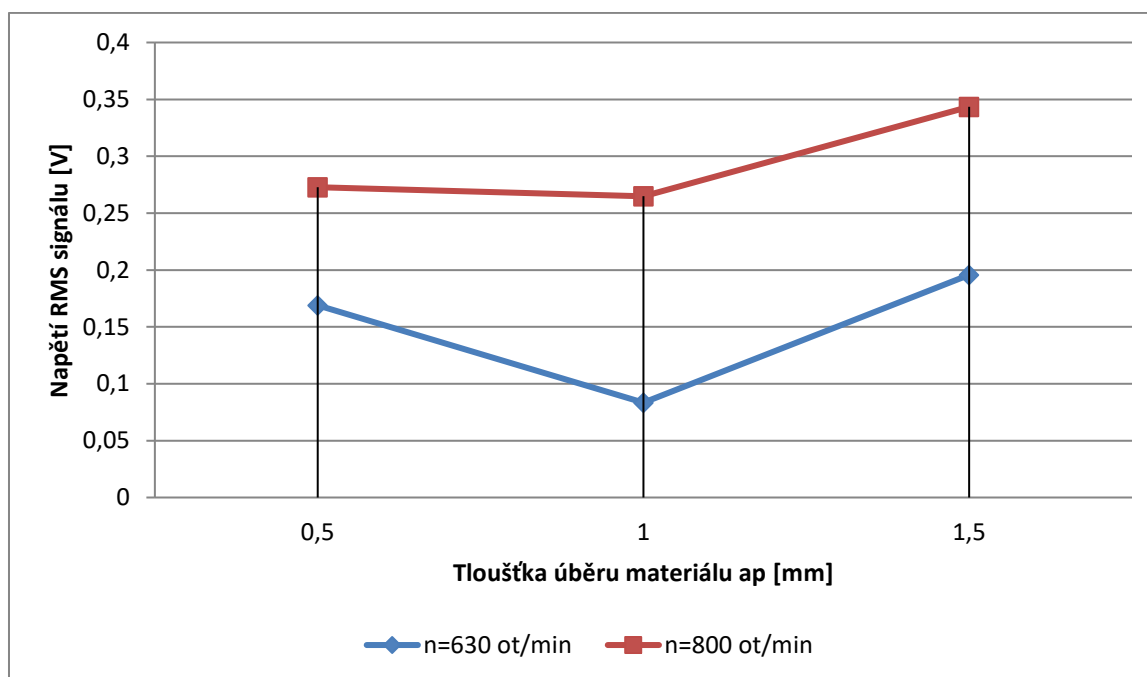


$a_p$ [mm]	0,5	1	1,5
$n_f$ [ot/min]	630	630	630
Průměrná hodnota prvního úseku [V]	0,1524	0,09695	0,1906
Průměrná hodnota druhého úseku [V]	0,2040	0,1061	0,2185
Průměrná hodnota třetího úseku [V]	0,1501	0,0471	0,1779
Průměrná hodnota všech tří úseků [V]	0,1688	0,0834	0,1957

Tabulka 18: Průměrná hodnota všech tří úseků pro jednotlivé hloubky řezu při vertikálním frézování a otáčkách  $n_f = 630$  ot/min

$a_p$ [mm]	0,5	1	1,5
$n_f$ [ot/min]	800	800	800
Průměrná hodnota prvního úseku [V]	0,2639	0,2658	0,3007
Průměrná hodnota druhého úseku [V]	0,3354	0,3399	0,3828
Průměrná hodnota třetího úseku [V]	0,2187	0,1886	0,3470
Průměrná hodnota všech tří úseků [V]	0,2727	0,2648	0,3435

Tabulka 19: Průměrná hodnota všech tří úseků pro jednotlivé hloubky řezu při vertikálním frézování a otáčkách  $n_f = 800$  ot/min



Graf 19: Průměrné hodnoty všech tří úseků při vertikálním frézování a otáčkách  $n_f = 630$  ot/min,  $n_f = 800$  ot/min

Po zprůměrování hodnot napětí všech tří úseků pro jednotlivé otáčky a hloubky řezů vyjde graf 19, který ukazuje vývoj napětí signálu. Z toho lze usoudit, že při zvýšení otáček se zvyšuje i napětí emisního signálu RMS pro vertikální frézování.

## 9 Porovnání technologií a vyhodnocení

Pro porovnání použitých technologií byly použity hodnoty středního napětí emisních RMS signálů.

### Rovinné broušení

Z grafů 7, 10 a 19 můžeme pozorovat jednotlivá střední napětí emisního RMS signálu jednotlivých technologií při různých řezných podmínkách, které jsou uvedeny pro každou technologii zvlášť. Porovnáním těchto naměřených hodnot docházíme ke zjištění, že největší napětí signálu je měřeno při rovinném broušení, a to při nejmenší hloubce řezu ze všech tří technologií (v setinách milimetru). Je tomu dáno nejspíše z důvodu vysokých otáček (vysoké řezné rychlosti) brusného kotouče a jeho mnohobřítosti. Velké záporné úhly čela jednotlivých zrn způsobují tření a deformace materiálu, které jsou základem naměřeného napětí emisního RMS signálu.

Při zvětšování hloubky řezu, konstantních otáčkách brusného kotouče (řezné rychlosti) a konstantních rychlostí stolu podélného i příčného lze pozorovat zvyšování napětí signálu. Až při zvýšení hloubky řezu na  $a_p = 0,06$  mm došlo k poklesu.

### Vertikální frézování

Druhého největšího napětí signálu bylo dosaženo při vertikálním frézování. Nástroj pro vertikální frézování je vícebřítý. Konkrétně má šest břitů. Společný znak s rovinným broušením je rotační pohyb nástroje. Ze všech použitých technologií zde bylo ubíráno největší hloubkou řezu (0,5 - 1,5 mm). Avšak otáčky nástroje (řezná rychlost) byly mnohem menší, než je tomu při rovinném broušení. Rozdíl oproti rovinnému broušení je také v kladném úhlu čela destiček.

Při zvýšení otáček nástroje (řezné rychlosti) a konstantní rychlosti posuvu stolu lze pozorovat zvýšení napětí signálu pro všechny hloubky řezu. Při zvětšení hloubky řezu, konstantní řezné rychlosti a konstantní rychlosti posuvu stolu je nejprve zaznamenán pokles napětí signálu a po dalším zvětšení nastává zvýšení napětí signálu.

### Horizontální obrážení

Nejmenšího napětí signálu bylo dosaženo při horizontálním obrážení. Nástroj pro horizontální obrážení je jednobřítý s neutrálním úhlem čela a oproti ostatním technologiím vykonává pohyb přímočarý. Úběr materiálu probíhal v desetinách milimetru (0,1-0,3 mm). Řezná rychlost byla použita nejmenší ze všech technologií. Nicméně u horizontálního obrážení byla naměřena tak malá napětí signálu, že na jejich hodnotu nejspíše nemělo takový vliv tření, ani deformace materiálu, ale s největší pravděpodobností dotyk mezi třískou a obrobkem.

Při zvýšení řezné rychlosti a konstantní posuvové rychlosti stolu je nejprve patrné zvýšení napětí signálu pro hloubky řezu  $a_p = 0,1$  mm a  $0,2$  mm. Při zvýšení řezné rychlosti, konstantní posuvové rychlosti stolu a zvětšení hloubky řezu na  $a_p = 0,3$  mm je napětí signálu menší, než je tomu při menší řezné rychlosti. Při zvětšení hloubky řezu, konstantní řezné rychlosti a konstantní posuvové rychlosti stolu se napětí signálu nejprve zvyšuje. Při dalším zvětšení hloubky řezu se napětí signálu zmenší.

## 10 Závěr

V průběhu experimentů diplomové práce byly jednotlivé technologie vyhodnoceny při různých podmínkách řezu a vycházelo se ze střední hodnoty napětí emisního RMS signálu. Pro všechny technologie bylo využito vysokorychlostní kamery, která se zaměřila na snímání části průběhu řezu. Vysokorychlostní kamera se jeví jako užitečný pomocník pro vyhodnocení.

U rovinného broušení byl řezný proces rozdělen na úseky nesousledného a sousledného rovinného broušení. Sledován byl vývoj napětí emisního RMS signálu pro jednotlivé úseky při zvětšování hloubky řezu. Dalším úkonem bylo změření signálu úseků v závislosti na čase. Z těchto dat byl vypočítán přibližný podélný posuv stolu rovinné brusky. Z vysokorychlostní kamery byli odhaleni možní původci největších píků v signálu. Pokud by byla provedena další měření pro potvrzení těchto výsledků, bylo by nejspíše vhodné zkoumat i drsnost povrchu po jednotlivých hloubkách řezu rovinného broušení, za účelem zjištění, zda se při snižujících či zvyšujících průměrných hodnotách emisního RMS signálu dá pozorovat změna drsnosti a jaká, nebo zda je při těchto hodnotách signálu naprosto zanedbatelná. Dále by se dalo vyzkoušet, kdy (při nesousledném či sousledném broušení) a při jaké hloubce řezu je řez kotouče stabilnější v závislosti na napětí emisního RMS signálu.

U horizontálního obrázení byl vývoj napětí emisního RMS signálu sledován při zvětšování hloubky řezu a při zvyšování řezné rychlosti. Z vysokorychlostní kamery byl odhalen možný původ napětí signálu v podobě dotyku mezi odebíranou třískou a obrobkem. Při dalších možných experimentech by bylo vhodné násobně zvětšit hloubku řezu a zkoumat, jak se bude napětí signálu dále vyvíjet.

U vertikálního frézování byl vývoj napětí emisního RMS signálu sledován při zvýšení otáček nástroje a při zvětšování hloubky řezu. Získané napětí signálu bylo dále rozděleno do tří úseků, které se vyhodnocovaly. Poté bylo napětí signálu vyhodnoceno jako celkové, kde bylo porovnáno napětí signálu při různých podmínkách řezu. Při výpočtu času jedné otáčky nástroje bylo odhaleno, že počet píků za daný časový úsek odpovídá počtu zubů nástroje. Z vysokorychlostní kamery byla odhalena destička, která buďto odebrala mnohem menší třísku, nebo prakticky vůbec žádnou. Od tohoto faktu se odvíjí teorie, že největší píky v signálu představuje tato destička. Pro další měření by mohla být použita fréza s různou roztečí zubů (destiček).

Napětí signálů pro jednotlivé technologie se výrazně lišila, proto lze říci, že největší napětí signálu bylo u rovinného broušení, poté u vertikálního frézování a nejmenší napětí bylo při horizontálním obrázení.

## 11 Použitá literatura

- [1] ŽIŽKA, J. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Habilitační práce, Fakulta strojní, Technická univerzita, Liberec, 1998.
- [2] Dittrich, J. *Studium deformačních mechanismů v hořčíkové slitině s texturou*. Bakalářská práce, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 2019.
- [3] Máthis Kristián a kol. *In-situ studium deformačních mechanismů hořčíkových slitin a kompozitů metodami akustické emise a neutronové difrakce*. Katedra fyziky materiálů, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Praha [online]. [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <https://www.docplayer.cz>
- [4] *Introduction to Acoustic Emission Testing* [online]. [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org>
- [5] Bičovská, B. *Elektrická měření*. Učební text, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007. 97 s. ISBN 978-80-248-1480-3
- [6] Krasavin, T. *Využití akustické emise pro monitorování leteckých konstrukcí*. Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Vysoké učení technické, Brno, 2018.
- [7] *Akustická emise* [online]. [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://www.adandt.cz>
- [8] *Nedestruktivní metody testování, Akustická emise* [online]. [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: [https://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html](https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html)
- [9] ČSN EN 1330-9 – *Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz>
- [10] Ilyinykh, O. *Porovnání dosavadních výzkumů v oblasti analýzy akustické emise při obrábění*. Bakalářská práce, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2013.
- [11] Kopec, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukcí*. 1. vydání. Akademické nakladatelství CERM Brno, 2008. 580 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

- [12] Siddhpura, A., Paurobally R., *A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process*, Int J Adv Manuf Technol, University of Western Australia, 2013.
- [13] *Měřicí systémy firmy KISTLER* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-5125c/>
- [14] *Hoblovací nůž ubírací, pravý* [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://katalog.mav.cz>
- [15] *Fréza AVANTEC* [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://shop.avantec.de/page/artikel/cat/Megavant+HC90/art/04M.0540.150/>
- [16] *Číslicové zpracování ergodických procesů*, Experimentální mechanika, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: [https://www.kme.zcu.cz/kmet/exm/download/EXM\\_PREDNASKA\\_09.pdf](https://www.kme.zcu.cz/kmet/exm/download/EXM_PREDNASKA_09.pdf)
- [17] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [18] MASLOV, J. *Teorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 246 s
- [19] Čep, R. *Technologie II - 2.díl*. Skripta. Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie, Technická univerzita Ostrava [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [20] Šedo, V. *Vliv nákupu brusného CNC centra na produktivitu výroby*. Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2018.
- [21] *Chemické složení oceli C45 dle ČSN* [online]. [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel\\_12050.3.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_12050.3.pdf)
- [22] Humár, A. *Technologie I, technologie obrábění - 2.část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2004 [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DI3MK\\_STR3/um/TI\\_TO-2cast.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DI3MK_STR3/um/TI_TO-2cast.pdf)
- [23] Kos, B. *Nástroje pro frézování*. Bakalářská práce, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Vysoké učení technické, Brno, 2008.

- [24] UEKITA, M. & TAKAYYA, Y. *Tool condition monitoring for form milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9082-6>
- [25] Paulo Roberto de Aquiar, Eduardi Carlos Bianchi a Rubens Chinali Canarim. *Monitoring of Grinding Burn by Acoustic Emission*. University Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP) – Bauru campus, Brazil. [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/acoustic-emission/monitoring-of-grinding-burn-by-acoustic-emission->

## Seznam obrázků:

Obrázek 1: Princip AE a zobrazení vlny signálu (Zdroj: [8]) .....	12
Obrázek 2: Schéma detekce a zpracování AE (Zdroj: [4]) .....	12
Obrázek 3: Schéma detekce a zpracování signálu AE (Zdroj: [2]).....	13
Obrázek 4: Vlna akustické emise (Zdroj: [4]).....	13
Obrázek 5: Vlna akustické emise (Zdroj: [16]).....	15
Obrázek 6: Schematické rozdělení akustické emise v závislosti na frekvenci uvolňovaných vln (Zdroj: [1]).....	16
Obrázek 7: Kaiserův jev (Zdroj: [11]).....	17
Obrázek 8: Felicity jev (Zdroj: [11]).....	18
Obrázek 9: Vymezení zdrojů akustické emise (Zdroj: [1]).....	20
Obrázek 10: Možné zdroje signálu AE při obrábění (Zdroj: [12]) .....	21
Obrázek 11: Úhly jednotlivých zrn brusiva (Zdroj: [19]) .....	24
Obrázek 12: Princip broušení (Zdroj: [20]).....	25
Obrázek 13: Kinematika řezného procesu při obrábění (Zdroj: [19]) .....	26
Obrázek 14: Symetrické frézování .....	27
Obrázek 15: Nesymetrické frézování .....	27
Obrázek 16: Použitý měřicí systém pro detekci akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ).....	29
Obrázek 17: Piezoelektrický snímač AE (Zdroj: VLASTNÍ) .....	29
Obrázek 18: AE signál za filtry (Zdroj: [13]) .....	30
Obrázek 19: Ae signál za RMS převodníkem (Zdroj: [13]).....	30
Obrázek 20: Vysokorychlostní kamera (Zdroj: VLASTNÍ) .....	31
Obrázek 21: Vysokorychlostní kamera se zapojením (Zdroj: VLASTNÍ) .....	31
Obrázek 22: Výkres před obrobeného polotovaru z oceli C45 (Zdroj: Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.) .....	32
Obrázek 23: Upnutí obrobku na magnetickou desku rovinné brusky BERNARDO BSG 2550 AHD a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ) .....	33
Obrázek 24: Použitý brusný kotouč NORTON (Zdroj: VLASTNÍ).....	34
Obrázek 25: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při nesousledném rovinném broušení, $A_p = 0,04$ (Zdroj: VLASTNÍ) .....	41
Obrázek 26: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při sousledném rovinném broušení, $A_p = 0,04$ (Zdroj: VLASTNÍ) .....	42
Obrázek 27: Vyjetí brusného kotouče z obrobku při nesousledném rovinném broušení, $A_p = 0,04$ (Zdroj: VLASTNÍ) .....	42
Obrázek 28: Upnutí obrobku na pracovní stůl horizontální obrážečky STRIGON GH 560/U pomocí upínek a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ) .....	44
Obrázek 29: Rozměry hoblovacího nože (Zdroj: [14]) .....	45
Obrázek 30: Detail použitého hoblovacího nože (Zdroj: VLASTNÍ).....	45
Obrázek 31: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,2$ mm a řezné .....	49
Obrázek 32: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,2$ mm a řezné .....	49
Obrázek 33: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,2$ mm a řezné .....	49
Obrázek 34: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,3$ mm a řezné .....	50
Obrázek 35: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,3$ mm a řezné .....	50
Obrázek 36: Horizontální obrázení při hloubce řezu $a_p = 0,3$ mm a řezné .....	50
Obrázek 37: Upnutí obrobku na pracovní stůl vertikální frézky TOS FNGJ 20 pomocí upínek a montáž snímače akustické emise (Zdroj: VLASTNÍ) .....	51
Obrázek 38: Fréza AVANTEC 04M.0540.150 (Zdroj: VLASTNÍ).....	52
Obrázek 39: Fréza AVANTEC 04M.0540.150 (Zdroj: [15]) .....	52



Obrázek 40: Fréza v plné šířce záběru (Zdroj: VLASTNÍ) .....	53
Obrázek 41: Fréza při výjezdu z obrobku (Zdroj: VLASTNÍ) .....	53
Obrázek 42: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min - destička 1 a 2 .....	55
Obrázek 43: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min - destička 2 a 3 .....	55
Obrázek 44: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min - destička 3 a 4 .....	56
Obrázek 45: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min - destička 4 a 5 .....	56

## Seznam tabulek:

Tabulka 1: Chemické složení oceli C45 v % (Zdroj: [21]) .....	32
Tabulka 2: Technická data rovinné brusky BERNARDO BSG 2550 AHD, naměřené rozměry brusného kotouče (Zdroj: Technická příručka rovinné brusky BERNARDO).....	34
Tabulka 3: Řezné podmínky při rovinném broušení .....	35
Tabulka 4: Naměřené hodnoty času při rovinném broušení při různých hloubkách řezu.....	37
Tabulka 5: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro hloubku řezu $a_p = 0,02$ a $0,03$ mm. ....	40
Tabulka 6: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro hloubku řezu $a_p = 0,04$ ; $0,05$ a $0,06$ mm. ....	40
Tabulka 7: Řezné podmínky při horizontálním obrázení .....	45
Tabulka 8: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro řeznou rychlost.....	47
Tabulka 9: Naměřené střední hodnoty napětí emisního RMS signálu pro řeznou rychlost.....	47
Tabulka 10: Nastavené řezné podmínky pro vertikální frézování .....	52
Tabulka 11: Řezné podmínky při vertikálním frézování.....	52
Tabulka 12: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při nájezdu frézy</b> do obrobku .....	61
Tabulka 13: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při záběru celé šířky frézy</b> .....	61
Tabulka 14: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při výjezdu frézy</b> z obrobku .....	61
Tabulka 15: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při nájezdu frézy</b> do obrobku .....	63
Tabulka 16: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při záběru celé šířky frézy</b> .....	63
Tabulka 17: Hodnoty měření vertikálního frézování <b>při výjezdu frézy</b> z obrobku .....	63
Tabulka 18: Průměrné hodnoty měření všech tří úseků při vertikálním frézování a .....	65
Tabulka 19: Průměrné hodnoty měření všech tří úseků při vertikálním frézování a .....	65

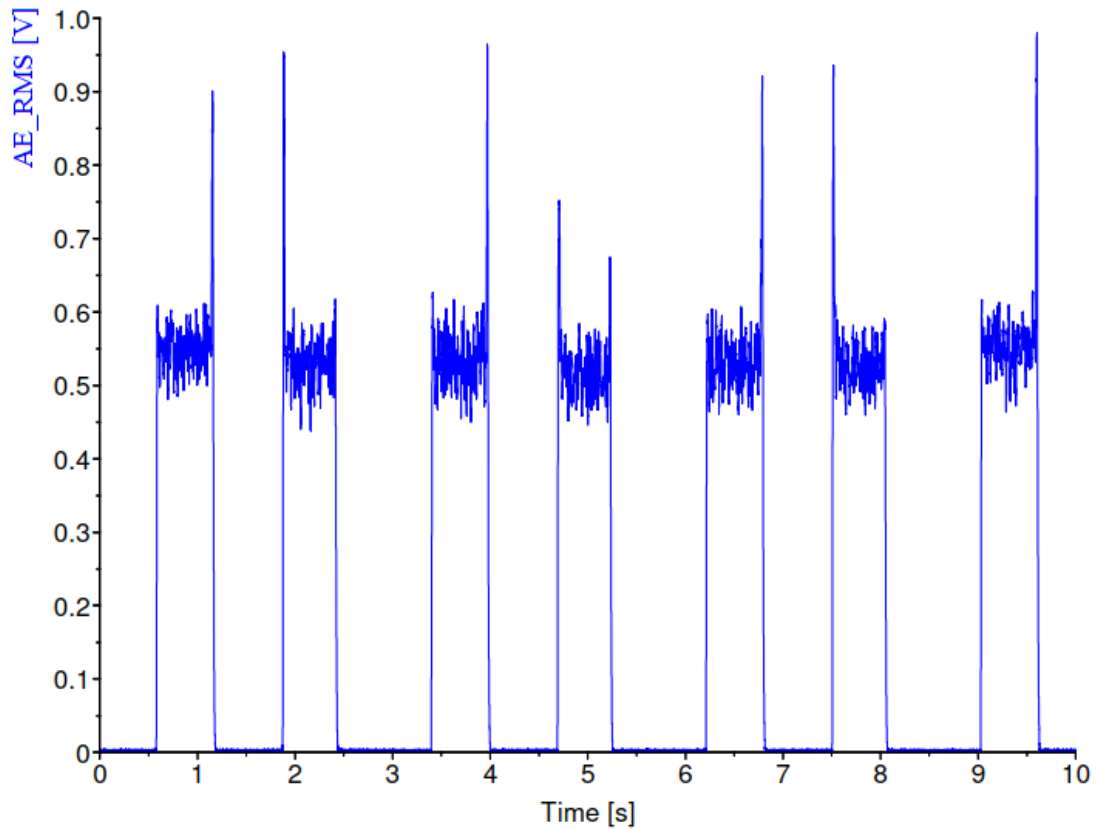
## Seznam grafů:

Graf 1: Měření času úseku rovinného broušení při $a_p = 0,02$ mm, zoom časového úseku 0,5-1,5 s .....	36
Graf 2: Měření času úseku rovinného broušení při $a_p = 0,04$ mm, zoom časového úseku 0,3-1,3 s .....	36
Graf 3: Měření času úseku rovinného broušení při $a_p = 0,06$ mm, zoom časového úseku 0,0-1,0 s .....	36
Graf 4: Rovinné broušení při $a_p = 0,02$ mm, časový úsek 0-10 s.....	38
Graf 5: Rovinné broušení nesousledné při .....	39
Graf 6: Rovinné broušení sousledné při .....	39
Graf 7: Vliv hloubky řezu $a_p$ na průběh napětí při nesousledném a sousledném broušení .....	40
Graf 8: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s .....	46
Graf 9: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s .....	46
Graf 10: Vliv hloubky řezu $a_p$ a řezné rychlosti $v_{co}$ na průběh napětí při horizontálním obrázení .....	48
Graf 11: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min, časový úsek 0-45 s .....	54
Graf 12: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n = 630$ ot/min, časový úsek 0-1 s .....	58
Graf 13: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm, $n_f = 630$ ot/min, časový úsek 20-20,5 s .....	59
Graf 14: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm, $n_f = 800$ ot/min, časový úsek 0-45 s – <b>první úsek</b> .....	59
Graf 15: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm, $n_f = 800$ ot/min, časový úsek 0-45 s – <b>druhý úsek</b> .....	59
Graf 16: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm, $n_f = 800$ ot/min, časový úsek 0-45 s – <b>třetí úsek</b> .....	59
Graf 17: Vliv hloubky řezu $a_p$ na průběh napětí při třech úsecích a konstantních .....	62
Graf 18: Vliv hloubky řezu $a_p$ na průběh napětí při třech úsecích a konstantních .....	64
Graf 19: Průměrné hodnoty všech tří úseků při vertikálním frézování a .....	65
Graf 20: Rovinné broušení při $a_p = 0,02$ mm, časový úsek 0-10 s .....	78
Graf 21: Rovinné broušení při $a_p = 0,03$ mm, časový úsek 0-10 s .....	78
Graf 22: Rovinné broušení při $a_p = 0,04$ mm, časový úsek 0-10 s .....	79
Graf 23: Rovinné broušení při $a_p = 0,05$ mm, časový úsek 0-10 s .....	79
Graf 24: Rovinné broušení při $a_p = 0,06$ mm, časový úsek 0-10 s .....	80
Graf 25: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření .....	82
Graf 26: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření .....	82
Graf 27: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření .....	83
Graf 28: Horizontální obrázení při $a_p = 0,1$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření .....	83
Graf 29: Horizontální obrázení při $a_p = 0,2$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření .....	84
Graf 30: Horizontální obrázení při $a_p = 0,2$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření .....	84
Graf 31: Horizontální obrázení při $a_p = 0,2$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření .....	85
Graf 32: Horizontální obrázení při $a_p = 0,2$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření .....	85

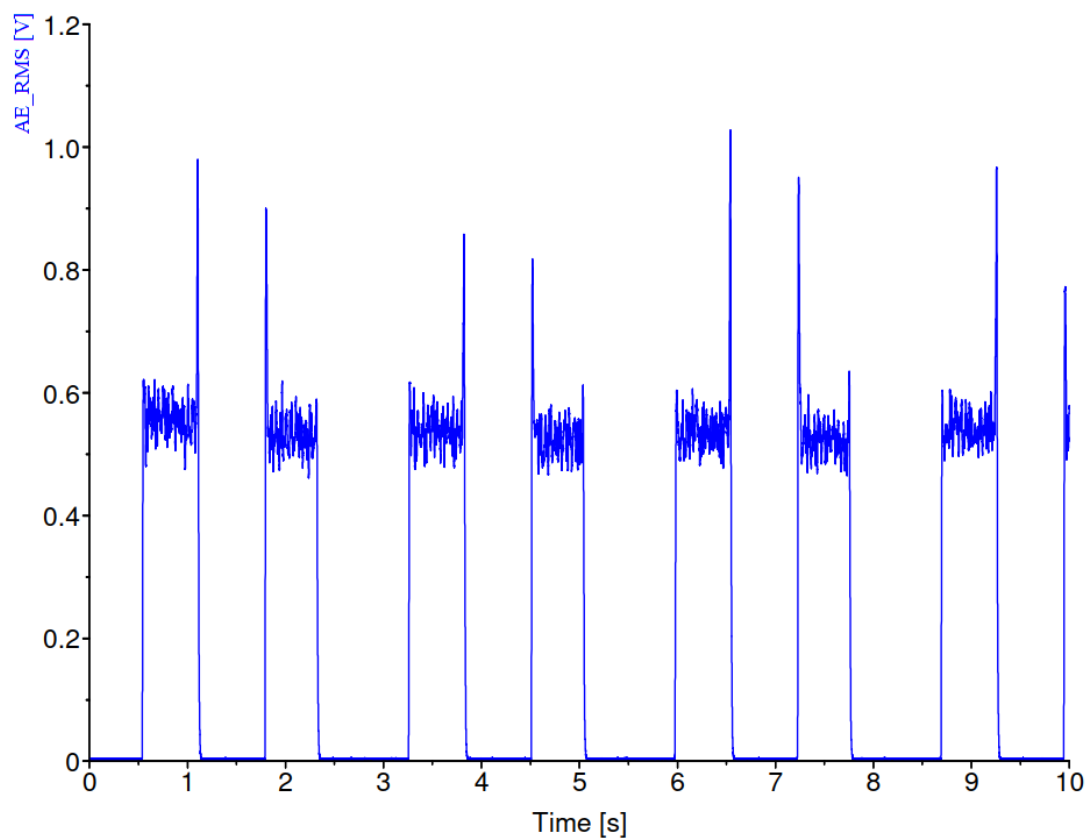
Graf 33: Horizontální obrázení při $a_p = 0,3$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření.....	86
Graf 34: Horizontální obrázení při $a_p = 0,3$ mm a $v_{co} = 25$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření.....	86
Graf 35: Horizontální obrázení při $a_p = 0,3$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – první měření.....	87
Graf 36: Horizontální obrázení při $a_p = 0,3$ mm a $v_{co} = 35$ m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření.....	87
Graf 37: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	89
Graf 38: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	89
Graf 39: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	90
Graf 40: Vertikální frézování při $a_p = 0,5$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	90
Graf 41: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	91
Graf 42: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	91
Graf 43: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	92
Graf 44: Vertikální frézování při $a_p = 1$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	92
Graf 45: Vertikální frézování při $a_p = 1,5$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	93
Graf 46: Vertikální frézování při $a_p = 1,5$ mm a $n_f = 630$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	93
Graf 47: Vertikální frézování při $a_p = 1,5$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – první měření.....	94
Graf 48: Vertikální frézování při $a_p = 1,5$ mm a $n_f = 800$ ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření.....	94

## **Příloha č. 1**

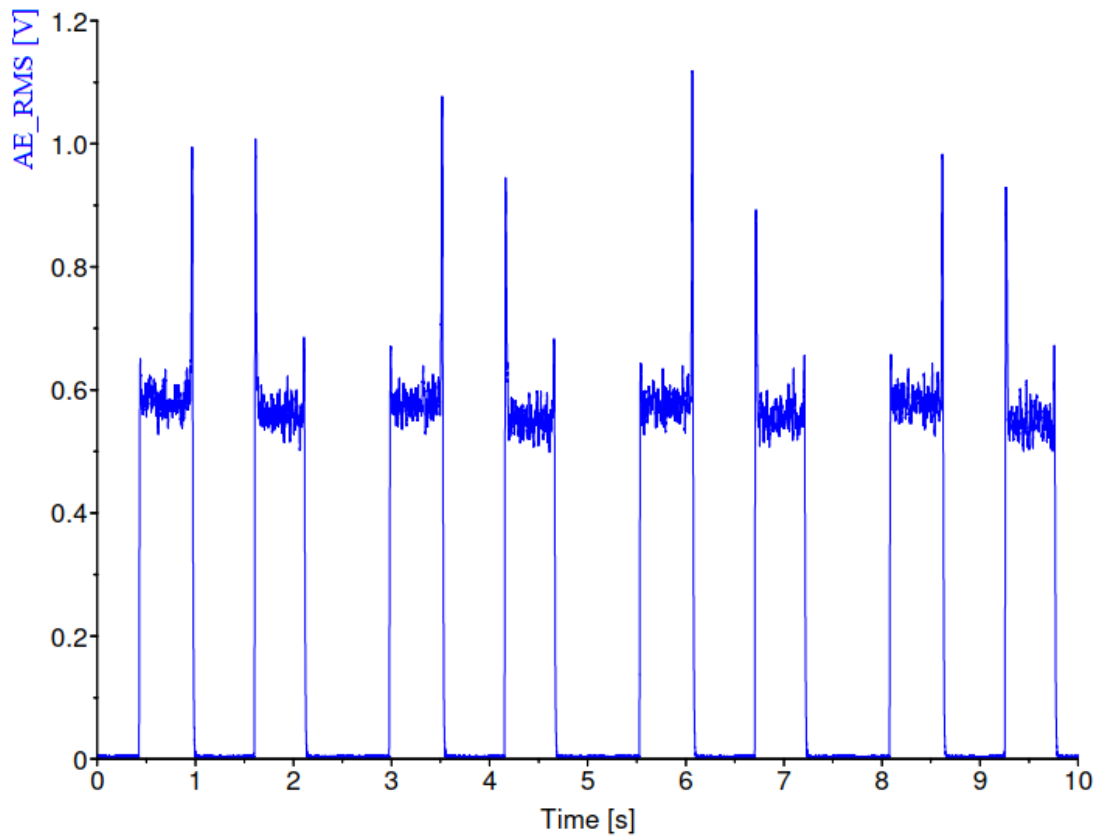
**Grafy napětí emisního RMS signálu při rovinném broušení**



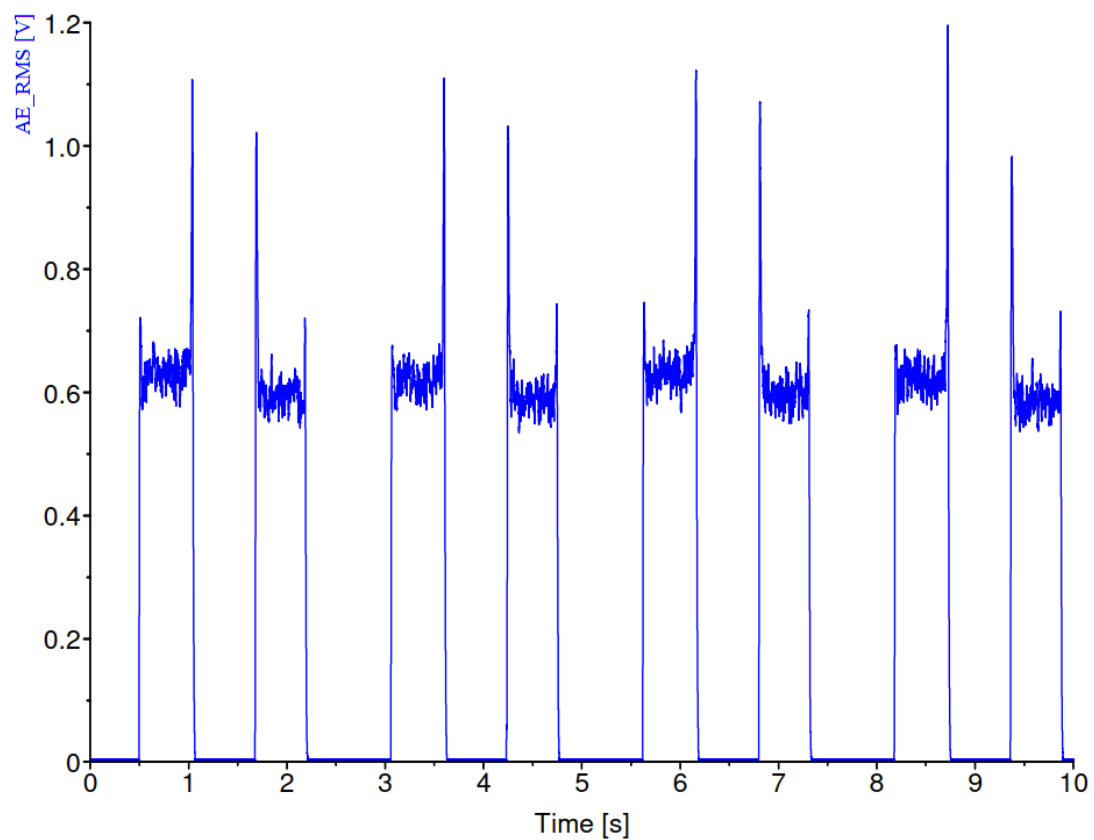
Graf 20: Rovinné broušení při  $a_p = 0,02$  mm, časový úsek 0-10 s



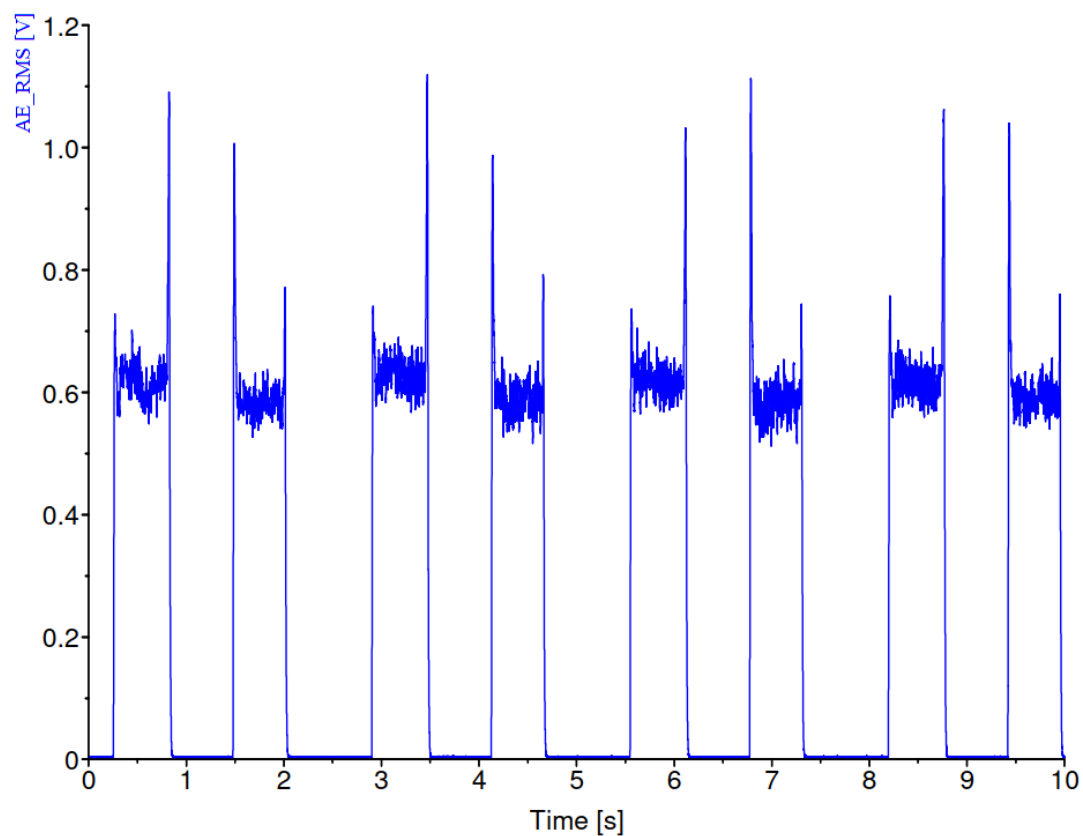
Graf 21: Rovinné broušení při  $a_p = 0,03$  mm, časový úsek 0-10 s



Graf 22: Rovinné broušení při  $a_p = 0,04$  mm, časový úsek 0-10 s



Graf 23: Rovinné broušení při  $a_p = 0,05$  mm, časový úsek 0-10 s

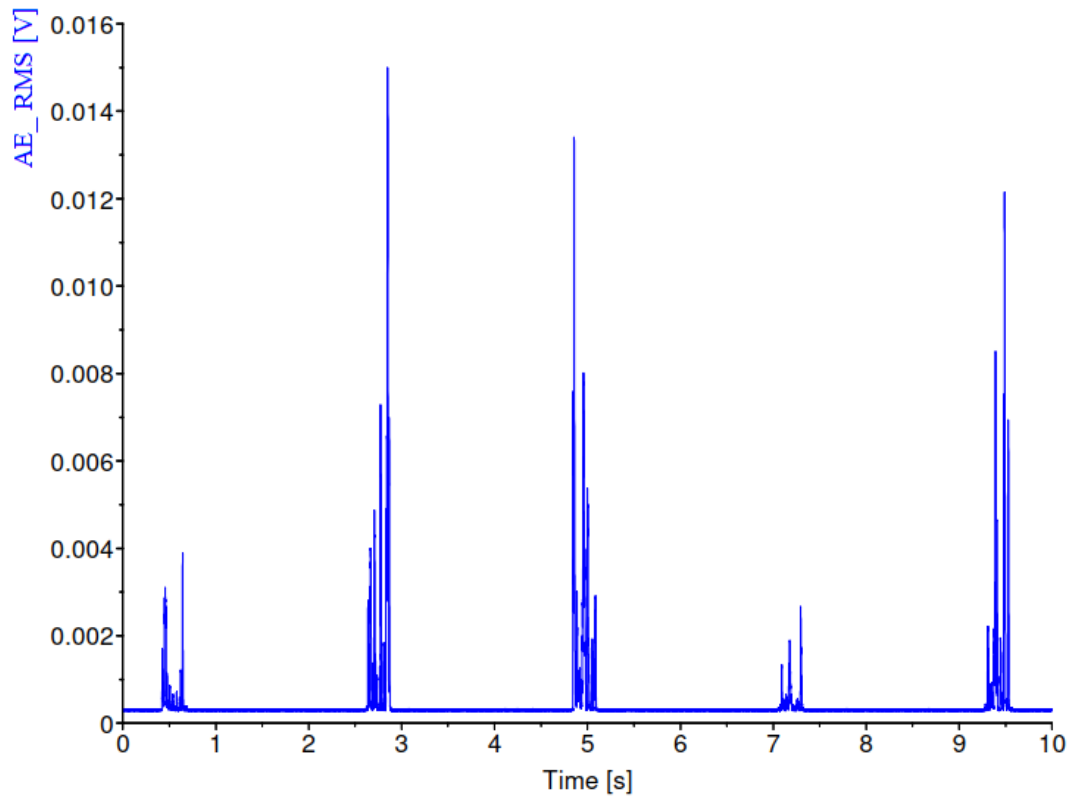


Graf 24: Rovinné broušení při  $a_p = 0,06$  mm, časový úsek 0-10 s

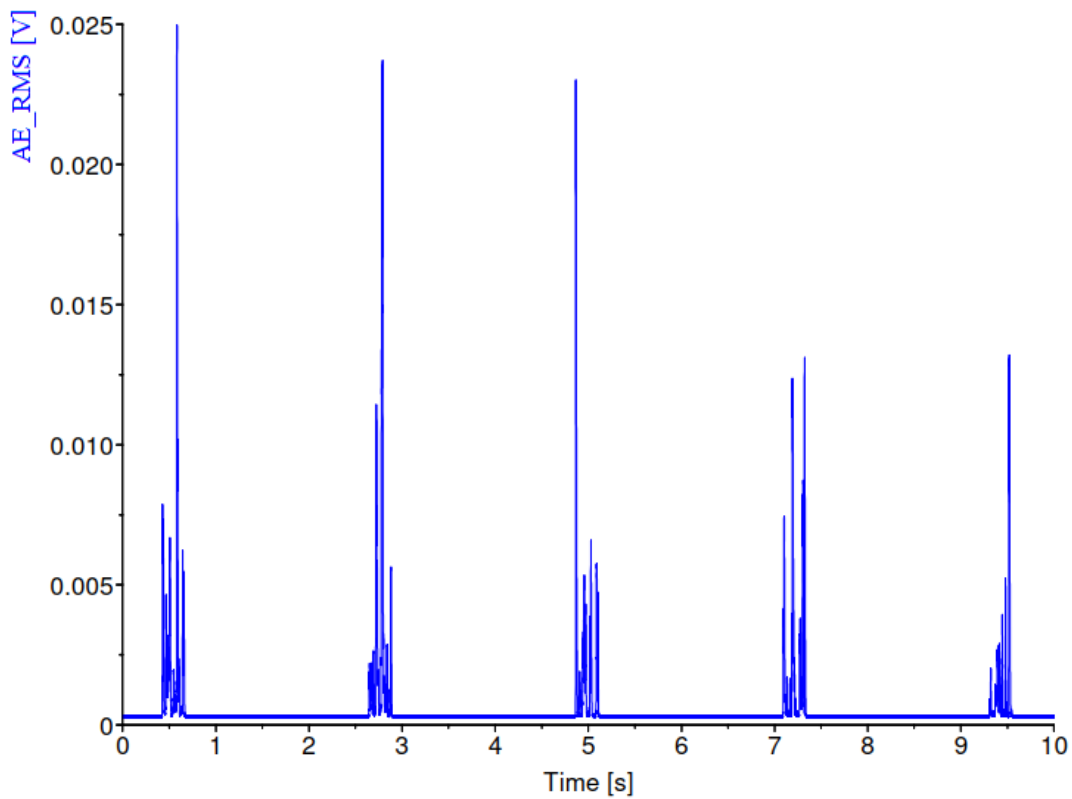


## **Příloha č. 2**

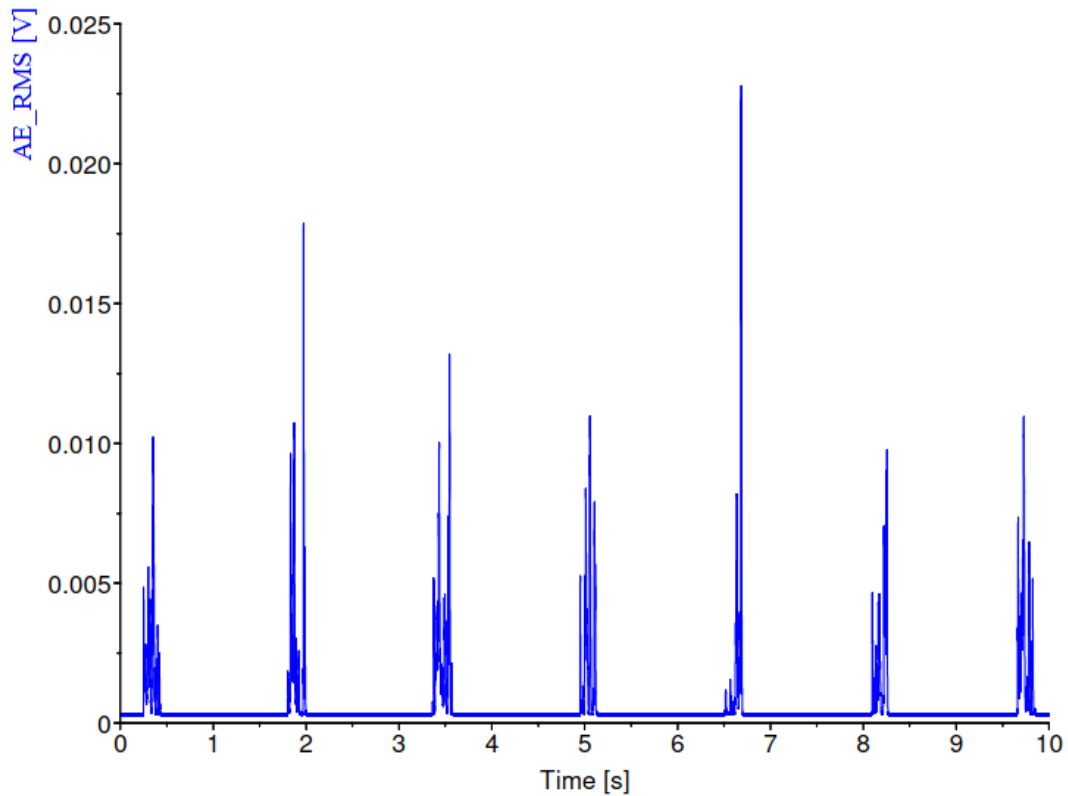
**Grafy napětí emisního RMS signálu při horizontálním obrázení**



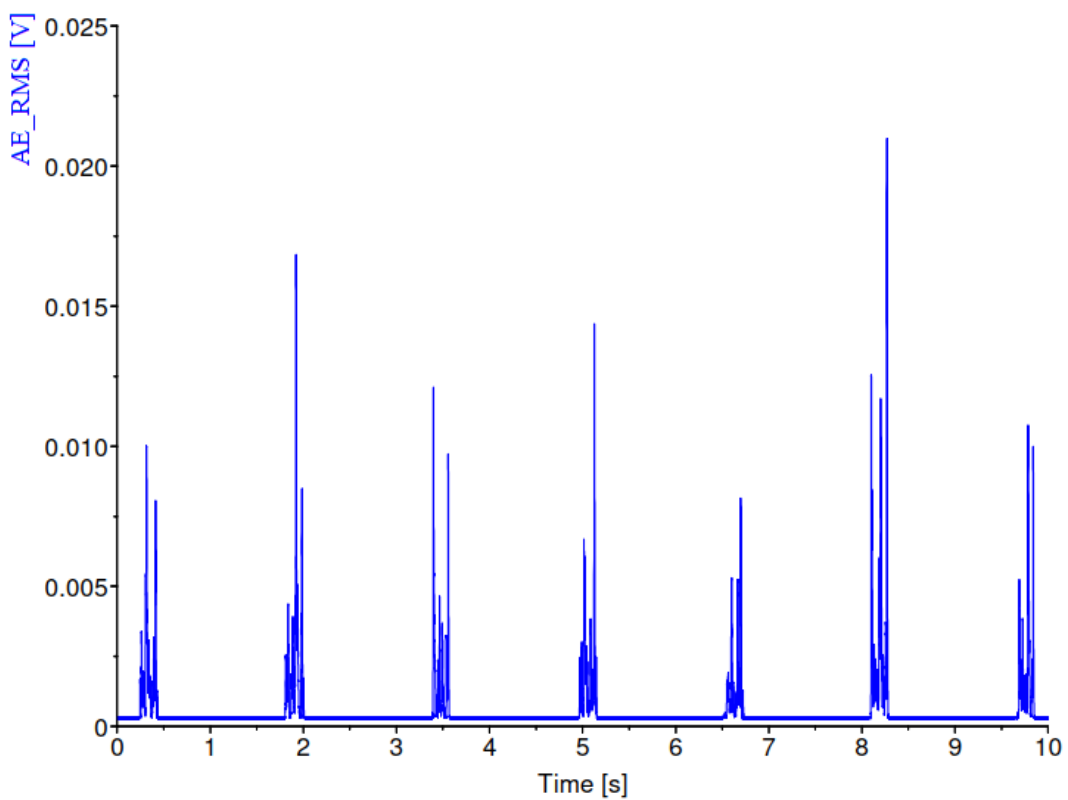
Graf 25: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,1$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – první měření



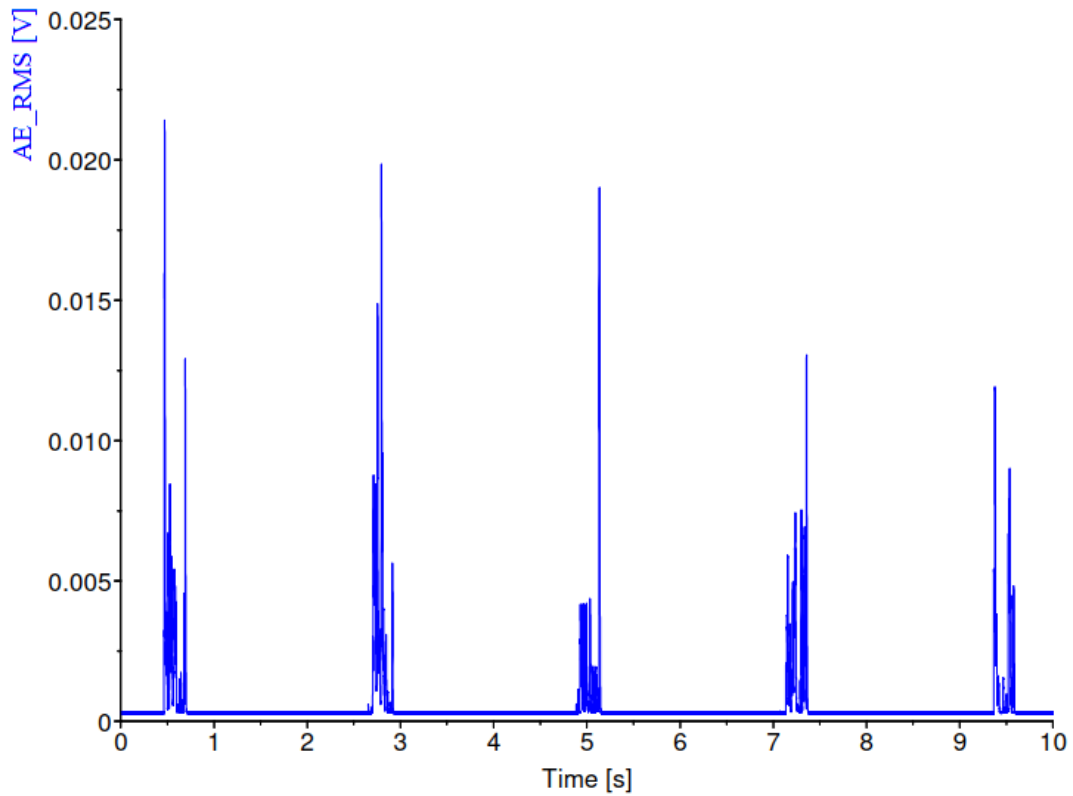
Graf 26: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,1$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření



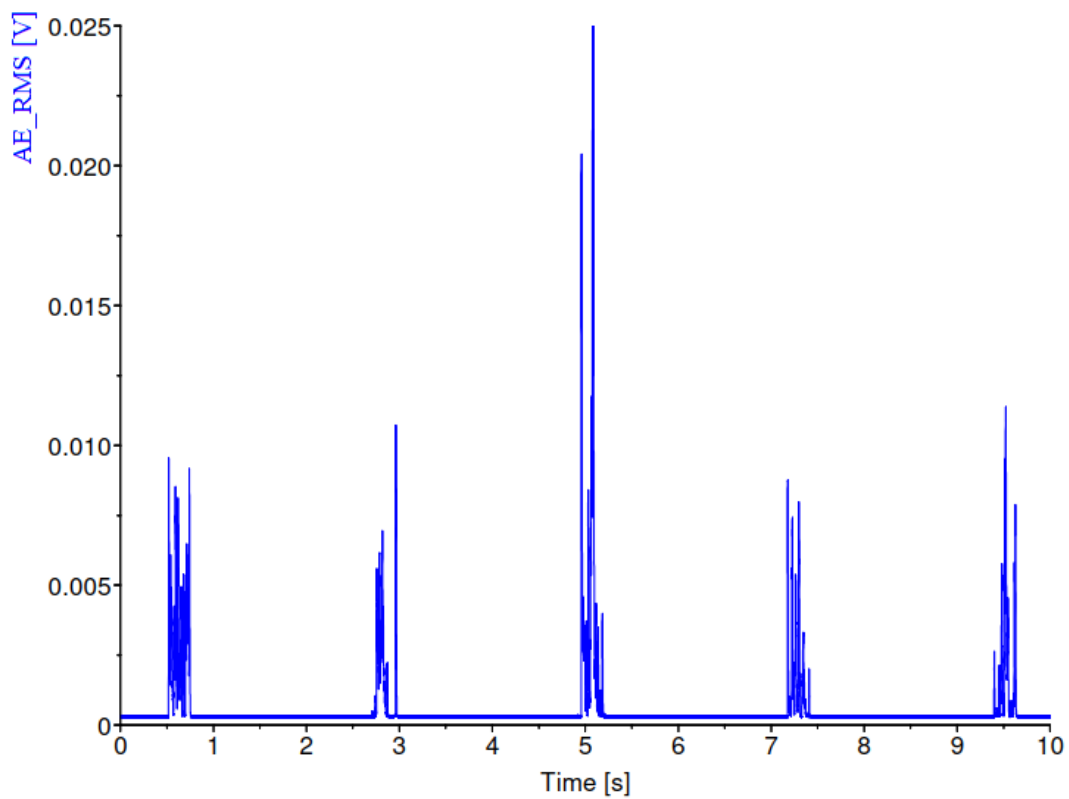
Graf 27: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,1$  mm a  $v_{co} = 35$  m/min časový úsek 0-10 s – první měření



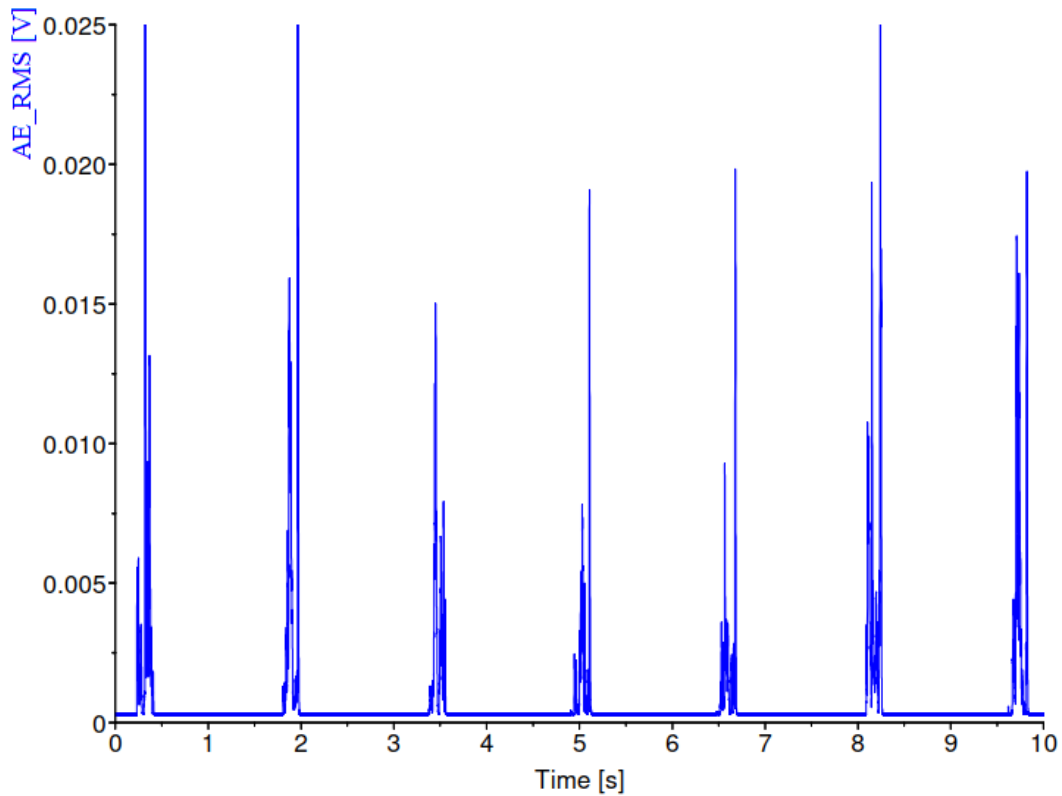
Graf 28: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,1$  mm a  $v_{co} = 35$  m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření



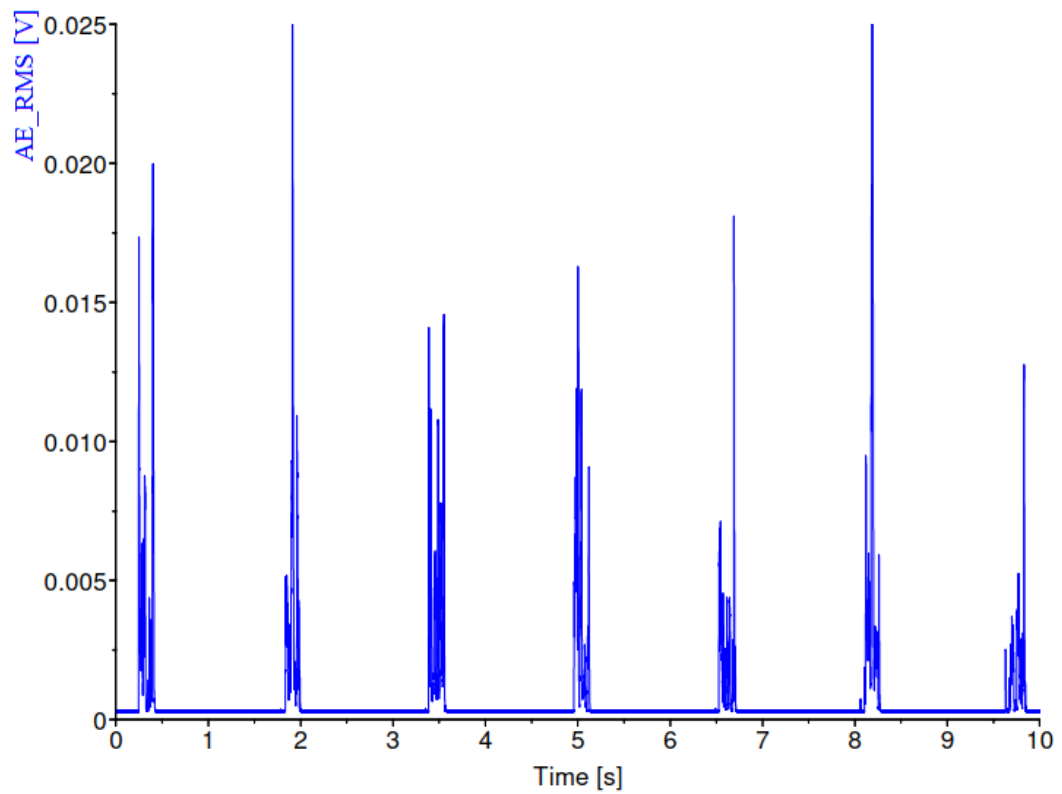
Graf 29: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,2$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – první měření



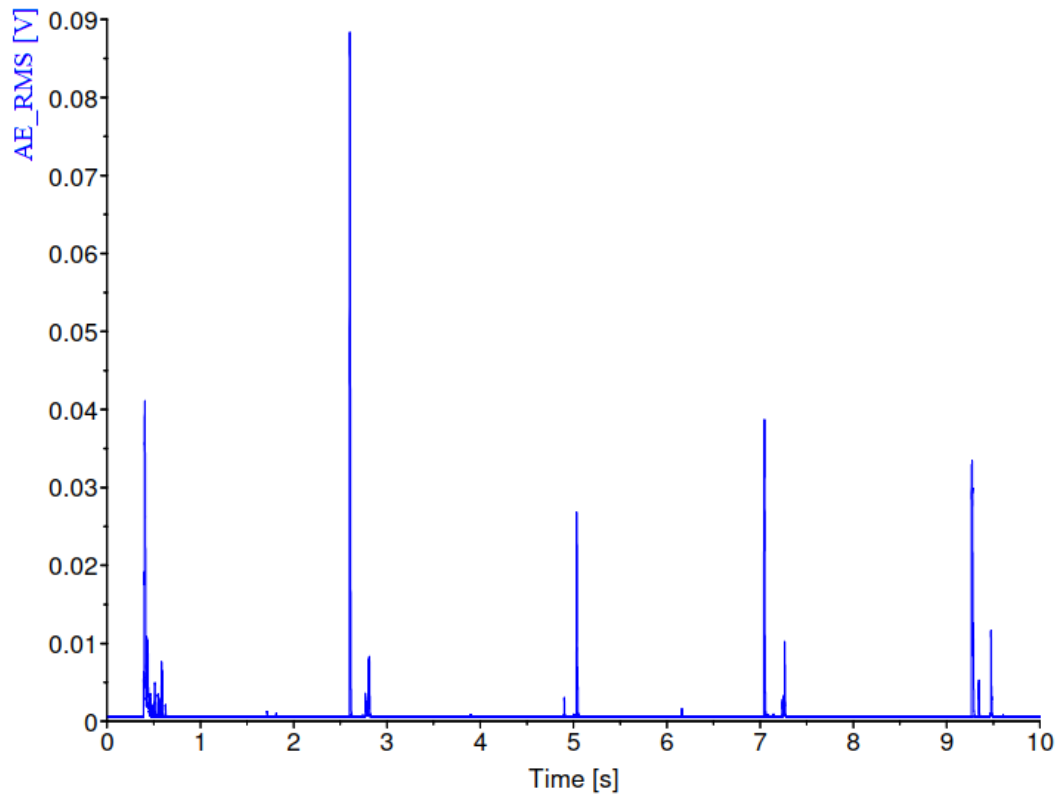
Graf 30: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,2$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření



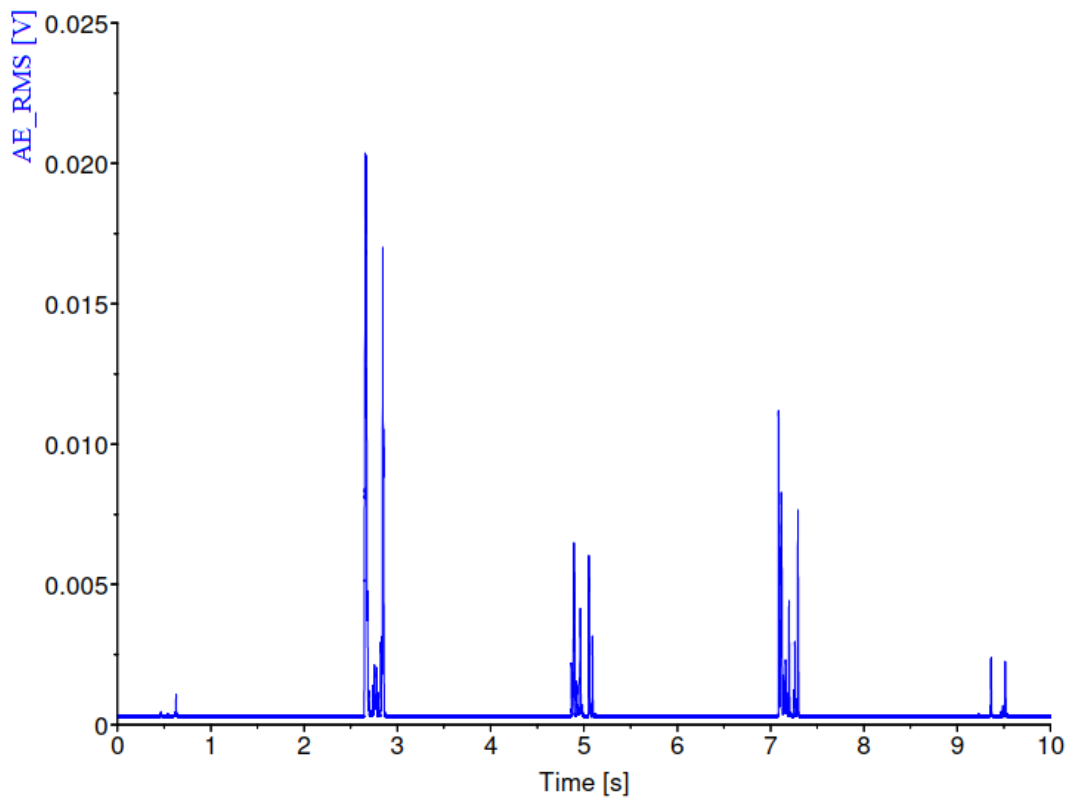
Graf 31: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,2 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 35 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s – první měření



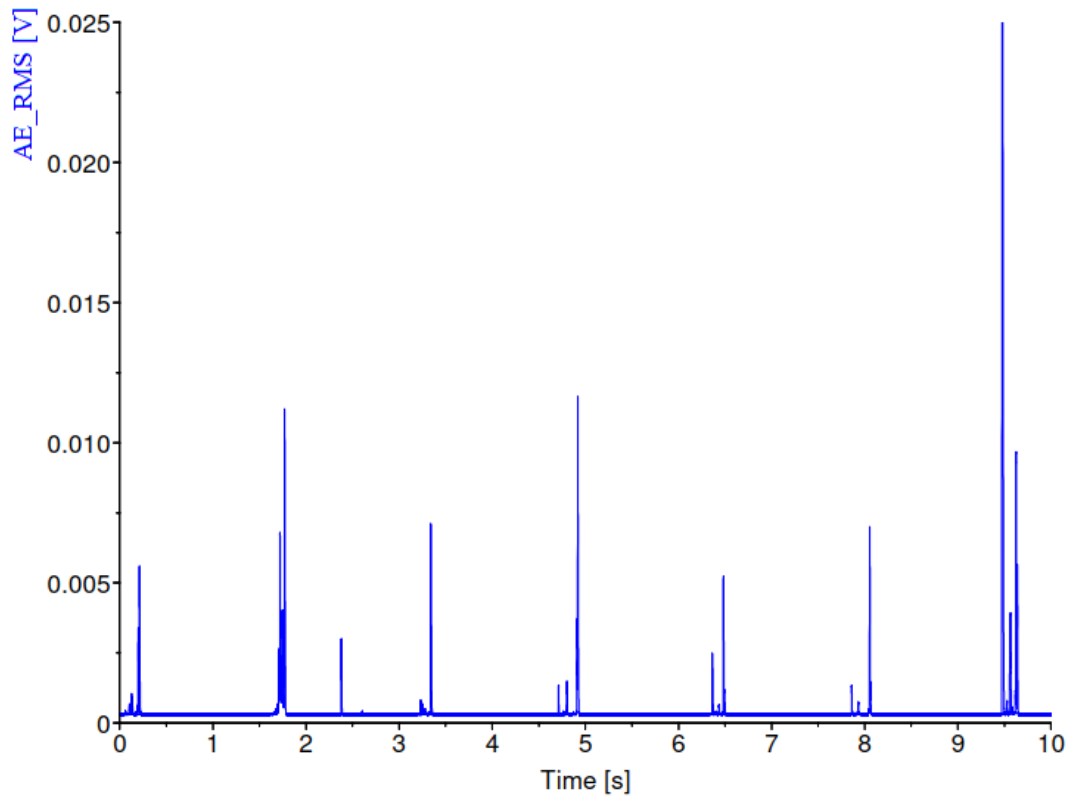
Graf 32: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,2 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 35 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s – druhé měření



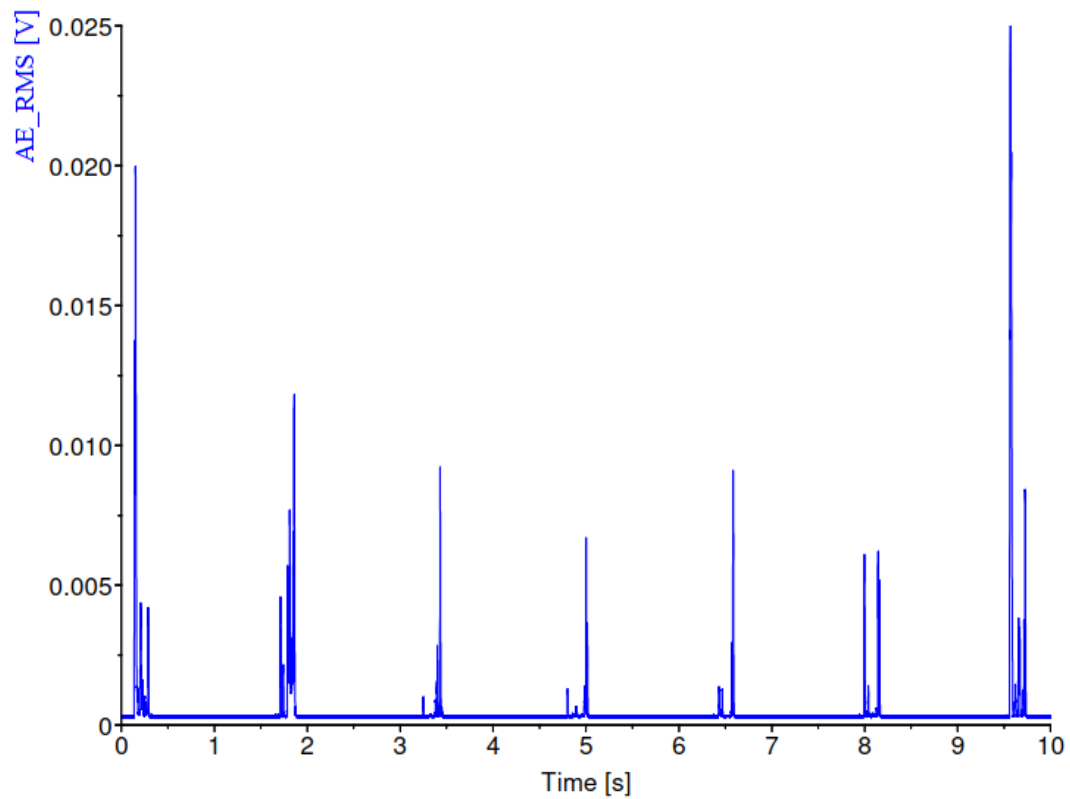
Graf 33: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,3$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – první měření



Graf 34: Horizontální obrážení při  $a_p = 0,3$  mm a  $v_{co} = 25$  m/min časový úsek 0-10 s – druhé měření



Graf 35: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,3 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 35 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s – první měření

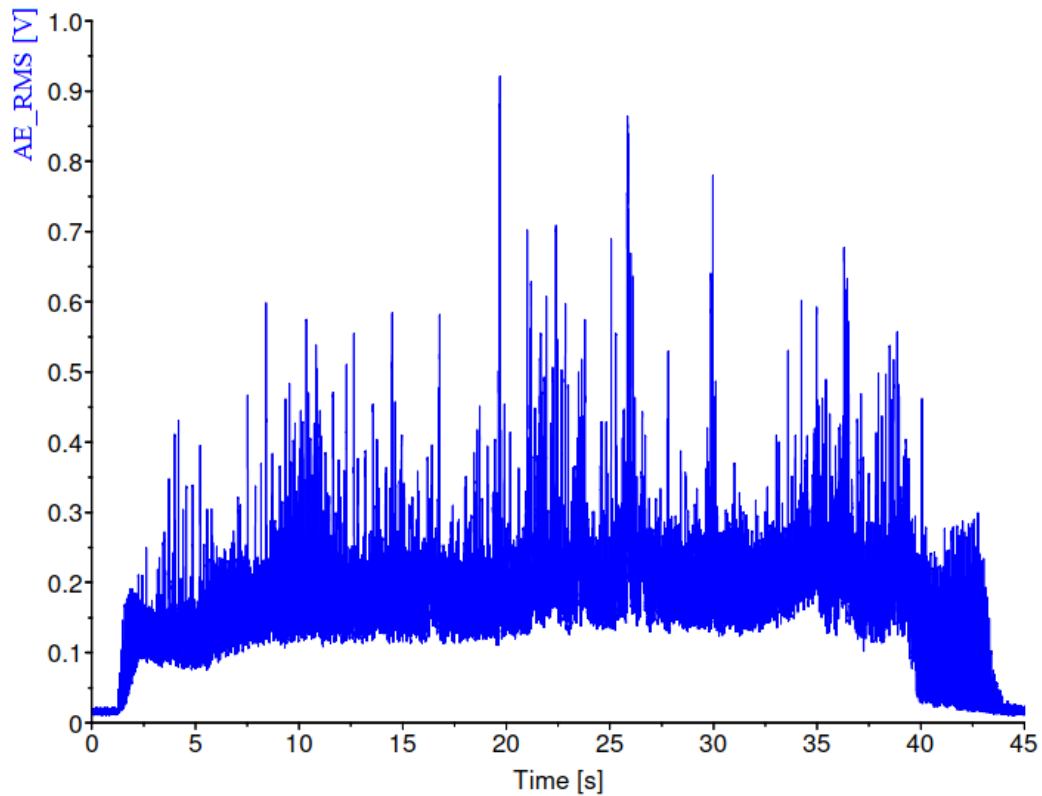


Graf 36: Horizontální obrázení při  $a_p = 0,3 \text{ mm}$  a  $v_{co} = 35 \text{ m/min}$  časový úsek 0-10 s – druhé měření

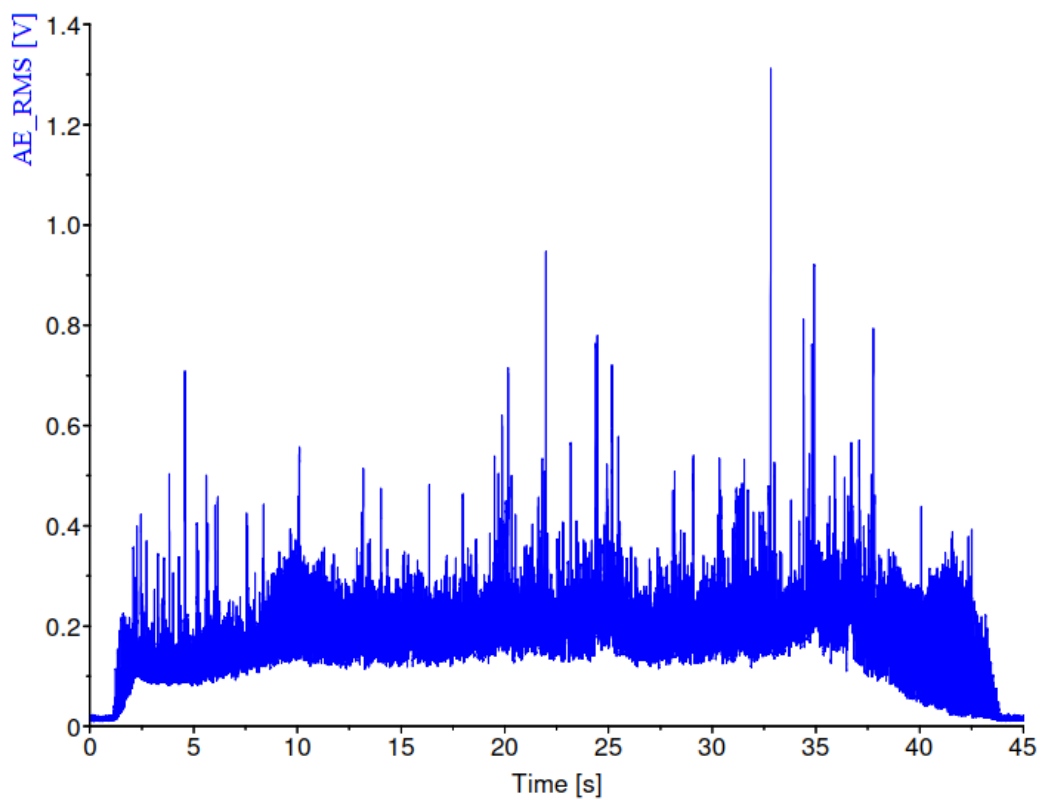
## **Příloha č. 3**

**Grafy napětí emisního RMS signálu při vertikálním frézování**

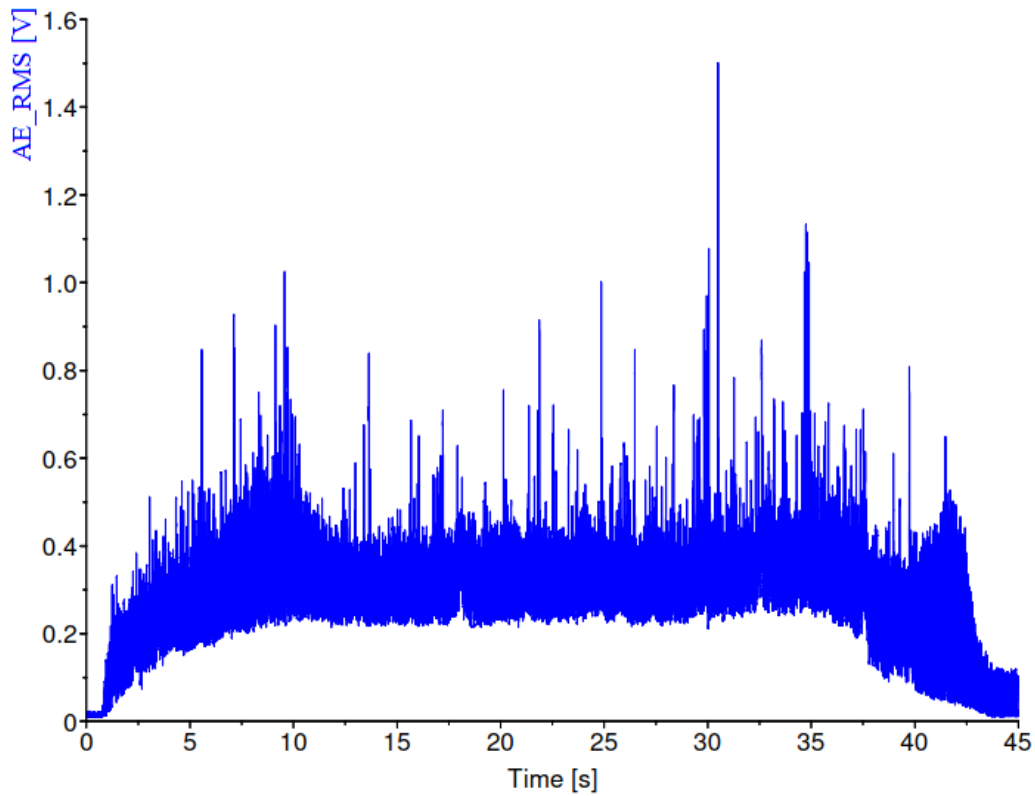




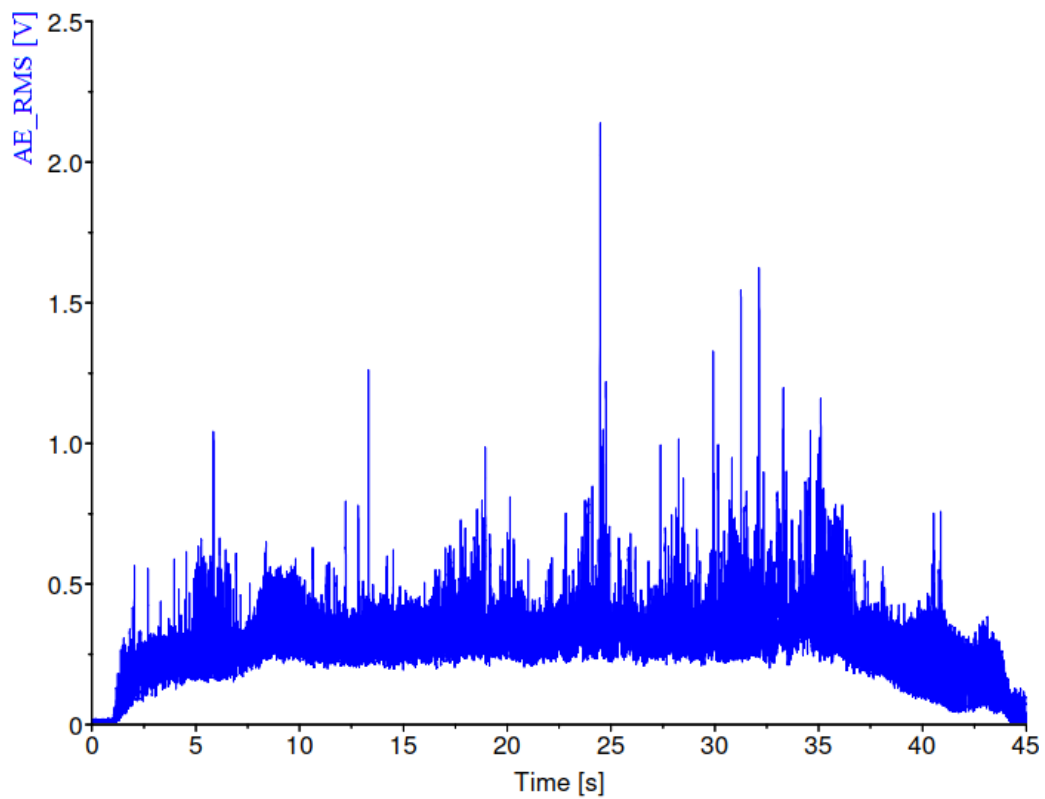
Graf 37: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5$  mm a  $n_f = 630$  ot/min časový úsek 0-45 s – první měření



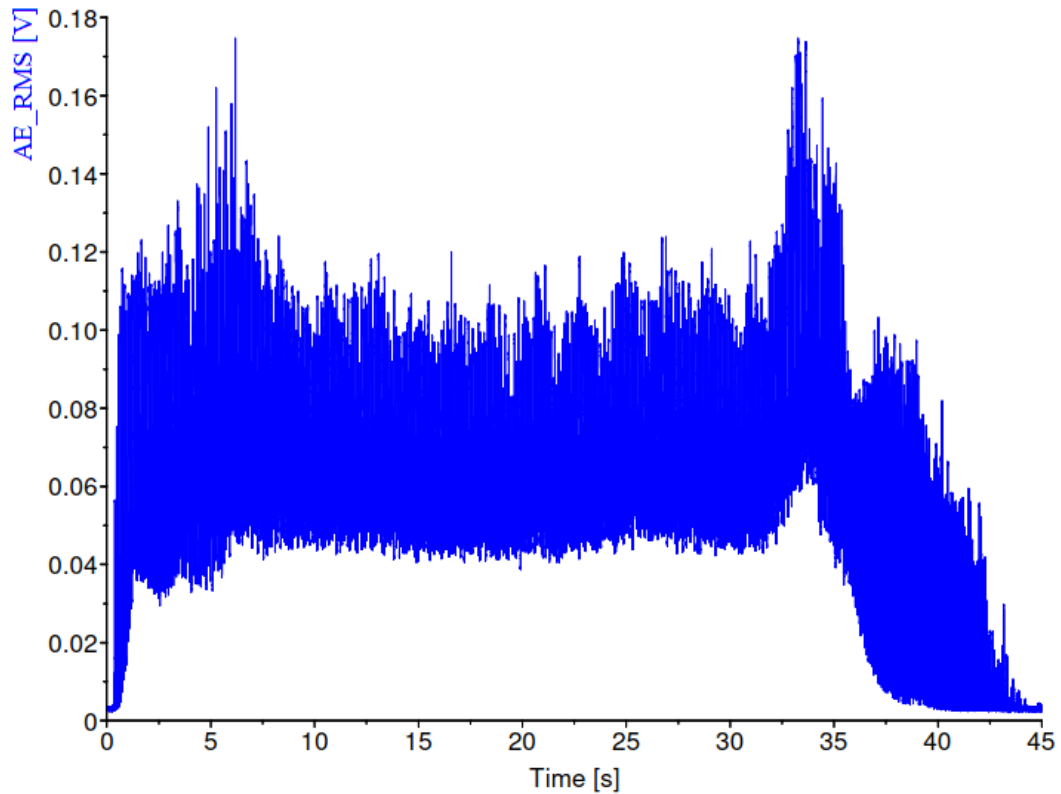
Graf 38: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5$  mm a  $n_f = 630$  ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření



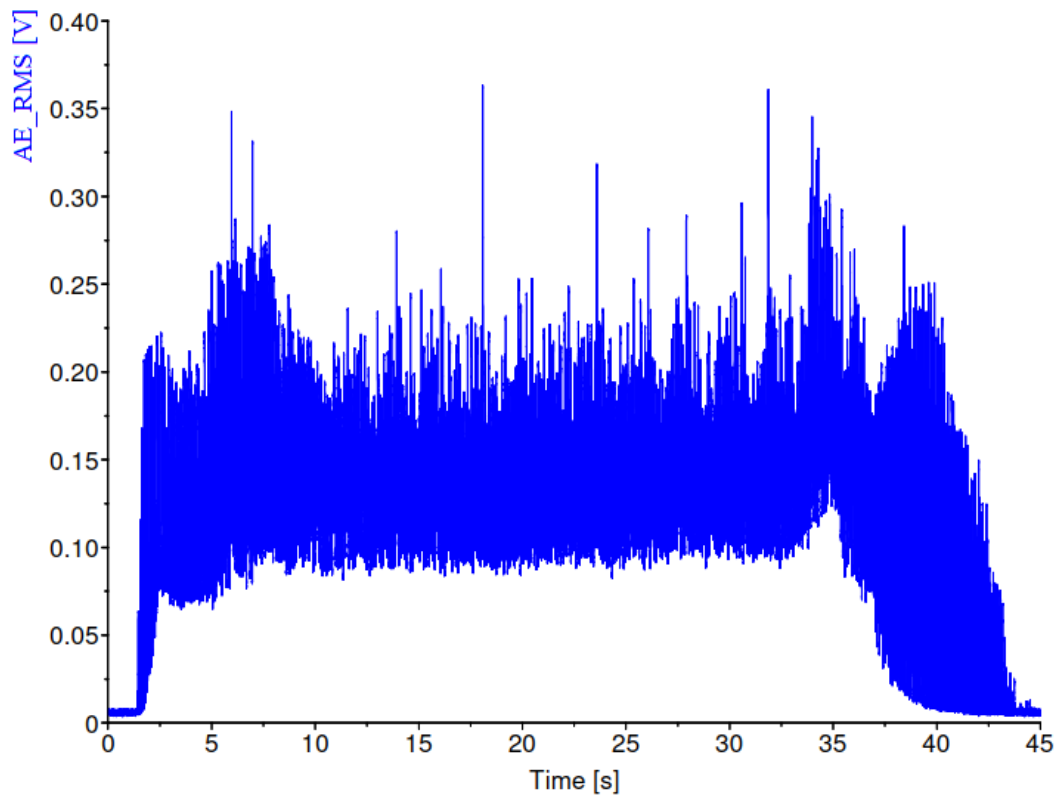
Graf 39: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  a  $n_f = 800 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – první měření



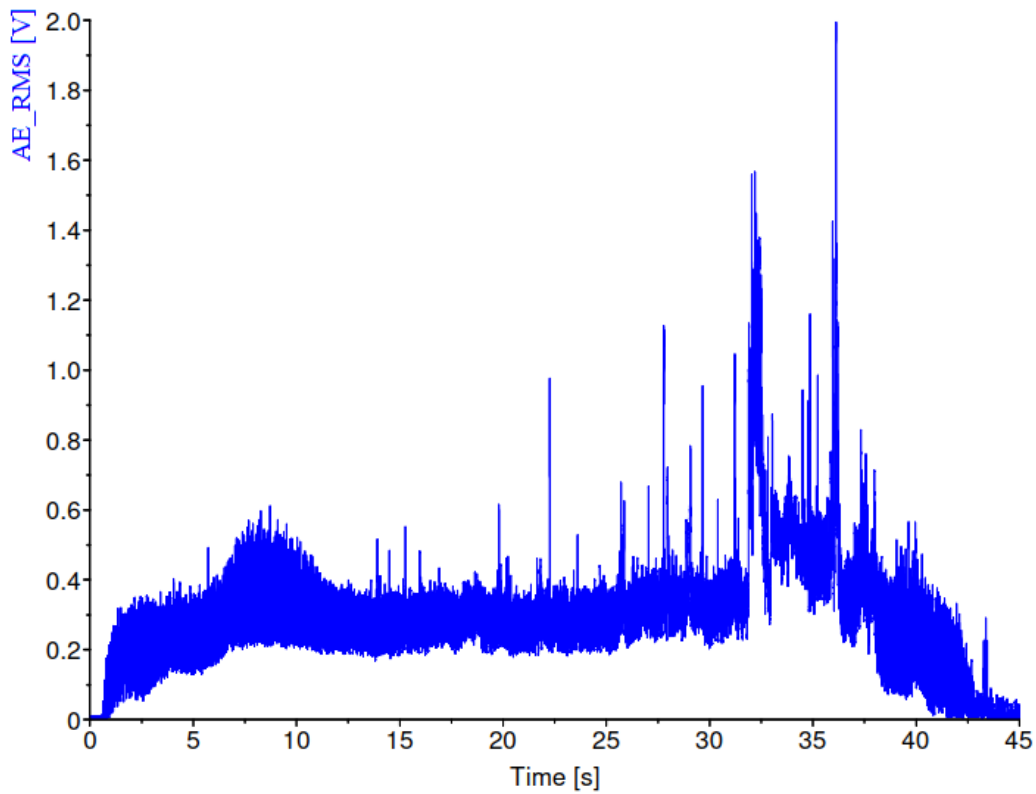
Graf 40: Vertikální frézování při  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  a  $n_f = 800 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – druhé měření



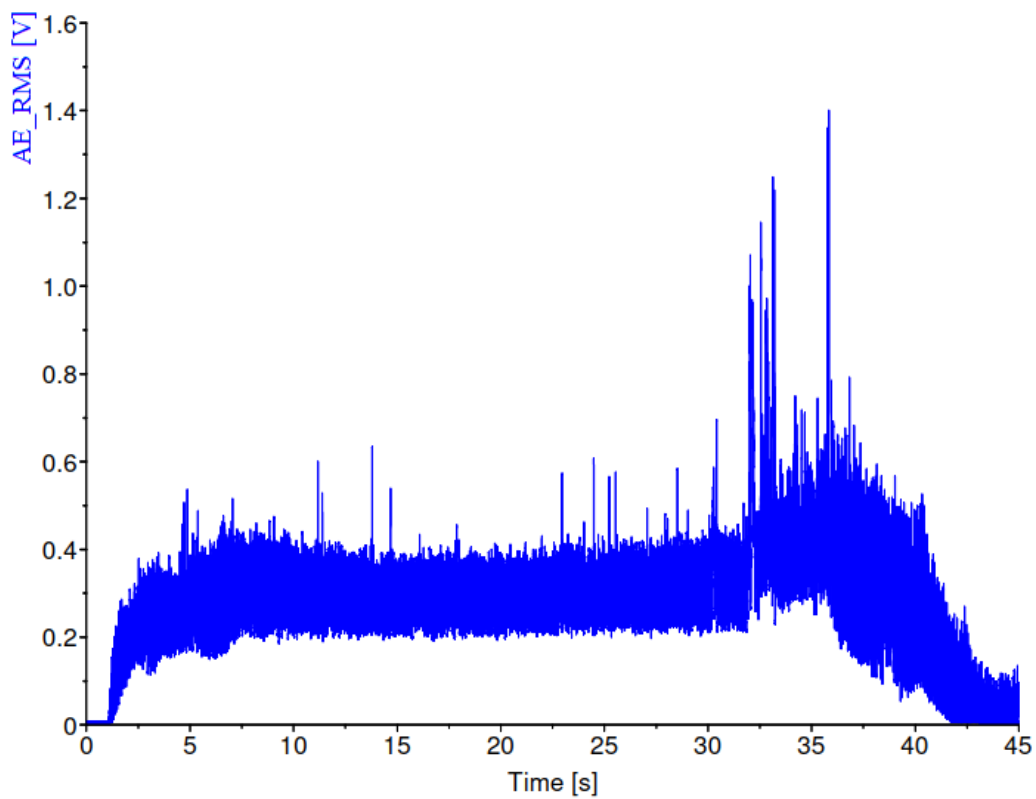
Graf 41: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$  a  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – první měření



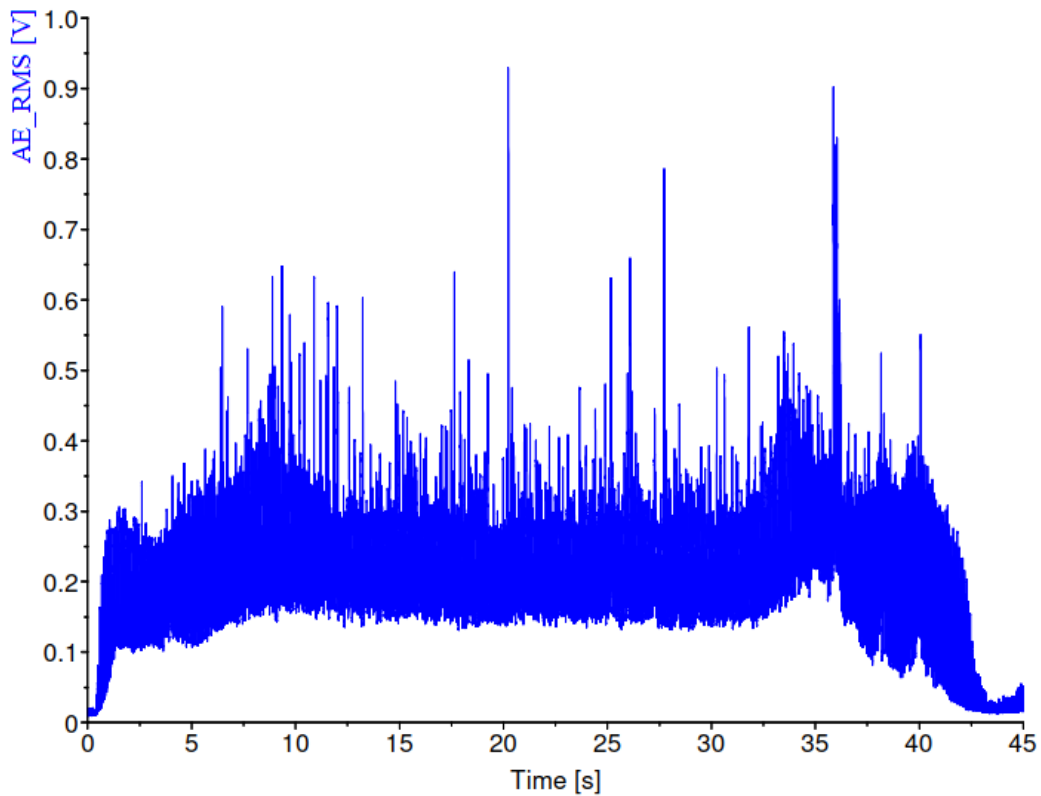
Graf 42: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$  a  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – druhé měření



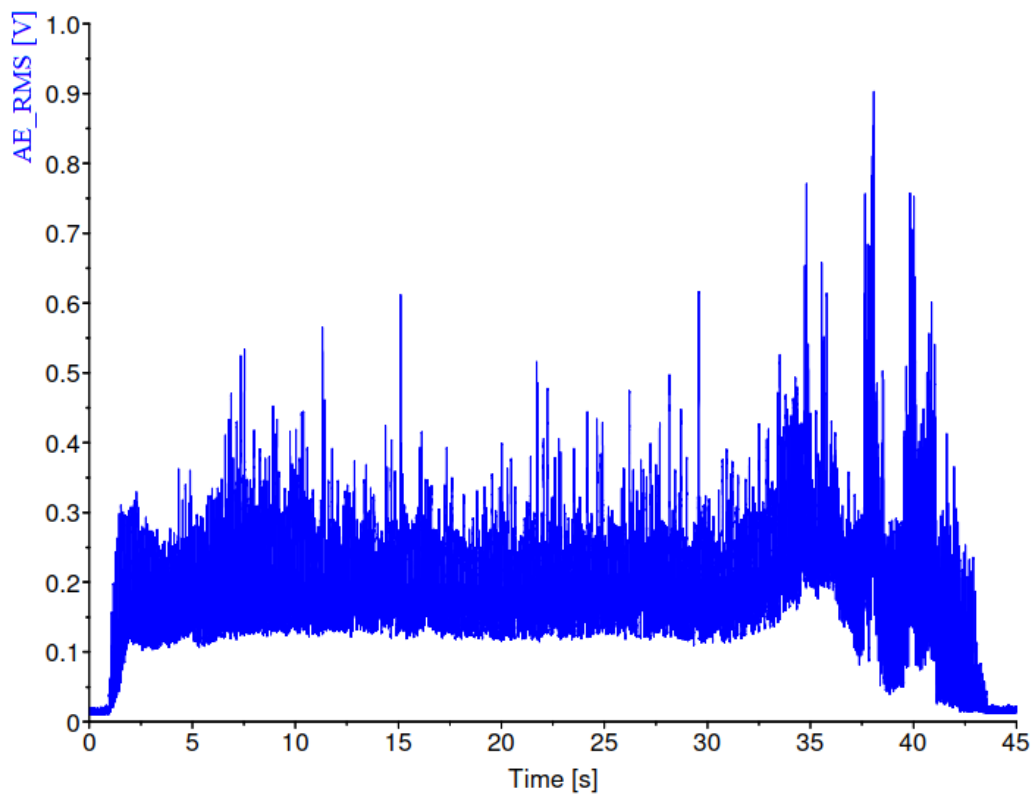
Graf 43: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$  a  $n_f = 800 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – první měření



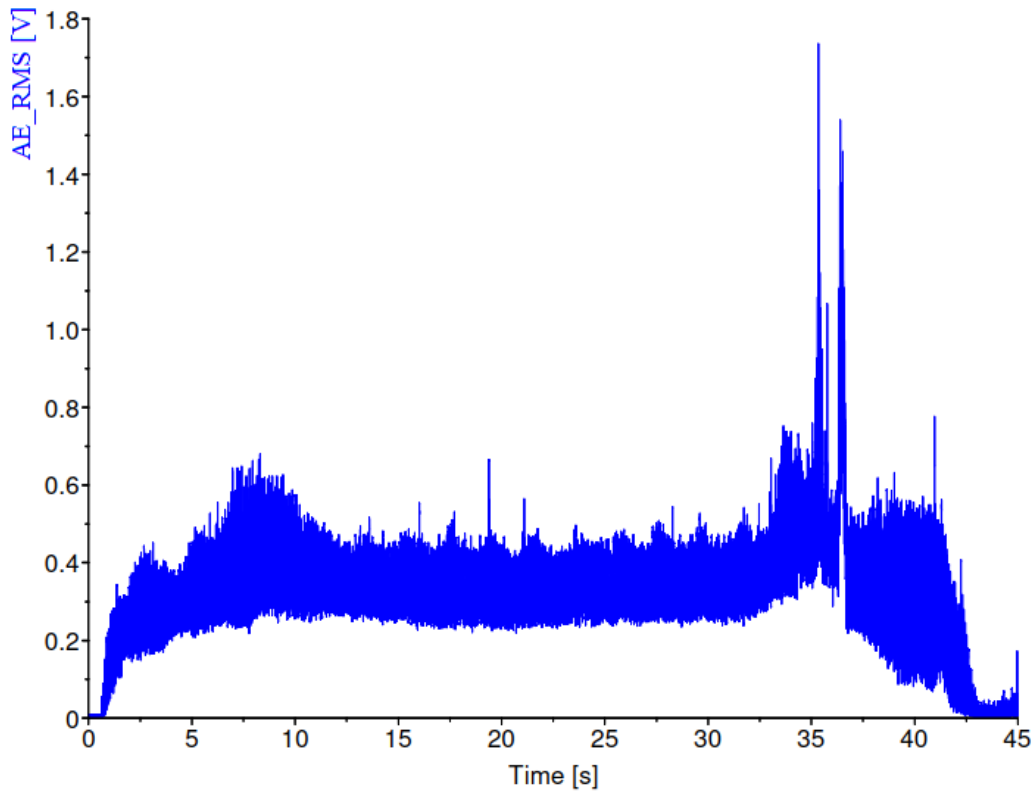
Graf 44: Vertikální frézování při  $a_p = 1 \text{ mm}$  a  $n_f = 800 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – druhé měření



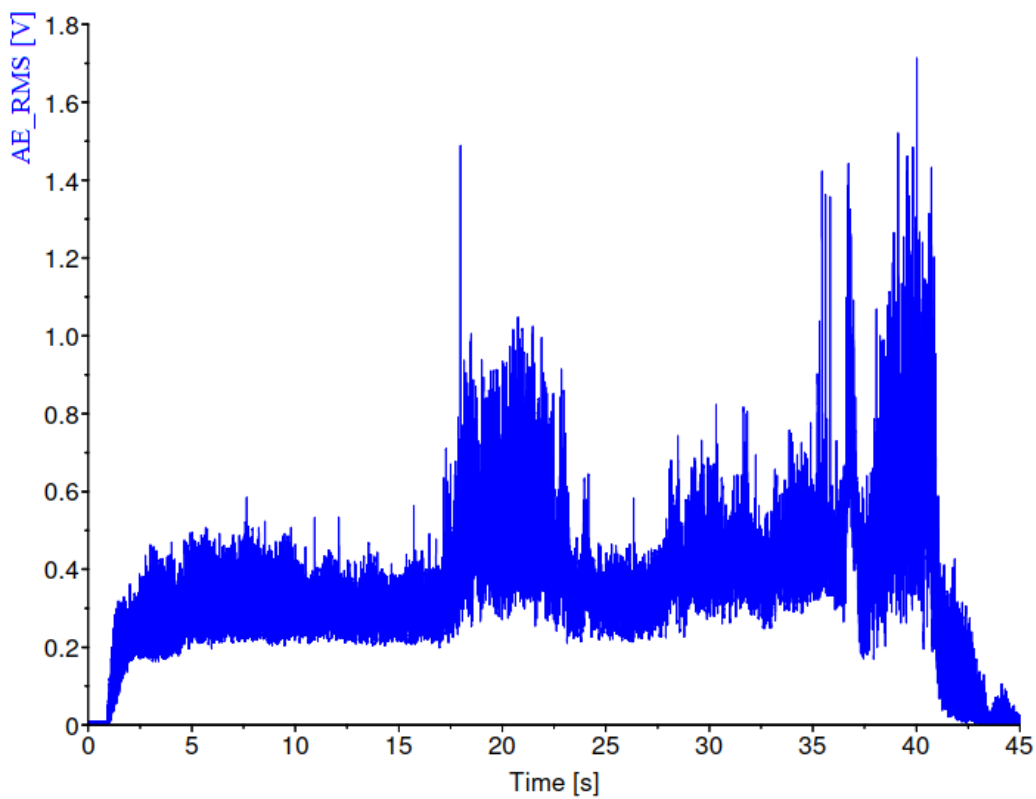
Graf 45: Vertikální frézování při  $a_p = 1,5 \text{ mm}$  a  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – první měření



Graf 46: Vertikální frézování při  $a_p = 1,5 \text{ mm}$  a  $n_f = 630 \text{ ot/min}$  časový úsek 0-45 s – druhé měření



Graf 47: Vertikální frézování při  $a_p = 1,5$  mm a  $n_f = 800$  ot/min časový úsek 0-45 s – první měření



Graf 48: Vertikální frézování při  $a_p = 1,5$  mm a  $n_f = 800$  ot/min časový úsek 0-45 s – druhé měření