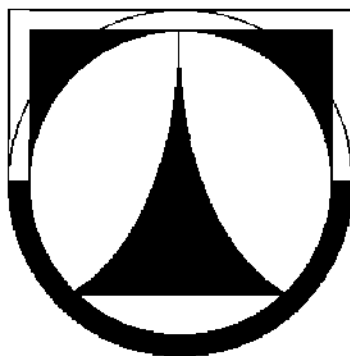


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2006

Lenka Hamplová

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program: B2341 Strojírenství

Zaměření: Výrobní systémy – Řízení výroby

Porovnání převodníků akustické emise pro účel obrábění

Comparing of acoustic emission trasducers for the purpose of cutting

KOM – 1043

Lenka Hamplová

Vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Žižka, Csc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Miroslav Veselský – firma DAKEL

Počet stran: 117

Počet příloh: 9

Počet tabulek: 46

Počet obrázků: 77

Počet modelů
nebo jiných příloh: 0

Počet diagramů: 87

Datum: 5. 1. 2006

Porovnání převodníků akustické emise pro účel obrábění

ANOTACE:

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáváním různých druhů převodníků akustické emise a jejich možným využitím při procesu obrábění. Zaměřuje se na zabudování převodníků z PVDF fólie a piezokeramiky do tělesa soustružnického nože a jejich funkčnost při procesu soustružení.

Comparing of acoustic emission trasducers for the purpose of cutting

ANNOTATION:

This bachelor thesis is intent on both the comparison of different kinds of the acoustic emission transducers and the possibility of their application for cutting process sensing. The work is also focused on the PVDF film and piezoceramic transducers assembling into the tool holder shank and its functionality in the turning process.

Klíčová slova: inteligentní řezný nástroj, akustická emise, převodník akustické emise, snímače akustické emise, soustružení

Key words: acoustic emission, acoustic emission transducer, acoustic emission sensor, intelligent cutting tool, turning process

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2006

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 117

Počet příloh: 9

Počet obrázků: 77

Počet tabulek: 46

Počet diagramů: 87

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci, dne 5. 1. 2006

Podpis:

Poděkování

Úvodem bakalářské práce bych ráda poděkovala řediteli firmy DAKEL Ing. Václavu Koulovi, CSc. za jeho vstřícný přístup při realizaci této bakalářské práce. Panu Ing. Miroslavu Veselskému za odborné rady a technickou podporu během testování snímačů. Panu Prof. Ing. Janu Žížkovi, Csc. a Petru Hánovi, RNDr., CSc. za jejich cenné rady a připomínky k vedení bakalářské práce. Dále pak panu Motyčkovi za jeho pomoc při testování snímačů při procesu soustružení a Lidmile Burianové, Doc., Mgr., CSc. za darování testovaných materiálů.

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 5. 1. 2006

Podpis: Lenka Hamplová

OBSAH

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
1. ÚVOD.....	10
1.1. Vývoj techniky a obrábění.....	10
1.2. Inteligentní obrábění.....	11
1.3. Cíl práce.....	12
2. AKUSTICKÁ EMISE.....	14
2.1. Metody ke zjištění opotřebení řezného nástroje.....	14
2.2. Příčiny vzniku akustické emise.....	14
2.3. Akustická emise při šíření mikrotrhlin.....	17
2.4. Zpracování signálu akustické emise.....	17
2.4.1. Charakter signálu akustické emise.....	17
2.4.2. Jevy doprovázející a omezující metodu akustické emise.....	19
2.4.3. Měřicí zařízení.....	19
2.4.4. Používané měřicí zařízení.....	20
2.4.5. Snímače akustické emise.....	22
2.5. Amplitudová analýza signálu.....	22
2.6. Zdroje akustické emise při vzniku třísky.....	23
2.7. Četnost impulsů akustické emise v závislosti na procesu obrábění.....	25
2.8. Zjištění stavu řezného nástroje pomocí amplitudové analýzy akustické emise... ..	26
2.8.1. Sledování kritického poškození nástroje.....	26
2.9. Metody testování snímačů akustické emise.....	27
2.9.1. Spojité buzení piezoelektrickým pulzarem rozmítaným sinusovým signálem.....	27
2.9.2. Spojitý charakter mechanických vibrací generovaných výtokem stlačeného vzduchu úzkou tryskou.....	29
2.9.3. Generování diskrétního pulzu elektromechanicky	30
2.9.4. Mechanické lámání tuhy (PEN TEST).....	31
3. MATERIÁLY SNÍMAČŮ AKUSTICKÉ EMISE.....	33

3.1.	Piezoelektrický jev.....	33
3.2.	Piezokeramický materiál	34
3.2.1.	Vlastnosti piezokeramiky.....	34
3.2.2.	Technologie zpracování piezoelektrických polykrystalických materiálů.....	34
3.2.3.	Rozdělení piezokeramických snímačů dle firmy DAKEL.....	38
3.3.	PVDF folie.....	40
3.3.1.	Struktura polyvinylidenefluoridu.....	41
3.4.	Kompozit.....	44
4.	INTELIGENTNÍ SNÍMAČ.....	45
4.1.	Veličiny působící na nástroj během procesu obrábění.....	45
4.2.	Požadavky na vlastnosti snímačů.....	46
4.3.	Druhy snímačů používaných při obrábění.....	47
4.3.1.	Snímače vibrací.....	47
4.3.2.	Snímače opotřebení.....	48
4.3.3.	Snímače sil.....	49
4.3.4.	Snímače teploty.....	50
5.	OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY.....	53
5.1.	Litina.....	53
5.1.1.	Tvárná litina.....	53
5.2.	Konstrukční oceli.....	54
5.2.1.	Oceli uhlíkové tř. 12.....	54
5.3.	Mosaz.....	55
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	57
6.1.	Výroba převodníku.....	57
6.2.	Vytvoření experimentálního nože.....	60
6.2.1.	Údaje o soustružnickém noži a jeho úpravy důležité pro experiment.....	60
6.3.	Vliv zatížení a uspořádání PVDF fólie na kvalitě přijímaného signálu.....	65
6.3.1.	Citlivost piezoelektrického převodníku.....	65
6.3.2.	Akustické přizpůsobení.....	66
6.3.3.	Vlastní experiment.....	67
6.3.4.	Porovnání převodníků vlastní konstrukce s komerčními snímači.....	70
6.4.	Vytvoření externích snímačů akustické emise.....	73

6.4.1. Konstrukce externích snímačů akustické emise.....	73
6.4.2. Technické parametry použitého kompozitu.....	76
6.4.3. Přehled vytvořených externích snímačů.....	77
6.4.4. Laboratorní měření externích snímačů na tělese soustružnického nože pomocí Hsu – Nielsenova zdroje.....	81
6.4.5. Výsledky měření externích snímačů akustické emise.....	83
6.5. Zabudování snímače akustické emise do tělesa soustružnického nože.....	84
6.5.1. Vlastní koncepce zabudování snímače do nože	84
6.5.2. Laboratorní testování interního snímače AE s externími snímači AE pomocí Hsu – Nielsenova zdroje AE.....	90
6.5.3. Výsledky měření interního snímače AE s externími snímači AE.....	94
6.5.4. Laboratorní testování interního PVDF snímače pomocí Hsu – Nielsenova zdroje.....	95
6.5.5. Výsledky měření interního PVDF snímače AE.....	98
6.6. Testování zabudovaných snímačů AE při procesu soustružení	99
6.6.1. Přehled měření při procesu soustružení.....	99
6.6.2. Výsledky měření při procesu soustružení.....	105
 7. ZÁVĚR.....	 113
 Seznam literatury.....	 115
 Seznam příloh.....	 117
 Přílohy.....	 118

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	zrychlení	[m/s ²]
α_0	termoelektrický koeficient dvojice vodičů	[V/K]
AE	akustická emise	
a_p	hloubka řezu	[mm]
Au	zesílení	[dB]
c	rychlost šíření podélných vln	[m/s]
C	kapacita	[F]
C_0	kapacita převodníku	[pF]
c_2	akustická rychlost v mezivrstvě	[m/s]
D	okamžitá výchylka	[m]
D_0	amplituda kmitu.	[m]
d_{33}	piezoelektrický koeficient	[pC/N]
$\Delta\theta$	teplotní rozdíl mezi oběma spoji	[K]
E	elektrické pole	[V/m]
ε_r	relativní permitivita	[1]
f	posuv	[mm/ot]
f_0	rezonanční frekvence snímače	[Hz]
g	piezoelektrický napěťový koeficient	[V/m.Pa]
h	tloušťka	[m]
HRC	tvrdost podle Rockwella	
I	proud	[A]
I_0	amplituda výstupního proudu	[A]
KT	hloubka opotřebení na čele	[mm]
L	tloušťka přizpůsobovací mezivrstvy	[m]
L	indukčnost	[H]
M	hmotnost tělesa	[kg]
N	celkový počet hodnot měření	[1]
n	otáčky	[ot/min]
PC	počítač	
PVDF	polyvinylidenefluoride	
PZT	piezokeramika	
Q	náboj	[C]
ρ	hustota	[kg/m ³]
R	odpor	[Ω]
Ra	drsnost povrchu	[μm]
RMS	střední kvadratická úroveň detekovaného signálu	[mV]
S	plocha elementu	[m ²]
t	čas	[s]
T_d	mrtvá doba	[s]
t_e	konec události	[s]

$\text{tg } \delta$	činitel dielektrický ztrát	[1]
t_s	čas začátku události	[s]
U	termoelektrické napětí	[V]
U_0	amplituda výstupního napětí	[V]
U_{ef}	výstupní úroveň signálu	[V]
U_{max}	maximální amplituda signálu	[V]
v	akustická rychlost	[m/s]
v	rychlost	[m/s]
VB	opotřebení bříty	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	
VR	opotřebení špičky (radiální opotřebení)	[mm]
ω	úhlová frekvence	[rad/s]
X	mechanické napětí	[Pa]
X	dráha	[mm]
x_i	hodnota napětí	[mV]
Z	akustická impedance materiálu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
Z_1	akustická impedance snímaného objektu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
Z_2	akustická impedance přizpůsobovací vrstvy	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
Z_3	akustická impedance vlastního snímače	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$

1. ÚVOD

1.1. Vývoj techniky a obrábění

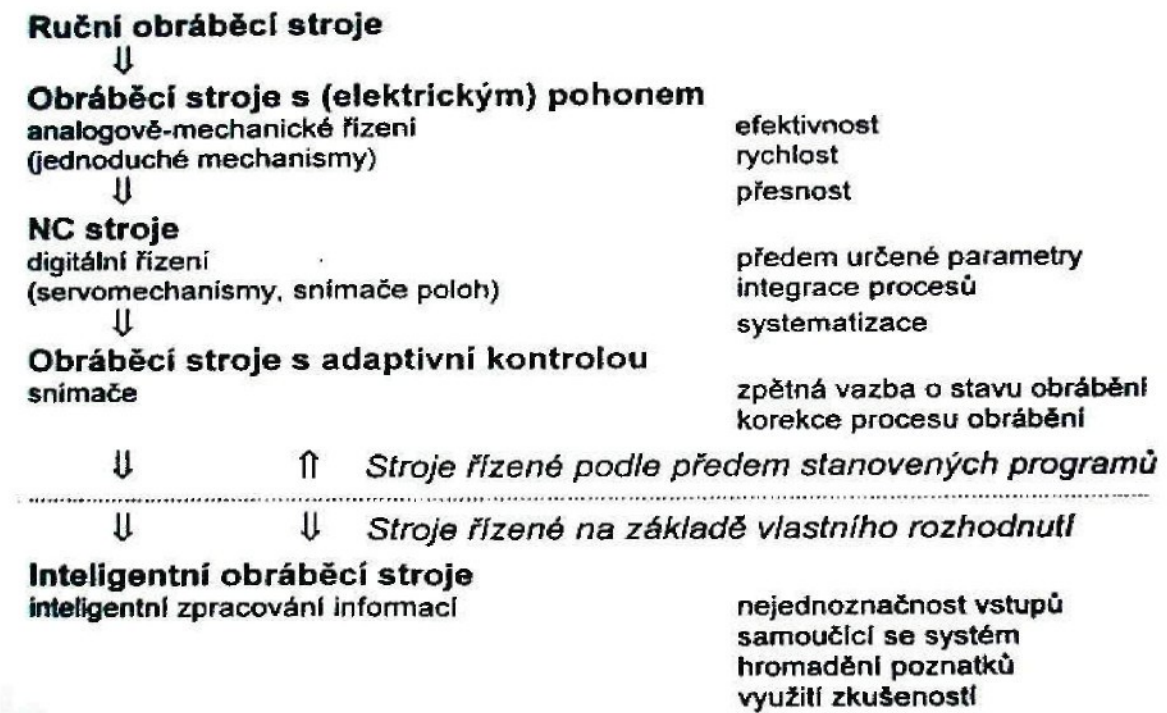
Před několika tisíci lety se člověk odlišil od světa zvířat tím, že začal pracovat. Záměrně vykonávaná práce mu přinesla snadnější život a vedla jej k přemýšlení o tom, co a jak vyrábět. Tento proces vedl ke vzniku techniky, která byla nejprve hodně jednoduchá a rozvíjela se velmi pomalu. Postupně se začali od sebe oddělovat jednotlivá řemesla a postupně dosahovali vysoké úrovně.

Rozvoj lidského poznání byl založen na znalostech o přírodě. V posledních staletích se vyčlenili samostatné vědní obory jako jsou matematika, fyzika, chemie a ostatní vědy o přírodě. Technika se začala zdokonalovat a dostávala nový charakter založený na vědeckých poznatcích, už se nerozvíjela jen na základě získaných zkušeností nebo na náhodných objevech, ale na předem promyšlených výhodnějších řešeních, která vedla i ke zdokonalení výroby. Nejvýraznější rozvoj zaznamenala věda a technika v 19. století, které nazýváme stoletím technické revoluce a právě v druhé polovině 19. století je zaznamenáno obrábění jako samostatný vědní obor. V polovině 20. století dochází k novému významnému rozvoji vědy a techniky na jehož začátku leží ovládnutí jaderné energie, dobývání kosmu, automatizace a kybernetika i výroba nových technických materiálů, které dříve neexistovaly. V této době byl zaznamenán rozvoj obrábění i u nás.

Dynamický vývoj vědy a techniky v posledních desetiletích umožnil rozvoj obráběcích strojů a podstatně zvýšil stupeň jejich automatizace. Urychlil se vývoj nových nástrojů a nových technologických procesů. Na základě tohoto vývoje se dnešní moderní technika vyznačuje vysokým stupněm automatizace, která musí zahrnovat velmi dobré vzájemné propojení mezi jednotlivými složkami výrobního systému. U obráběcích strojů se to týká řízení stroje, konkrétně upínání a výměny nástrojů, upínání a výměny obrobků a systému sledování průběhu obrábění. To vše jsou hlavní důvody, které vedou výzkum k tomu, aby se zabýval monitorizací a detekcí stavu opotřebení a poškození rezných nástrojů při obrábění.

V současnosti je hlavním trendem výzkumu v oblasti obrábění tzv. inteligentní obrábění, které by mělo přinést ještě vyšší progresivitu výroby než doposud běžně používané výrobní systémy.

Vývoj obrábění od ručního k inteligentnímu stručně zachycuje obrázek č. 1.



Obr. 1. Vývoj obrábění od ručního k inteligentnímu

1.2. Intelligentní obrábění

V dnešní době se používají stroje se stále menšími požadavky na lidskou obsluhu. Místo lidské obsluhy musí u těchto strojů, v případě nechtěné změny některého z parametrů obrábění, zasáhnout řídicí systém. Nezbytným údajem pro včasný a účinný zásah je dostatek informací o průběhu obrábění, proto je nezbytné během obrábění snímat a monitorovat vlastní stav procesu obrábění, jak z pozice stroje, tak nástroje i obrobku. Tedy snímat informativní signály, tj.: parametry, které daný proces co nejpřesněji identifikují a jsou schopny nám průběžně podávat dostatečně podrobnou informaci o změnách, které v daném procesu probíhají.

Velké uplatnění v dnešní moderní výrobě nachází adaptivní řídicí systémy obráběcích strojů. Naproti tomu inteligentní obrábění je stále v oblasti výzkumu. Adaptivní řídicí systémy pracují podle předem stanovených příkazů a při výskytu nějakého problému mají přesně naprogramovaný postup jak má být daný problém odstraněn.

Intelligentní obráběcí stroj musí být schopen zužitkovat zkušenosti a informace nahromaděné během posledních operací, aplikovat vědomosti získané

prostřednictvím procesu učení se a musí si umět poradit i s nejasnými vstupy, aby toho všeho byl stroj schopen musí být celý proces výroby monitorován prostřednictvím tzv. inteligentních snímačů.

Snímač pro inteligentní monitoring by měl obsahovat blok zpracování signálu, tedy matematický model uvádějící do vzájemného vztahu naměřené hodnoty k monitorovaným a sledovaným veličinám. Další důležitou součástí systém by měl být i model závislosti monitorovaných veličin k řízeným proměnným. Kromě tohoto zpracování získané informace by systém měl obsahovat v rozhodovací jednotce nasbírané poznatky (vědomosti), jaké vhodné korekce má provést ve vlastním procesu obrábění k odstranění nebo minimalizaci vzniklých poruch na základě tzv. učícího se procesu.

Už od pradávna je snem každého výrobce vyrábět s co nejnižšími náklady a přitom velmi kvalitně. K dosažení tohoto vysněného cíle mohou nemalou mírou přispět právě inteligentní řezné nástroje opatřené miniaturními snímači monitorujícími a poskytujícími informace o celém procesu obrábění. Výrobní náklady jsou totiž nejvíce ovlivněny trvanlivostí a kvalitou nástrojů. Důležitým faktorem je stav břitu nástroje, který ovlivňuje jak kvalitu povrchu výrobku, tak náklady na nástroj a zároveň také zvyšuje nevýrobní časy nutné k výměně nástroje či břitové destičky. Snahou je proto zjistit opotřebení břitu dříve než přesáhne maximální hodnoty případně než nastane vylomení břitu, které může vést k závažnému poškození obrobku a tudíž ke značným finančním ztrátám.

Z důvodů zvýšení spolehlivosti a snížení pravděpodobnosti milného poplachu se současný výzkum převážně zaměřuje na monitorizaci pomocí vícesnímačových systémů. Jednou z fyzikálních veličin, která umožňuje použití pouze jednoho snímače je akustická emise. Snímaný signál prostřednictvím tohoto snímače může být pak vyhodnocován v několika užších frekvenčních pásmech.

1.3. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je porovnat vhodnost nových v praxi doposud nepoužívaných materiálů pro snímače akustické emise. Jedná se o porovnání převodníků akustické emise na bázi PVDF folie, piezokeramického materiálu a materiálu kompozitního.

Vybrané převodníky pro napěťové tranzitní vlny byly na základě navržené konstrukce v konečné fázi zabudovány do tělesa řezného nástroje (soustružnického nože) a následně testovány při soustružení.

2. AKUSTICKÁ EMISE

2.1. Metody ke zjištění opotřebení řezného nástroje

Ke zjištění stavu opotřebení řezného nástroje je v současnosti k dispozici několik metod, jejich základní rozdělení je na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody patří např. váhová metoda, mikrometrická metoda, radioizotopová metoda, metoda nanesené odporové vrstvy atd. a mezi metody nepřímé patří např. optické metody, měření řezné síly nebo krouticího momentu, detekce mezery mezi nástrojem a obrobkem, měření teplot, měření vibrací, měření zvuku nebo metoda založená na měření elektrického odporu sem spadá i měření **akustické emise**.

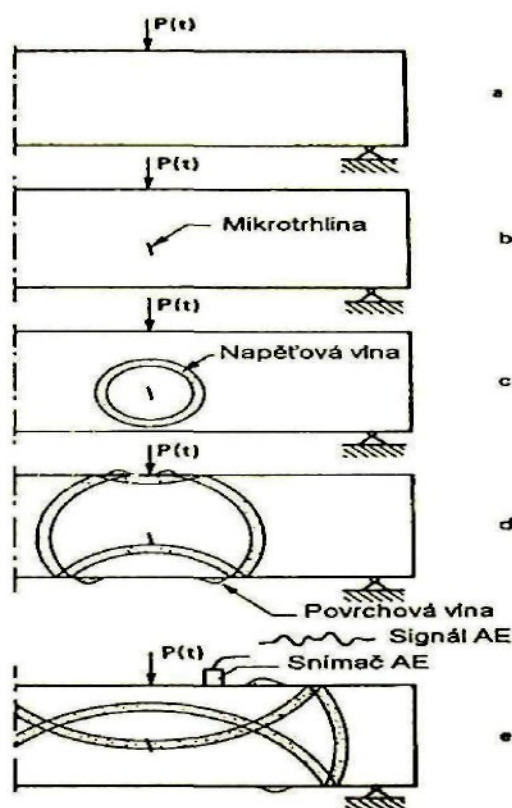
Většina z uvedených metod musí, ale překonat některé nedostatky, které nám přinášejí poměrně „tvrdé“ dílenské podmínky, ty totiž nejsou tak stabilní jako podmínky v laboratoři.

2.2. Příčiny vzniku akustické emise

Od pradávna se k orientačnímu posouzení změny kvality tělesa užívá poklepání, na cihlu, keramiku apod. Na základě odezvy tělesa na tento úder „slyšíme“ případnou změnu vlastní frekvence tělesa a z té můžeme usoudit na skrytou vadu. Soudobé akustické metody testování nejsou tak jednoúčelové, jsou založeny na přesnějších měřících postupech (zejména co se týče buzení a příjmu signálu).

Signály akustické emise jsou definovány jako pružné napětíové vlny vyvolané deformací, k níž dochází v materiálech při namáhání. Tyto vlny jsou vyvolány rychlým uvolněním deformační energie v materiálu v důsledku změny vnitřní struktury. Napětíové vlny jsou přenášeny materiálem a nebo jinými materiály, které jsou spojené se zdrojem akustických emisí. Ve výsledku se tento jev projeví posuvem na povrchu. Snímač akustické emise umístěný v daném místě na povrchu dokáže zachytit takovéto napětíové vlny a transformovat je na signál elektrický (viz. Obr. 1.), kde je zachycena tvorba, šíření a detekce ultrazvukového signálu akustické emise.

Příčinou akustické emise mohou být jevy spojené se změnou vnitřní struktury materiálu. Pohyby dislokací, difúzní tečení, kluz po hranicích zrn a tvorba dvojčat jsou mechanismy velmi dobře známé z nauky o materiálech. Tyto mechanismy se projevují plastickou deformací. Fázové přeměny, tvorba vakancí a lomy představují rovněž zdroje akustické emise v materiálu. Z hlediska obrábění je důležitá pouze plastická deformace a lom. V důsledku tohoto uvolňování energie uvnitř materiálu, jsou tedy emitovány napětové vlny, které se šíří tělesem od místa zdroje k volnému povrchu. Průchodem napětové vlny materiálem je část uvolněné energie přeměněna v teplo, část vyvolává na povrchu materiálu povrchovou Rayleighovu vlnu a zbytek energie se vrací do materiálu prostřednictvím odražené vlny. Povrchová vlna je potom vhodným snímačem zachycována a přeměňována na elektrický signál, který se nazývá emisní (viz. obr. 2.). [5]

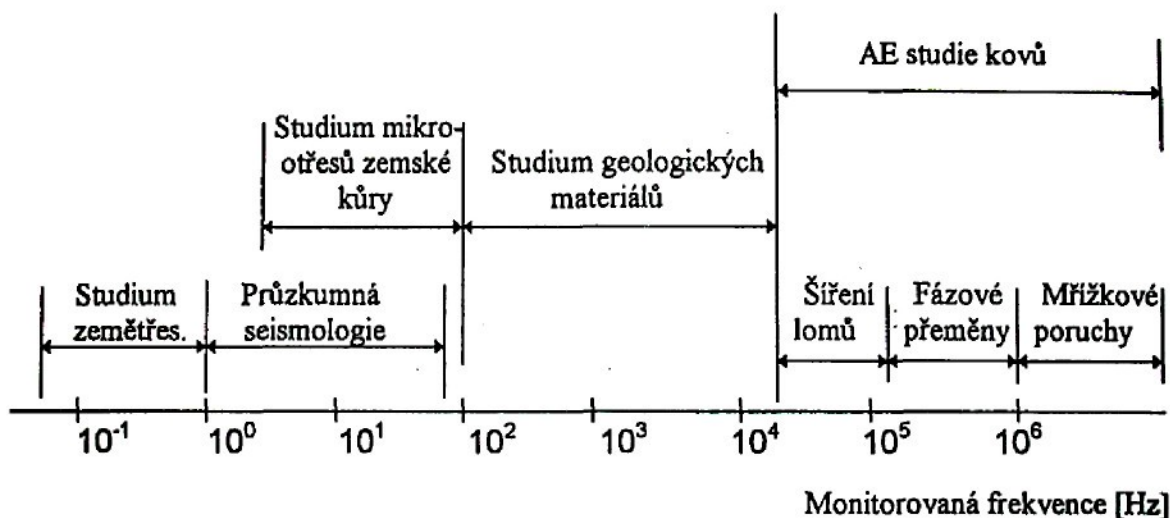


Obr. 2. Zachycena tvorba, šíření a detekce ultrazvukového signálu akustické emise.

Detekce a současná registrace těchto vln, spolu s lokalizací jejich zdrojů a jejich přiřazení konkrétnímu fyzikálnímu procesu, tvoří náplň metody akustická emise. [6]

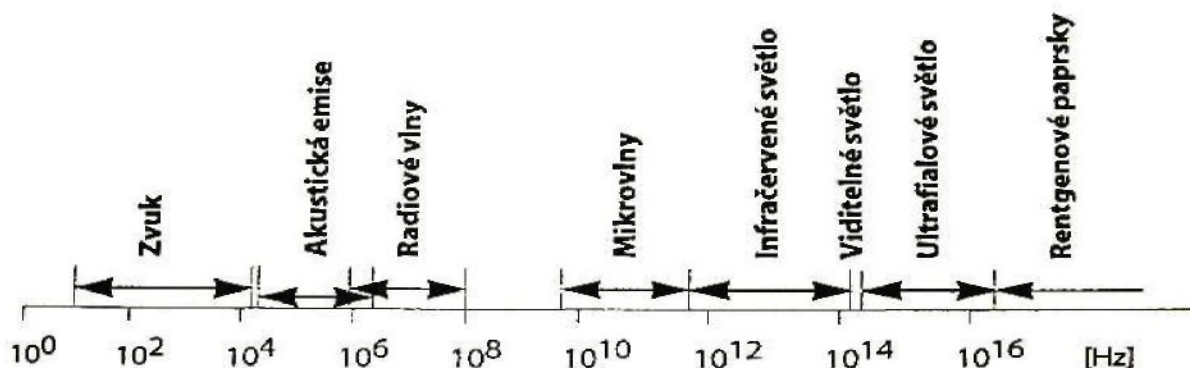
Frekvence signálů je především závislá na materiálu obrobku a na zatěžovacích podmínkách při obrábění.

Vlnění běžně se vyskytující v přírodě se pohybuje v širokém spektru frekvencí od infrazvuku až po gigahertzové oblasti (viz. obr. 3., kde je ukázáno schematické rozdělení napětových vln při výzkumu jevů, které nás obklopují a oblasti jejich uplatnění)



Obr. 3. Schematické rozdělení napětových vln tentokrát zaměřené na výzkumy jevů, které nás obklopují a oblasti jejich uplatnění

Signál akustické emise je zejména vhodný ke sledování stavu obrábění v ultrazvukové oblasti a to především pro její široký frekvenční rozsah (viz. obr.4). S ohledem na frekvenční rozsah signálů akustické emise je vyloučen vliv prostředí a vlastních kmitů stroje, které leží především v slyšitelném pásmu zvukového spektra. Vznik signálu je spojen s vlastní fyzikální podstatou tvorby třísky, což znamená, že **signál akustické emise je měřitelný nepřetržitě během celého procesu obrábění.**



Obr. 4. Schematické rozdělení vlnění v závislosti na frekvenci

2.3. Akustická emise při šíření mikrotrhlin

Ke vzniku a šíření mikrotrhlin dochází obecně při napětí, které je podstatně nižší než kohesivní pevnost materiálu. To znamená, že existuje zdroj koncentrace napětí v oblasti vzniku trhliny.

Máme 2 základní způsoby šíření trhliny:

1. *nestabilní* – Napětí pro pohyb trhliny je menší než napětí potřebné pro její vznik.
2. *stabilní* – Napětí pro pohyb trhliny je větší než napětí potřebné pro její vznik. Zde musí být pro další šíření dodáno vyšší napětí, pak se přebytečné napětí uvolňuje a tím dochází k akustické emisi.

Mikrotrhliny se také šíří při destruktivních procesech opotřebení řezného nástroje hlavně při opotřebení břitu řezného materiálu jako je např. slinutý karbid.

2.4. Zpracování signálu akustické emise

2.4.1. Charakter signálu akustické emise

Signál, získaný při detekci akustické emise obvykle charakterizujeme počtem napěťových vln o určitém rozsahu amplitudy, které se uvolní za jednotku času, což představuje rychlost akustické emise.

Signál AE lze rozdělit na 2 základní typy [7, 8], a to na:

1. spojitou akustickou emisi, která má vysokou frekvenci výskytu jednotlivých signálů akustické emise s poměrně malou amplitudou
2. nespojitou akustickou emisi, kde se vyskytují oddělené impulsy s velkou amplitudou

Akustickou emisi ovlivňuje řada faktorů, které se dle typu liší. Například spojitá akustická emise se vyskytuje většinou při následujících stavech sledovaného objektu:

- Malý rozměr zkušební tělesa
- Hladké zkušební vzorky
- Isotropní materiál
- Homogenní materiál
- Jemnozrnný materiál
- Tepelně-mechanicky zpracovaný materiál
- Nízká pevnost materiálu
- Nízká deformační rychlost
- Deformace kluzem
- Vysoké teploty
- Difúzní typy fázových přeměn

Nespojitá akustická emise se vyskytuje naopak při následujících stavech sledovaného objektu:

- Velký rozměr zkušební tělesa
- Vzorky s vrubem
- Anisotropní materiál
- Nehomogenní materiál
- Hrubozrnný materiál
- Materiál v litém stavu
- Vysokopevné materiály
- Vysoká deformační rychlost
- Deformace dvojčatěním
- Nízké teploty
- Martensitické přeměny
- Štěpné lomy
- Šíření trhlin

Na základě toho můžeme předpokládat, že každý materiál má svou vlastní charakteristiku signálu akustické emise, proto podle sledovaných parametrů akustického signálu lze poznat procesy, při kterých signál vzniká (viz. Tab. 1.)

Tabulka 1. Informace předávané parametry akustické emise

Parametry akustické emise	Předávaná informace
Forma emisní události	Podrobná informace o zdroji akustické emise
Frekvenční spektrum	Podstata zdroje akustické emise
Amplituda	Energie zdroje akustické emise
Aktivita signálu akustické emise	Rychlost vzniku deformací
Relativní doba příchodu signálu akustické emise z různých snímačů	Lokalizace místa zdroje akustické emise

2.4.2. Jevy doprovázející a omezující metodu akustické emise

Užití akustické emise je omezeno útlumovými vlastnostmi daných materiálů, což znamená, že jeden a týž jev v různém materiálu může mít za následek různý charakter akustické emise. To znamená, že by tento vliv měl být uvážěn, aby bylo možné sledovat průběh vlastního procesu.

Výrazné omezení této metody je také rozptyl a odraz napětových vln, které způsobují změnu frekvenčního spektra emitovaných vln napětí. (Největší vliv na tuto změnu má konečný rozměr zkušebního tělesa.)

Další chyby mohou vzniknout nedostatečným kontaktem čidla akustické emise s vyšetřovaným povrchem [9].

2.4.3. Měřicí zařízení

Na měření akustické emise využíváme zařízení různého druhu, určujícím parametrem je využití signálu akustické emise a požadavky na měření. Měřicí systémy jsou na rozdíl od měřících přístrojů universálnější a mají obvykle více vstupů. Podle charakteru výstupního údaje rozlišují se měřicí přístroje na analogové a číslicové.

Většina měřičů pracuje s výstupním údajem obojího druhu.

Přístroje na měření akustické emise bývají většinou jednoúčelové. Některé přístroje měří hodnotu akustického signálu, jinými se měří kmitočtové spektrum akustického signálu, případně distribuční funkce. Podle kmitočtových vlastností jde o přístroje širokopásmové nebo úzkopásmové.

Analogové širokopásmové měřiče jsou vhodné k měření hodnoty ultrazvukového signálu. Jejich zapojení je poměrně jednoduché. Obvykle je měřič sestaven z těchto částí: -snímač

-předzesilovač

-filtr

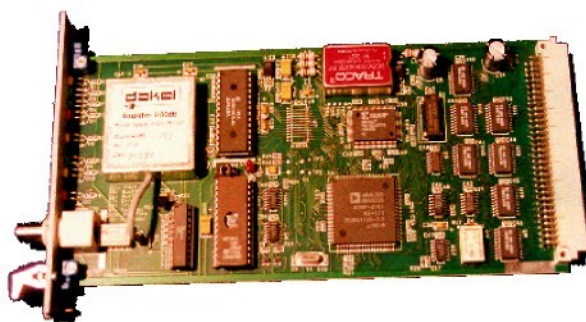
-zesilovač

-usměrňovač

-další obvody na zpracování signálu(např. čítač)

Bylo zjištěno, že pro případ sledování stavu rezného nástroje je nejlepší měřit signál akustické emise ve frekvenčním pásmu od 300 $\approx$ kHz... do 1 $\approx$ MHz.... V případě, kdy by byla k dispozici měřicí aparatura umožňující měření signálu akustické emise ve vyšších frekvencích, lze doporučit provádět měření a sledování signálu akustické emise i ve vyšších frekvenčních pásmech [2].

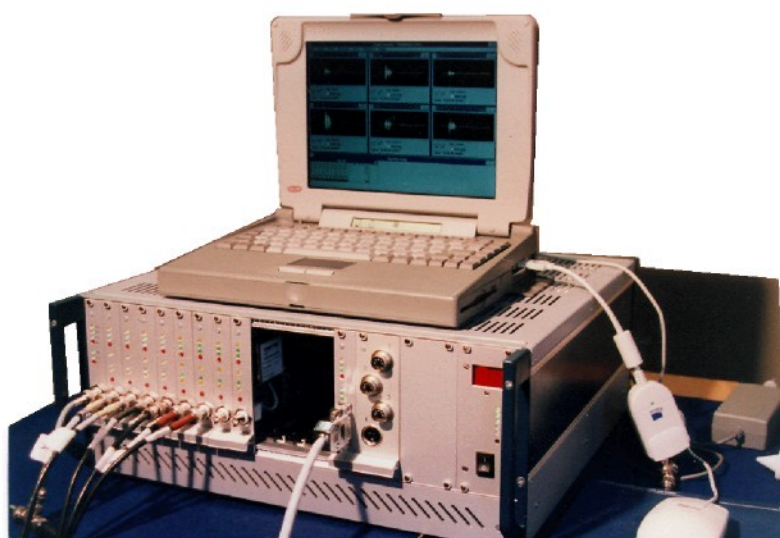
2.4.4. Používané měřicí zařízení [14]



Obr. 5. Karta XEDO na měření akustické emise

Pro měření byl použit digitální multikanálový analyzátor XEDO - 4 – DAKEL tj. čtyř kanálová souprava s kartou XEDO AE 12bit (viz obr. 5). Měření proběhlo s využitím softwaru DAKEL-DAEMON a vyhodnocení pomocí programu DAKEL-DAESHOW.

Systém Deamon (hardwarová část „XEDO“ + softwarová část „Deamon“), je moderní a výkonné zařízení pro měření a vyhodnocení parametrů akustické emise, které umožňuje rovněž měření jiných fyzikálních veličin. Vhodnou kombinací měřících kanálových jednotek akustické emise a jednotek pro měření nízkofrekvenčního a stejnosměrného napětí je možné sestavit konfigurace vyhovující požadavkům celé řady aplikací. Zařízení Daemon takto nachází uplatnění jako monitorovací systém akustické emise a jeho externích parametrů (tlak, teplota, apod.) a rovněž jako měřící systém napěťových veličin. Měřící jednotky systému jsou řazeny do měřících rámců – boxů, kde jsou spolu s komunikačními jednotkami připojeny na společnou sběrnici. Standardní komunikační rozhraní Ethernet 10 Base 2 umožňuje propojení libovolného počtu boxů s libovolným počtem počítačů. Z komponentů zařízení tak lze sestavit jak malé laboratorní přístroje (viz obr. 6.), tak rozsáhlé průmyslové diagnostické systémy. Snímače systému jsou schopny plnit také funkci vysílačů/ budičů. Systém Daemon může být vybaven také elektronickým generátorem vhodných pulsů pro simulaci emisních událostí. Takto je umožněná jednoduchá kontrola funkce snímačů a autokalibrace zařízení. Největší předností systém Daemon je to , že kromě hodnocení klasických parametrů akustické emise umožňuje rovněž vzorkování signálů na každém kanálu.



Obr. 6. Digitální multikanálový analyzátor XEDO – DAKEL

TECHNICKÉ PARAMETRY MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

Rozměry:	100 x 220 x 20 ≈mm...
Hmotnost:	200 ≈g...
Napájení:	+5 VDC/200 mA, +12 VDC/100 ≈mA...;
Rozsah pracovních teplot:	+5 ÷ +40 ≈°C ...
Vstupní rozsah napětí:	±1 ≈V... (volitelné ±0.5 ≈V...)
Rozlišení A/D převodníku:	12 bitů
Vzorkovací frekvence:	1, 2, 4, 8 ≈MHz...
Vzorkovací paměť:	13 k
Frekvenční rozsah:	100 - 800 ≈kHz...
Rozsah zesílení:	0 – 40 ≈dB... s krokem 1 ≈dB...; 0 – 80 ≈dB... s krokem 1 ≈dB...; (volitelné)

2.4.5. Snímače akustické emise

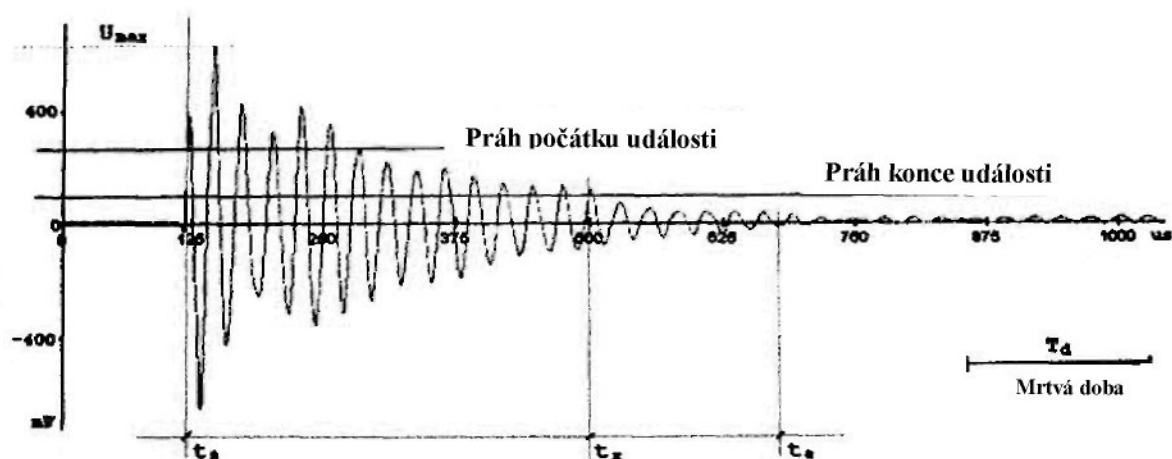
Důležitou částí měřícího zařízení akustické emise je snímač. Umisťuje se na povrch nebo do vnitřní části sledovaného objektu. Zároveň se musí počítat s tím, že místo měření ovlivní výrazně původní signál. To znamená, že na povrchu tělesa budou zpracovány především povrchové (Rayleighovy) nebo deskové (Lambovy) vlny.

Pro měření se používají různé typy snímačů. Dosud jsou nejvíce využívány snímače kapacitní a piezoelektrické. Kapacitní snímače se vyznačují jednoduchou konstrukcí a dobrou linearitou až do 1 ≈MHz.... Citlivost těchto snímačů je poměrně malá. Používají se pouze v laboratorních aplikacích.

V průmyslové praxi a v těžkých dílenských podmínkách se používají nejčastěji piezoelektrické převodníky, které převádí mechanické kmity na elektrické. Vyznačují se poměrně malou hmotností, vysokou citlivostí a dají se realizovat jako širokopásmové nebo úzkopásmové.

2.5. Amplitudová analýza signálu

Amplitudová charakteristika je velmi významná, neboť nám dovoluje rozdělovat signál na více úrovní podle amplitudy akustické emise (viz. Obr. 7.). Jedná se o počet registrovaných amplitud na dané energetické úrovni za určitou časovou jednotku, které nazýváme četnost.



Obr.7. Časový průběh emisního signálu

Máme dva druhy četností amplitud:

1. V první skupině leží nejvíce amplitud uvnitř pozorovaného pásma. Tuto závislost lze chápat tak, že pouze určitá střední energie může být koncentrována na čele trhliny a pak uvolněna, aniž způsobí nestabilní růst trhliny. Čím užší je maximum dané distribuce, tím je materiál houževnatější.
2. V druhém případě je maximální výskyt amplitud s minimální velikostí. To znamená, že daný materiál nemůže lokálně spotřebovat velké množství energie a tím i malé množství energie může způsobit lokální nestabilitu, jehož důsledkem je malé množství uvolněné akustické energie. Tato skupina vzorků vykazuje akustickou emisi při podstatně nižších napětích, než první skupina. To může být chápáno jako vznik křehkého porušení v plastické zóně dříve, než začne obecný růst trhliny.

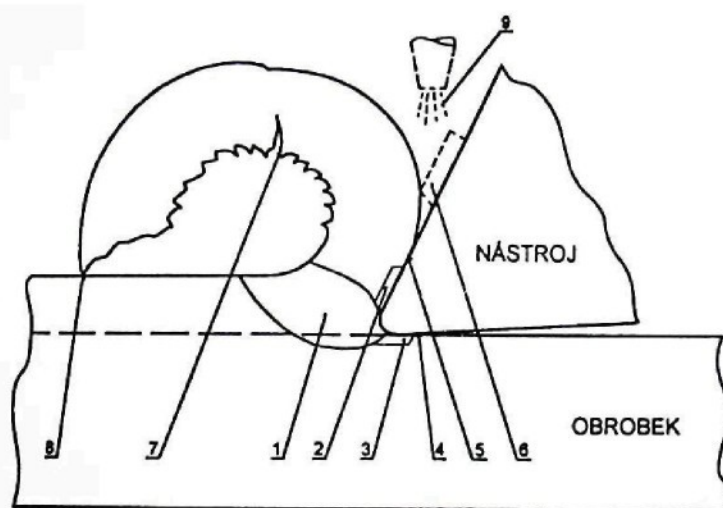
2.6. Zdroje akustické emise při vzniku třísky

V současné době je nemožné jednoznačně přiřadit části registrovaného signálu akustické emise k jednotlivým zdrojům, které doprovázejí vznik třísky a které se zároveň nacházejí v poměrně velmi malé vzdálenosti.

Z relativně plynulého signálu akustické emise lze poměrně jasně odlišit jednotlivé nespojité kmity s velkou amplitudou, které doprovázejí anomální a nežádoucí jevy jako je katastrofické opotřebení, poškození, či případné zničení

nástroje. Podobné zákmitý signálu, ale poněkud méně energetické, vznikají od kontaktu a tření mezi odcházející třískou a obrobkem, nebo nástrojem. Tyto jevy v soustavách, které se dnes používají pro monitorizaci, vedou k signalizaci havárie.

V oblasti vzniku třísky je možné vymezit několik zdrojů akustické emise. Tyto zdroje akustické emise mají rozdílnou fyzikálně-mechanickou podstatu.



Obr. 8. Zdroje akustické emise při vzniku třísky

V kořenu třísky se nacházejí zdroje akustické emise se spojitým emisním signálem, které neoddtělitně doprovázejí plastickou deformaci (viz. Obr.8.) :

- 1...oblast primárních plastických deformací
- 2...oblast sekundárních plastických deformací, závisící i na tření, ke kterému dochází na čelní ploše břitu
- 3...oblast terciálních plastických deformací, vznikající vlivem hřbetu nástroje

Další zdroje akustické emise se nacházejí v oblasti kontaktu nástroje s materiálem obrobku, kde dochází k intenzivnímu tření:

- 4...tření mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem
- 5...tření mezi čelem nástroje a třískou
- 6...pokud máme nástroj s lamačem nebo utvařečem, probíhá tření mezi ním a třískou

Jedním z energetických zdrojů akustické emise charakteristickým mohutnými vrcholy amplitud je vznik, odchod, či utržení nárůstků. Dalším zdrojem akustické emise je vydrolování a vylamování materiálu nástroje, které doprovází vznik a rozvoj mikrotrhlin, které předcházejí poškození a destrukci nástroje.

7... samotné lámání třísky, které se vyskytuje během odchodu třísky, je dalším zdrojem signálu nespojitě akustické emise.

8... kontakt třísky s obrobkem nebo nástrojem je zdrojem nespojitého signálu akustické emise.

V případě plynulé, špatně tvářené třísky může dojít k nežádoucímu navinutí třísky na nástroj, či obrobek, což se také ve snímaném signálu akustické emise projeví.

9...použití řezné kapaliny během procesu obrábění, se rovněž projeví v signálu akustické emise.

Každý z uvedených zdrojů akustické emise se projevuje v určitém pásmu frekvencí a má specifickou intenzitu. Signál akustické emise vyvolaný od plastických deformací a tření má spojitý charakter, v ostatních případech je akustická emise nespojitá a více energetická, zároveň se vyznačuje kvaziperiodickými nebo neperiodickými vrcholky amplitud.

Vliv na signál akustické emise má i tloušťka usmýknutých segmentů (lamel), které nezbytně vznikají během utváření třísky. Signál akustické emise tedy nese i informaci o tloušťce lamel.

2.7. Četnost impulsů akustické emise v závislosti na procesu obrábění [2]

K vyhodnocování stavu opotřebení řezného nástroje se jako nejvhodnější jeví vycházet z histogramů četnosti překmitů signálu akustické emise.

Počet impulsů akustické emise stoupá s opotřebením nástroje.

Se zvětšujícím se úhlem čela řezného nástroje, který je zároveň doprovázen poklesem koeficientu přechování třísky, klesá počet impulsů akustické emise.

Počet impulsů akustické emise není citlivý na vlastnosti materiálu nástroje nýbrž na vlastnosti obrobku.

Počet impulsů akustické emise v podstatě stoupá s hloubkou obrábění, průběh charakteristiky je však ovlivněn geometrií a konstrukcí řezného nástroje a zároveň vlastnostmi materiálu obrobku.

Řezným podmínkám bez vibrací a tvorby nárůstků odpovídá minimální počet impulsů akustické emise.

Počet impulsů se mění s řeznou rychlostí, v oblasti velmi nízkých rychlostí klesá a dosahuje svého lokálního minima, v oblasti nízkých a středních rychlostí

stoupá dosahuje svého maxima a s dalším růstem řezné rychlosti klesá, při rychlostech nad 400 [m/min] přestává být signál akustické emise registrován.

Signál akustické emise je ovlivňován fyzikálními a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu a jejich závislosti na teplotě.

Během procesu obrábění dochází k deformaci, která závisí na stupni plasticity obráběného materiálu. Deformační práce se mění v teplo, které ohřívá obráběný materiál i břit řezného nástroje. Zvýšení teploty pak působí změnu fyzikálních a mechanických vlastností materiálu, které se značně liší od původních. Tato změna se zároveň projevuje i na signálu akustické emise.

Nevýhodou celkového počtu impulsů akustické emise jsou velké odchylky od střední hodnoty měření. Poměrně značný rozptyl naměřených hodnot si vynucuje hledat jinou vhodnější veličinu signálu akustické emise.

2.8. Zjištění stavu řezného nástroje pomocí amplitudové analýzy akustické emise [2]

Byly zjištěny tři charakteristické příznaky chování signálu akustické emise doprovázející změnu stavu řezného nástroje:

1. s růstem opotřebení ostří nástroje se střed histogramu postupně přemísťuje na nižší úrovně amplitud,
2. s růstem opotřebení ostří nástroje klesá hodnota maximální četnosti impulsů (mediánu),
3. s růstem opotřebení ostří nástroje se zvětšuje rozptyl registrovaných amplitud

Ne vždy se však všechny tři charakteristické příznaky opotřebení řezného nástroje vyskytují současně

2.8.1. Sledování kritického poškození nástroje

Pomocí některých parametrů akustické emise (např. počet překmitů, průměr a rozptyl) lze na základě provedených experimentů s dostatečnou důvěryhodností určit okamžik kritického poškození řezného nástroje. Včasné určení okamžiku poškození nástroje a jeho včasná výměna je nezbytným předpokladem práce aktivní kontroly procesu obrábění v podmínkách moderní výroby.

Během dosavadního výzkumu bylo již zjištěno, že signál akustické emise je dostatečně citlivý k opotřebení řezného nástroje a umožňuje rozeznat stav řezného nástroje před a po jeho poškození. Této vlastnosti metody akustické emise je vhodné využít pro víceparametrickou monitorizaci procesu obrábění v případech, kdy signál z jiného snímače (např. signál síly z dynamometru) [2] nedává plně jednoznačnou informaci a vyvolává některé pochybnosti neumožňující uskutečnit korektní rozhodnutí.

Při katastrofálním poškození nástroje vlivem vysoké teploty řezání, je orientace změny signálu opačná než při poškození nástroje zlomením.

Důležitým poznatkem [2] je vhodnost vyhodnocování signálu akustické emise metodou amplitudové analýzy v různých energetických úrovních. Podle změny v časovém průběhu vyhodnocovaných veličin akustické emise v některých vybraných energetických úrovních lze zřetelně rozpoznat destrukci řezného nástroje.

2.9. Metody testování snímačů akustické emise

V praxi je známa a používána řada testovacích metod pro měření a kalibraci snímačů akustické emise s elektromechanickým měničem na bázi polykrystalických feroelektrik. Pro měření specifických parametrů snímačů, vzhledem ke konkrétní aplikaci je důležitým faktorem i volba metody buzení testovacího signálu, který může mít, podle použité metody, pulzní či spojitý charakter.

2.9.1. Spojité buzení piezoelektrickým pulzarem rozmítaným sinusovým signálem [11]

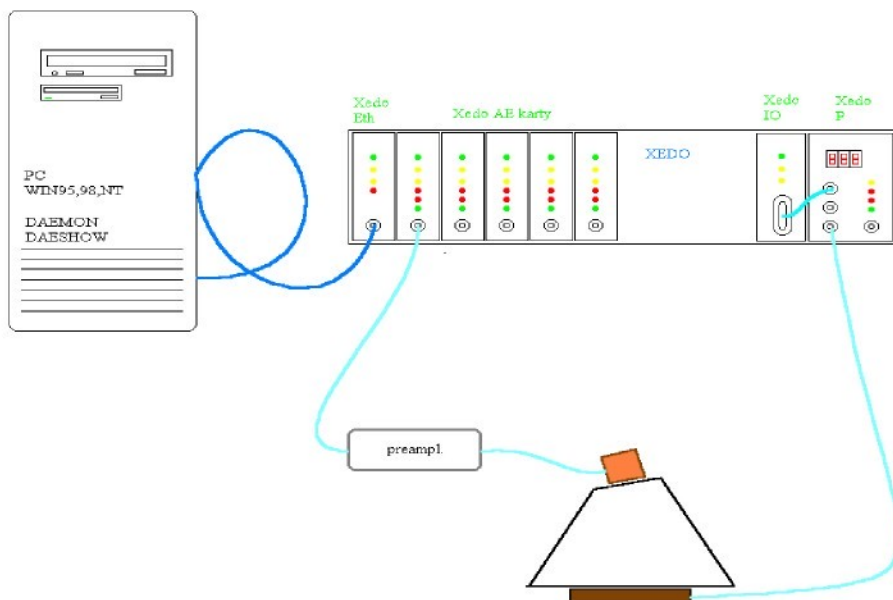
Zdrojem elektrického budicího signálu je rozmítaný generátor sinusového průběhu z modulu XEDO - P v rozsahu 20 – 700 [kHz] s výstupní úrovní 0,25 [V] U_{ef} .

Řídící signál rozmítání (trojúhelníkový průběh) je přiváděn na nf analogový vstup karty XEDO – IO a z úrovně řídicího napětí je vypočítávána okamžitá frekvence budicího signálu. Elektromechanickým aktivním prvkem budicího pulzeru je mechanicky zatlumený piezokeramický disk. Snímače jsou uchyceny na měrném ocelovém bloku, který má tvar kužele s potlačenými vlastními rezonancemi – tzv. Beattie blok [11], pomocí magnetického prstencového držáku. Vazebním médiem je silikonová vazelína.

Využitím měřicího systému XEDO – DAEMON byla zjištěna následující fakta o dané metodě:

- výborná reprodukovatelnost měření
- měření celého spektra vyžaduje operační dobu cca 10 minut pro dosažení potřebného frekvenčního kroku cca 0,5 [kHz]
- během doby měření proběhne rozmítání několikanásobně přes celé frekvenční pásmo – dochází k určitému statickému vyrovnaní naměřených hodnot (potlačených náhodných chyb)
- celé měření je ovlivněno systematickou chybou – budící piezoelektrický měnič obecně nemá plochou frekvenční přenosovou charakteristiku
- metodu lze prakticky aplikovat pro srovnávací měření při libovolné geometrické konfiguraci pulzar – měrný blok – snímač akustické emise

Uspořádání měřicího pracoviště je schematicky znázorněno na obr. 9.



Obr. 9. Blokové schéma pracoviště pro měření snímačů akustické emise metodou spojitého buzení piezoelektrickým pulzarem rozmítaným sinusovým signálem

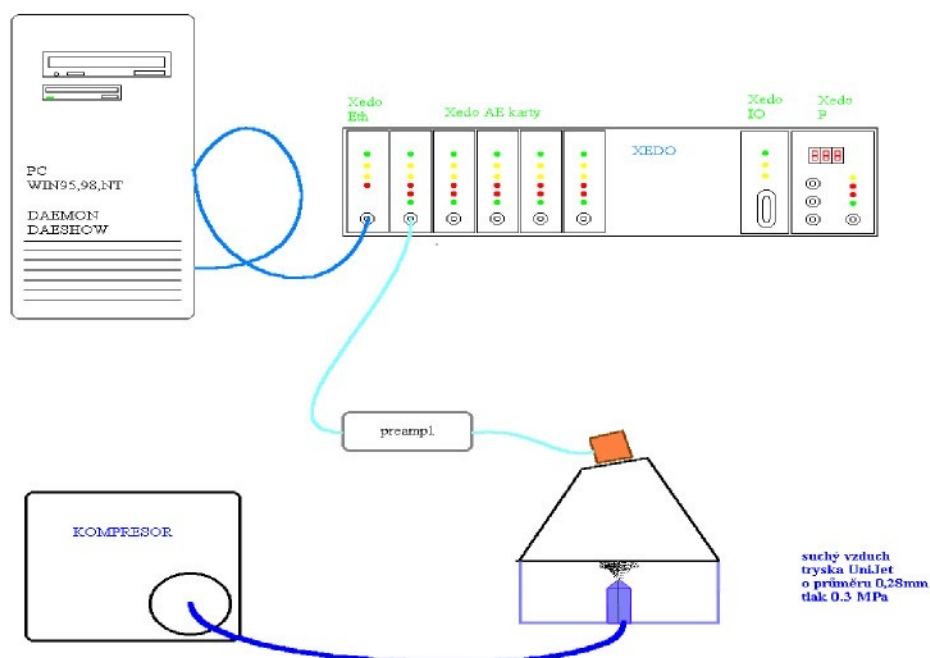
2.9.2. Spojitý charakter mechanických vibrací generovaných výtokem stlačeného vzduchu úzkou tryskou [11]

Zdrojem mechanického signálu je dopad proudu suchého vzduchu úzkou tryskou na měrný ocelový kužel s definovanou jakostí povrchu. Pro měření se používá tryska o průměru 0,28 [mm], která je umístěná kolmo k lapovanému povrchu ocelového kužele ve vzdálenosti 2,2 [mm] (viz obr.10.). Hodnota tlaku sušeného vzduchu je udržována na hodnotě 300 [kPa].

Snímače jsou opět uchycovány na měrný ocelový blok, tvaru kužele s potlačenými vlastními rezonancemi pomocí magnetického prstencového držáku. Vazebním médiem je silikonová vazelína. Uspořádání měřicího pracoviště je schematicky znázorněno na obr. 11.



Obr.10. : Experimentální ocelový kužel s tryskou a snímačem akustické emise



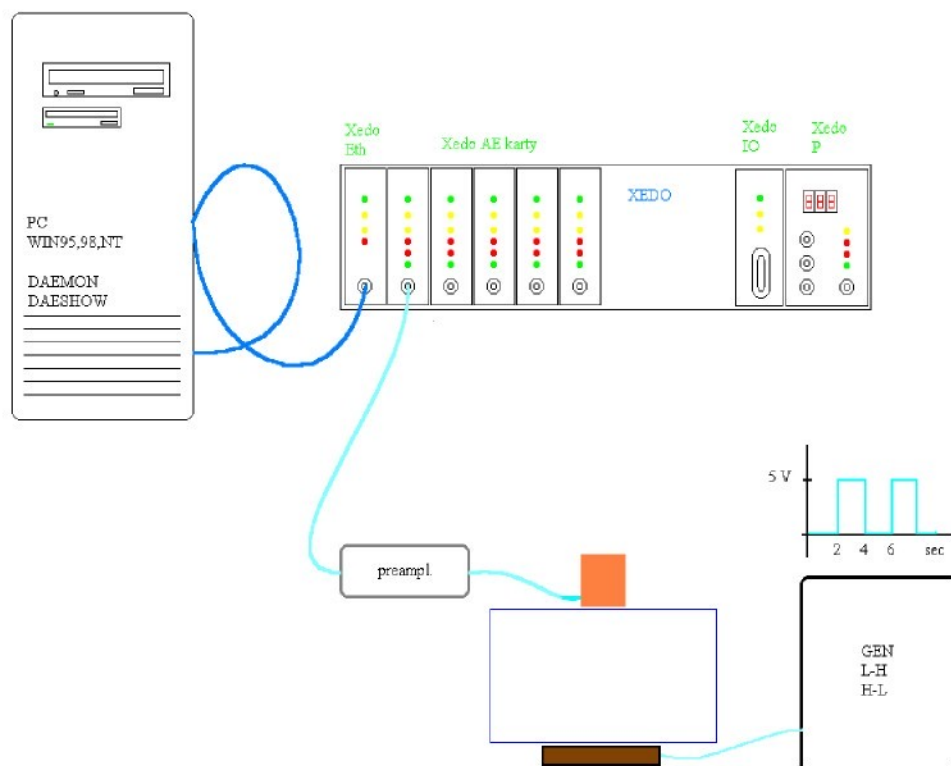
Obr. 11. : Blokové schéma pracoviště pro měření snímačů akustické emise metodou spojitého charakteru mechanických vibrací generovaných výtokem stlačeného vzduchu úzkou tryskou

Tato metoda je především vhodná pro laboratorní aplikace. Měření je velice rychlé cca 15 sekund na měření a vyhodnocení snímače. Metoda je extrémně citlivá na dodržení podmínek měření jako je tlak média, vzdálenost trysky, úhel dopadu paprsku média a zejména na jakosti povrchu dopadové plochy měrného objektu. Pro časovou stabilitu podmínek měření je třeba zabezpečit dostatečnou čistotu plynného média (vysušení, ...), zabránit degradaci kvality povrchu dopadové plochy nanesením inertních a mechanicky odolných vrstev.

2.9.3. Generování diskrétního pulzu elektromechanicky [11]

Zdrojem signálu je piezokeramický pulzer s řídicím signálem pravouhlého průběhu. Hladiny úrovně budicího signálu jsou 5 [V] (připojení ke zdroji) a 0 [V] (zkrat piezoelementu). Elektromechanickým měničem piezokeramického pulzeru je diskový měnič firmy DAKEL z materiálu 274 s přidavným mechanickým tlumením volných kmitů.

Snímač a vysílač jsou na měrném ocelovém bloku uchyceny magnetickým prstencovým držákem. Vazebním médiem je silikonová vazelína WP 235. Uspořádání měřicího pracoviště je schematicky znázorněno na obr. 12.



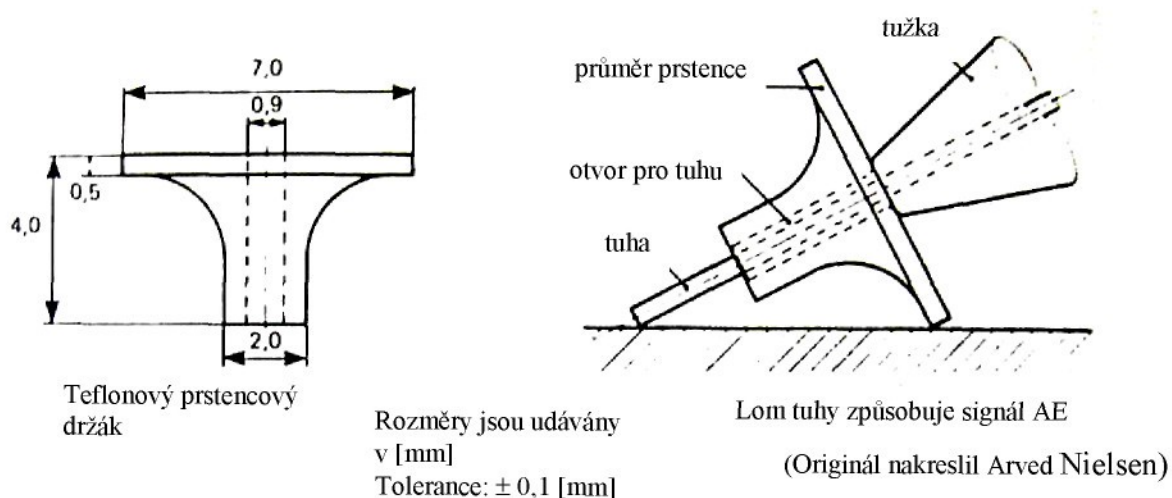
Obr. 12. : Blokové schéma pracoviště pro měření snímačů akustické emise metodou generování diskretního pulzu elektromechanickým tlumením volných kmitů.

Pulzní měření vyžaduje použití měrných těles s většími geometrickými rozměry, což je důležité především pro odstranění vlivu působení odražených vln.

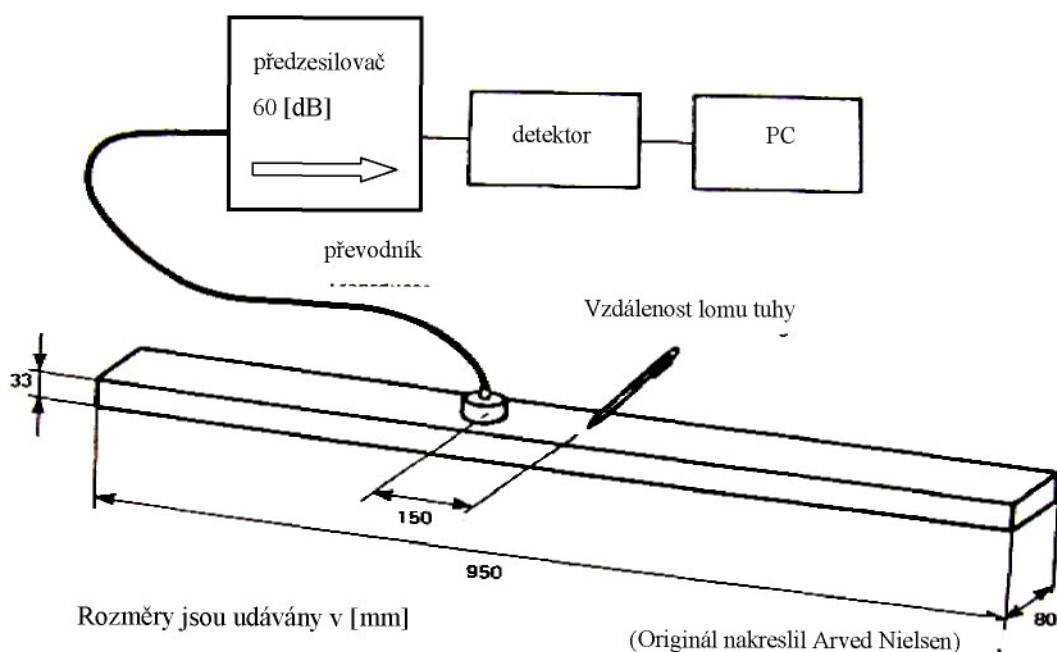
2.9.4. Mechanické lámání tuhy (PEN TEST) [11, 12]

Zdrojem signálu akustické emise je mechanický děj, který spočívá v lomu tuhy na povrchu měrného tělesa. Pro měření se používá tuha různých tvrdostí. U této metody se doporučuje použít prstencového držáku (viz obr. 13), a to především pro dodržení stálého lomového úhlu 45 [°]

Lomový úhel je úhel mezi osou tuhy a povrchem měřeného tělesa. Výsledky závisí na přesnosti dodržení geometrického uspořádání polohy snímače, lomu tuhy, na tvaru a rozměrech měrného objektu a také na zručnosti experimentátora. Nejlepší vzdálenost mezi snímačem a lomem tuhy podle Nielsena je 150 [mm] (jak je schématicky naznačeno i na obr. 14). Délka vysunutí lámané tuhy je 3 [mm].



Obr. 13. : Schéma prstencového držáku zachycující i jeho parametry



Obr. 14. : Blokové schéma pracoviště pro měření snímačů akustické emise metodou lámání tuhy podle Nielsena.

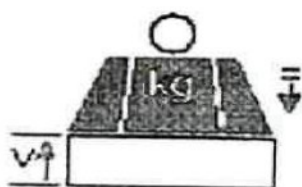
Výhodou této metody je snadná aplikace a jednoduchost zařízení pro generování mechanického signálu, ale s nevýhodou obtížnějšího dodržení reprodukovatelnosti výsledků při ručním lámání tuhy a to i v případě použití držáku tuhy.

3. MATERIÁLY SNÍMAČŮ AKUSTICKÉ EMISE

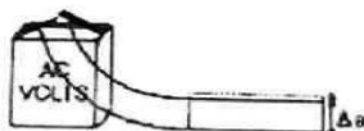
3.1. Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev objevili a popsali v roce 1880 bratři CURIEOVÉ [10]. Zjistili, že při deformaci některých monokrystalů se na jejich plochách objevují elektrické náboje (jednalo se o přímý elektrický jev). O rok později Lippmann předpověděl a bratři Curieové experimentálně potvrdili existence nepřímého piezoelektrického jevu. Tento jev spočíval ve vzniku deformace působením elektrického pole (viz obr.15)

a)



b)



Obr. 15. : a) přímý piezoelektrický efekt (mechanická zátěž → elektrický náboj)

b) opačný piezoelektrický efekt (elektrický signál → mechanická deformace)

Piezoelektrické jevy byly nejprve pozorovány na krystalech turmalinu. Velmi brzo byl však jejich výskyt zjištěn i u některých dalších monokrystalů, především z křemene. Křemene se využívalo téměř výlučně až do konce Druhé světové války. V jejím průběhu se stal křemen strategickou surovinou. Potíže spojené s jeho získáváním vedly jednak k výrobě syntetického křemene a jednak k pokusům o využití některých jiných piezoelektrických materiálů. Z nich se nejvíce uplatnila polykrystalická piezoelektrika.

3.2. Piezokeramický materiál [10]

3.2.1. Vlastnosti piezokeramiky

Nejběžnějším piezoelektrickým materiálem pro snímače akustické emise je piezokeramika, která může být slisována do různého tvaru (tloušťka, průměr), různý tvar určuje jak citlivost, tak i frekvenční charakteristiku převodníku. Frekvenční rozsah je dán průměrem a tloušťkou kotoučku. Na elementu je někdy umístěna zátěž, která mění frekvenční charakteristiku převodníku. Zátěž je většinou vyrobena z epoxidového lepidla smíchaného s částicemi o vysoké měrné hmotnosti, což často představuje wolframový prášek, přizpůsobených k akustické impedanci elementu, neboť tím je zaručen vysoký útlum akustických vln a potlačena resonance. Piezokeramické materiály mají relativně velkou citlivost, avšak většinou užší teplotní rozsah.

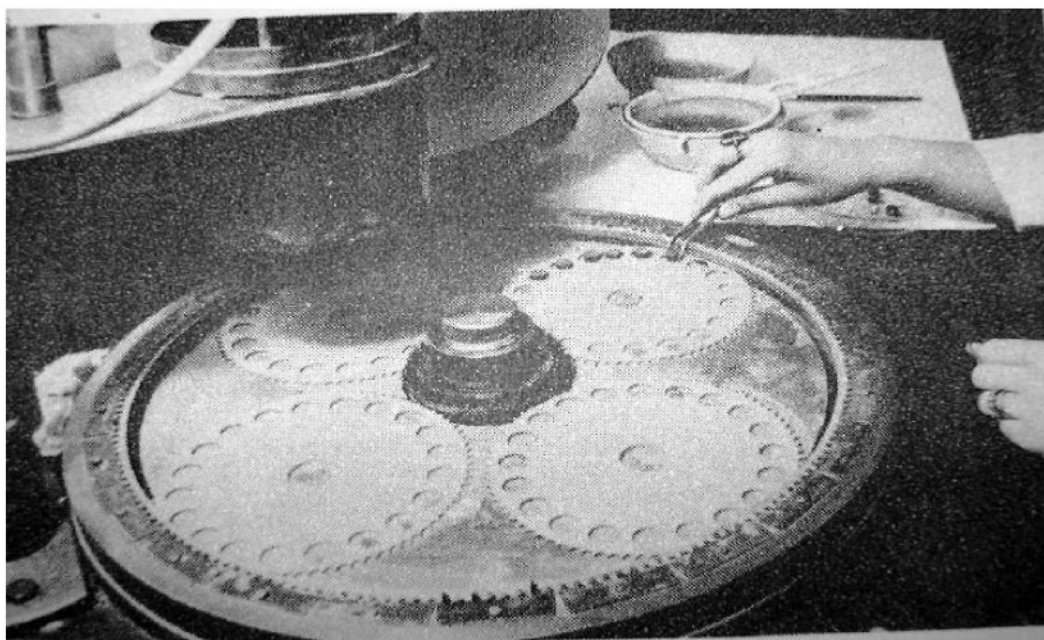
Velký význam má také otázka akustické vazby mezi zkoumaným prostředím a snímačem. Doporučuje se silikonový kaučuk snášející dobře vyšší teploty, oleje, vazelíny, epoxidy apod. Vazebné médium by mělo tvořit tenkou vrstvu, která rovnoměrně vyplňuje celý prostor mezi povrchem tělesa a snímačem, aby nedošlo k deformaci akustického pole. Spektrum přijímaných impulsů, zejména jejich amplituda může být značně ovlivněno tloušťkou média a přitlačnou silou snímače. Rozsáhlé možnosti technických aplikací piezoelektrických polykrystalických materiálů jsou vyvolány nejen jejich širokým sortimentem a jejich fyzikálními vlastnostmi, ale i tím, že je lze zpracovávat v porovnání s monokrystaly poměrně jednoduchou technologií do rozmanitých a relativně objemných tvarů. Podle technologie tvarování a tepelného zpracování se tyto piezoelektrické materiály často označují vžitým názvem piezokeramika, i když z fyzikálního hlediska je tento termín poněkud nesprávný (jedná se o tuhé roztoky).

3.2.2. Technologie zpracování piezoelektrických polykrystalických materiálů

Obecně platí pro přípravu piezoelektrických polykrystalických materiálů shodné postupy a technologie používané v keramickém průmyslu. Postupuje se tím způsobem, že výchozí suroviny, nejčastěji ve formě kysličníků, případně karbonátů nebo meziproduktů, se odváží ve zvoleném stechiometrickém poměru a včetně

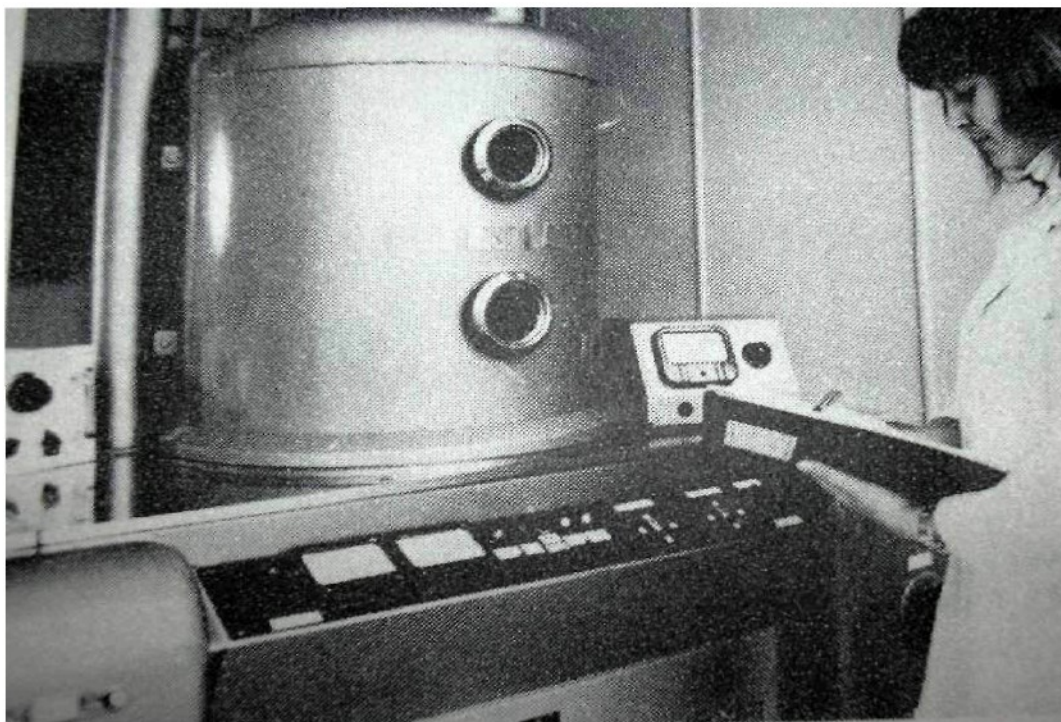
přídavných komponent se melou ve vhodném mlecím agregátu. Mele se buď suchým nebo mokrým způsobem. Mletím se jednak směs surovin homogenizuje a jednak se zmenšuje velikost zrn výchozích surovin, a to až do velikosti několika málo μm . Po odvodnění a vysušení se směs podrobuje první termální syntéze. Při ní, při teplotách nižších než je slinovací teplota materiálu, dochází k téměř úplné reakci mezi výchozími surovinami, a převážnou měrou jsou zároveň ukončeny i průvodní objemové změny. Kalcinát se znovu mele, odvodňuje a suší. Další zpracování se řídí způsobem technologie vytváření, která je pro požadovaný výrobek nejvhodnější. Prakticky je možno použít všech vytvářecích metod, známých při zpracování klasických keramických materiálů. Jsou to především: lisování do kovových forem, lití do sádrových forem vstřikové lití, izostatické lisování, tažení na vakuových lisech, lisování za současného slinování a další.

Takto vytvarované výrobky se slinují při teplotách odpovídajících příslušnému materiálu. Ve většině případů jde o teploty v oblasti 1200 až 1300 $^{\circ}\text{C}$. U těch materiálů, které obsahují kysličník olovnatý, je nutné zavést do procesu slinování taková opatření, aby nedocházelo k jeho těkání z materiálu. Tím by byla porušena zvolená stechiometrie soustavy a výrobek by neměl požadované vlastnosti. Kysličník olovnatý se vypařuje již při teplotách okolo 850 $^{\circ}\text{C}$. Zabrání se tomu tím, že prostor, v němž je výrobek při slinování uložen, se těsně uzavře a obohatí vhodným způsobem takovým nadbytkem par PbO , aby byla v maximální disociační rovnováha. Slinované výrobky se do požadovaných tvarů a rozměrů upravují řezáním, broušením (viz. Obr.16.) a leštěním.



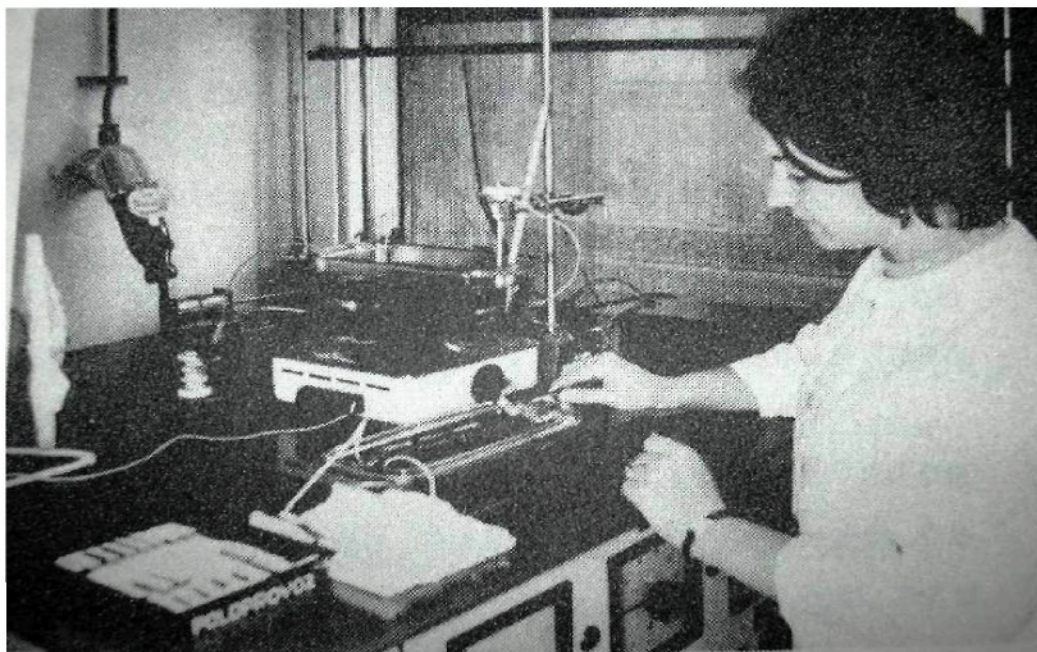
Obr. 16. broušení piezoelementů

Potom se na zvolené plochy nanášejí elektrody. Zpravidla se jako materiálu elektrod používá stříbro a elektrody se buď vypalují, nebo napařují (viz. Obr. 17.) či naprašují.



Obr. 17. Vakuové napařování

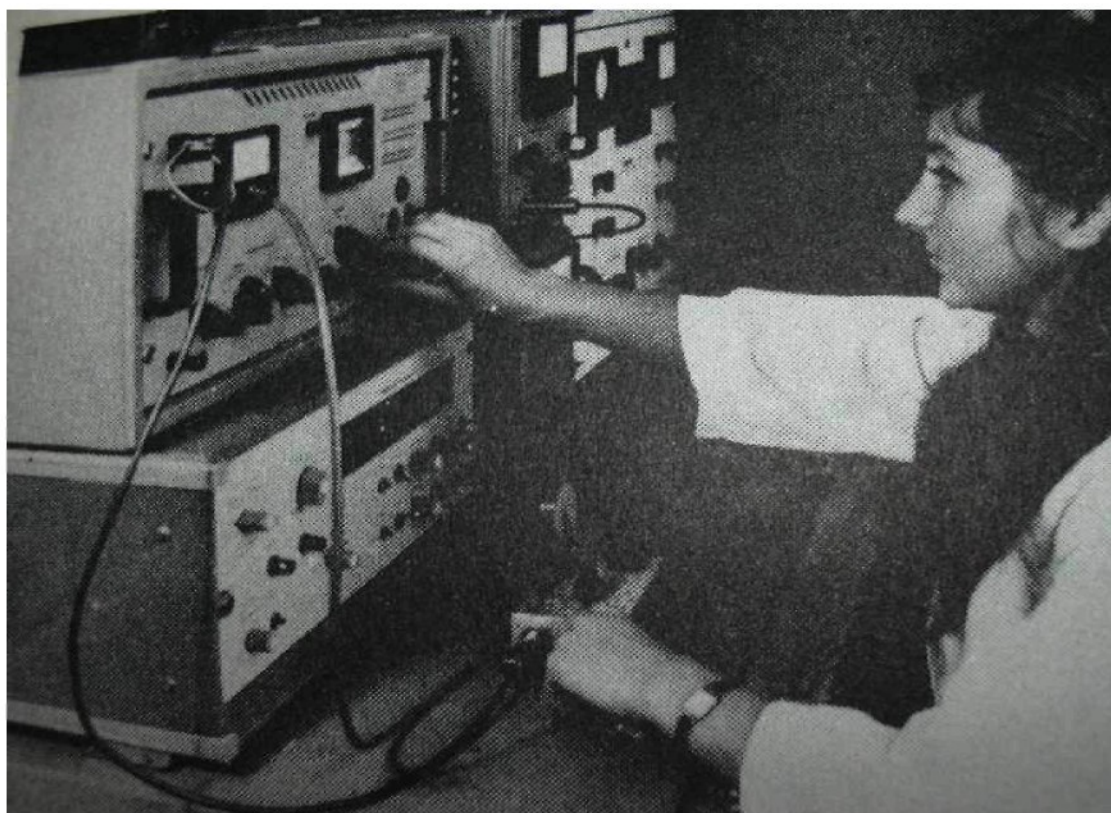
Takto upravené výrobky se polarizují, aby získaly piezoelektrické vlastnosti. Polarizace (viz. Obr. 18.) se provádí ve stejnosměrném elektrickém poli o gradientu, jehož velikost se řídí povahou polarizovaného materiálu a podmínkami polarizace, zejména teplotou, při níž se element polarizuje.



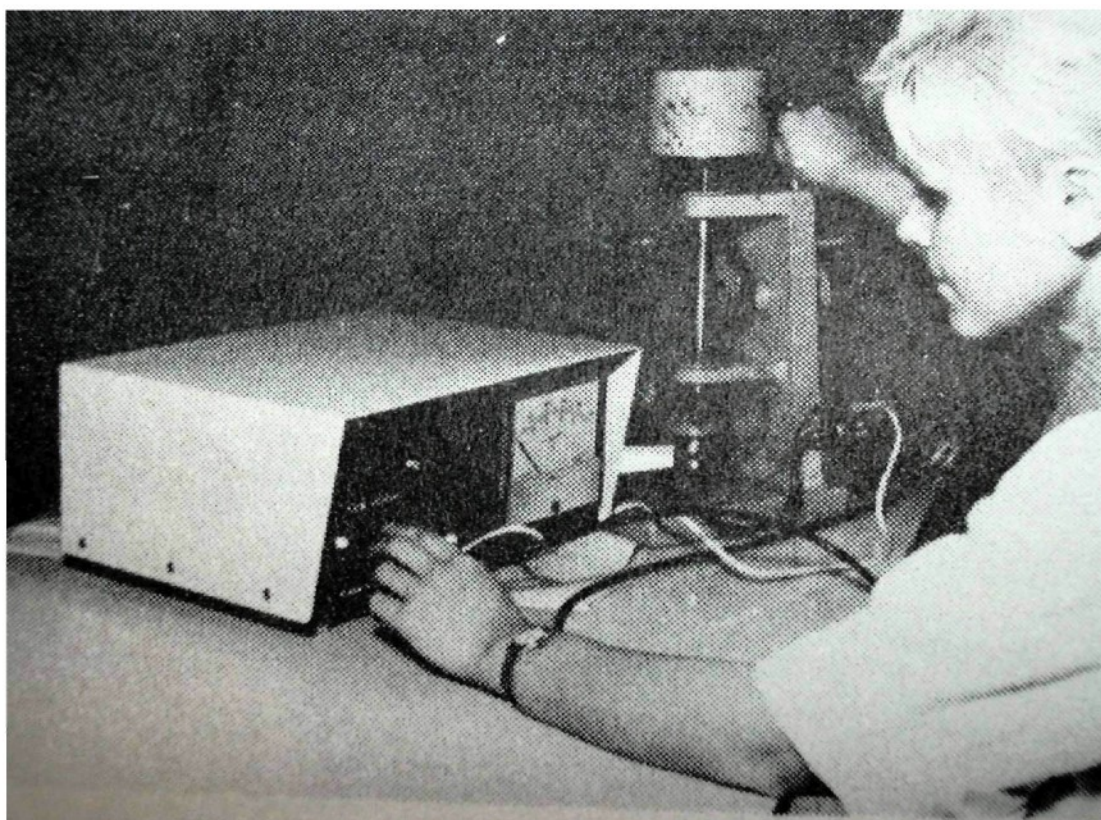
Obr. 18. Polarizace

Obvyklý gradient pole bývá 2 až 4 [kV/mm]. Polarizaci usnadňuje zvýšení teploty do takové oblasti, v níž má materiál dostatečně nízkou hodnotu koercitivní síly. Polarizovaný element se vkládá do vyhřívané olejové lázně. Polarizační napětí se udržuje po určitou dobu a přerušuje se až po poklesu teploty lázně asi na +50 [°C].

Nejčastějšími výrobky jsou měniče kruhových, obdélníkových nebo čtvercových tvarů a různě profilované elementy. Jejich rozměry se pohybují od několika málo milimetrů až po stovky milimetrů. Piezoelektrické vlastnosti takto získaných výrobků se pak zkoušejí podle požadavků odběratele. Ve většině případů se měří rezonanční kmitočet (viz. Obr. 19.) nebo velikost náboje v závislosti na tlaku (viz. Obr. 20.).



Obr. 19. Měření rezonančního kmitočtu



Obr. 20. Měření náboje

3.2.3. Rozdělení piezokeramických snímačů dle firmy DAKEL [15]

Přenosová charakteristika snímačů AE DAKEL pasivního typu (bez vestavěného předzesilovače s účinky pásmové propusti) má obecně rezonanční charakter. V širokém frekvenčním spektru se vyskytují lokální maxima a minima s polohou závislou na typu pouzdra snímače a geometrických rozměrech použitého piezoelementu. Dolní hranice přenosových charakteristik je cca 10 [kHz] - pro nutnost aplikace střídavé (kapacitní) vazby z důvodu eliminace vlivu pyroelektrického jevu. Snímače DAKEL lze použít až pro frekvence 2,8 [MHz]. Při frekvencích vyšších jak 1 [MHz] je přenosová charakteristika ovlivněna vlastnostmi použitého koaxiálního kabelu.

U jednotlivých typů snímačů jsou uváděny „Relativní srovnávací charakteristiky REF05“ získané buzením v soustavě pulser - snímač. Jako pulser je při všech měřeních použit měnič REF05. Buzení je prováděno sinusovým signálem 1 V_{RMS}. Snímání je prováděno aparaturou DAKEL - XEDO se vstupním stupněm 80 - 750 [kHz].

Rozdělení dle frekvenčního rozsahu měřených signálů :

- nízkofrekvenční snímače 0 [Hz]... 1 [kHz]
- středofrekvenční snímače 1 [kHz] ... 100 [kHz]
- snímače akustické emise 100 [kHz] ... 2 000 [kHz]

Rozdělení snímačů akustické emise dle vestavěných elektronických obvodů :

- snímače bez vestavěných elektronických obvodů
- snímače s vestavěným předzesilovačem 35 [dB]
- snímače s vestavěným předzesilovačem 35 [dB] a přepínačem pro režim ultrazvukové buzení
- snímače kombinované – obsahují snímač s vestavěným předzesilovačem 35 [dB] a snímač pro měření v nízkofrekvenčním pásmu (0-1 [kHz])

Rozdělení dle dovolených provozních teplot snímačů :

- standardní rozsah teplot - 20 [°C] + 75 [°C]
- rozšířený rozsah provoz. teplot - 40 [°C] +150 [°C]
- vysokoteplotní snímače +20 [°C] + 350 [°C]

Rozdělení dle mechanické odolnosti pouzder snímačů a stupně krytí :

- laboratorní provozní podmínky - stupeň krytí IP 60
- průmyslové provozní podmínky - stupeň krytí IP 66
- hermetické provedení - stupeň krytí IP 68

Rozdělení dle způsobu spojení k měřenému objektu :

- přímým lepením snímače na plochu
- magnetickým držákem
- šroubovým spojem (vnější, nebo vnitřní závit na snímači)
- pomocí navařeného tyčového vlnovodu
- pásovou sponou (na trubkách)

Rozdělení dle materiálu stykové plochy snímače

- ocel niklovaná
- ocel nerezová
- korund

Rozdělení dle použité keramiky :

- DAK 15B
- DAK 274
- DAK 191

K části 3.2 patří tematicky přílohy I, II a III.

3.3. PVDF folie [17, 18]

Polyvinylidenefluorid (PVDF) patří mezi polymery s piezoelektrickými vlastnostmi. PVDF je dnes jeden z nejpoužívanějších fluorových termoplastů. Monomer vře při teplotě $-82\text{ }^{\circ}\text{C}$ a polymeruje podobně jako tetrafluorethylen při teplotách $50\text{ až }150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlacích $2,5\text{ až }6\text{ MPa}$. Polymer taje kolem $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, je vysoce krystalický a lze jej bez problémů zpracovávat při $220\text{ až }240\text{ }^{\circ}\text{C}$ běžnými zpracovatelskými technikami určenými pro termoplasty. Je trvale použitelný v rozmezí $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jeho výtečné mechanické vlastnosti i chemická odolnost z něj činí cenný materiál pro stavbu strojů a zařízení pro chemický průmysl. Dobrá odolnost proti povětrnosti umožňuje venkovní použití ochranných povlaků z PVDF. PVDF za normální teploty odolává většině anorganických kyselin a hydroxidů, uhlovodíkům a alkoholům. Má nepatrnou nasákavost (pod $0,03\text{ }[\%]$), je těžce hořlavý, má dobré antiadhezivní vlastnosti. Bobtná v polárních rozpouštědlech.

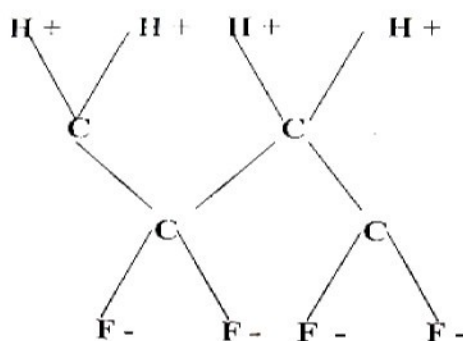
Na počátku sedmdesátých let bylo objeveno, že polyvinylidenefluorid (PVDF) vykazuje feroelektrické vlastnosti, jako technický materiál se ale používal už od roku 1940 a to hlavně pro vnější úpravy s dlouhou životností, dále jako elektrický izolátor a také jako chemicky odolný materiál při chemických výrobních procesech. Má velice jednoduchou chemickou strukturu. Tato struktura je dána opakující se jednotkou – $\text{CH}_2 - \text{CF}_2 -$.

Objev polymerů s feroelektrickými vlastnostmi vyplynul z výzkumu elektretů, materiálů ve kterých se projeví efektivní makroskopické odlišení pozitivního a negativního náboje po použití elektrického pole na daný materiál.

Kawai byl první kdo roku 1969, objevil, že PVDF vykazuje neobvykle velký piezoelektrický koeficient. Pro představu – polymerní materiál se zahřál a po přiložení elektrického pole se teplota snižovala na původní teplotu. Ve stavu zahřátí docházelo k vyšší pohyblivosti makromolekul a také ke snažšímu natáčení polárních atomů ve směru přiloženého elektrického pole. Z těchto prvních studií vyplynulo, že piezoelektrická vlastnost PVDF je závislá na orientaci dipólů a jejich prostorového náboje.

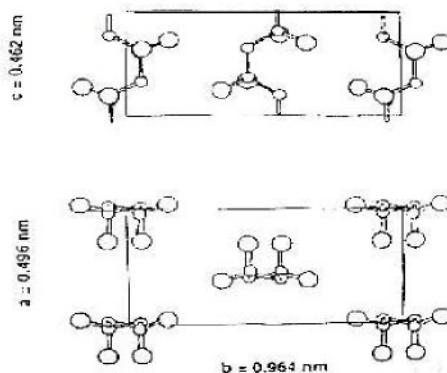
3.3.1. Struktura polyvinylidenefluoridu

PVDF má relativně jednoduchou molekulární strukturu $(\text{CF}_2\text{CH}_2)_n$, kde n je větší než 10 000. (viz obr. 21)



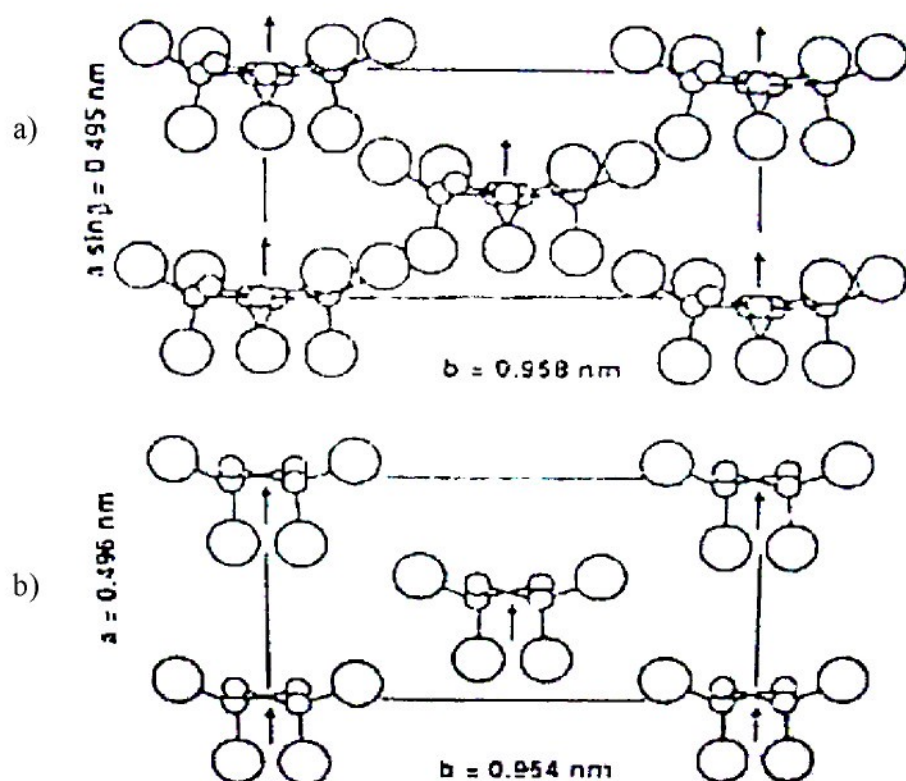
Obr. 21. Struktura PVDF

PVDF je krystalický polymer s obsahem krystalické fáze více než 50 [%]. Krystalická struktura PVDF je předmětem mnoha výzkumů. Důvod proč byl PVDF tak intenzivně studován z tohoto hlediska je ten, že může mít nejméně čtyři různé fáze, které nám udávají různé elektrické vlastnosti. Ty jsou ovlivněny právě danou krystalickou strukturou. Nejběžněji sledovaná struktura je získaná zchlazením z taveniny při teplotách nižších nebo rovných 150 [°C] a nazývá se nepolární α - fáze (viz obr. 22.).



Obr. 22. Krystalická struktura nepolární α - fáze PVDF

Krystalická fáze, která je více zajímavá z hlediska elektrických vlastností je feroelektrická β - fáze (β - fáze bude podrobněji popsána níže). O dalších dvou formách se budeme zmiňovat jako o γ - a δ - fázích (viz obr. 23.), které vznikají přibližně při 170 [°C]. Obě z těchto forem jsou také polární, ale jejich dipólový moment je menší než u β - fáze a proto nejsou předmětem zkoumání z hlediska elektrických vlastností.



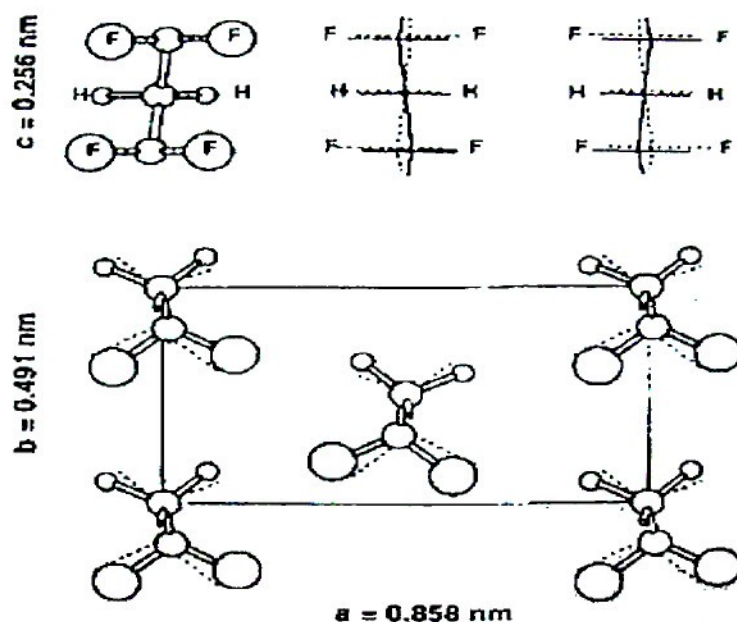
Obr. 23. Schematický diagram molekulárních orientací v a) γ - fázi
a v b) δ - fázi

Molekula v krystalické β - fázi (viz obr. 24.) má díky svému uspořádání větší dipólový moment. Tento dipólový moment u dvou sousedních molekul je orientován shodným směrem.

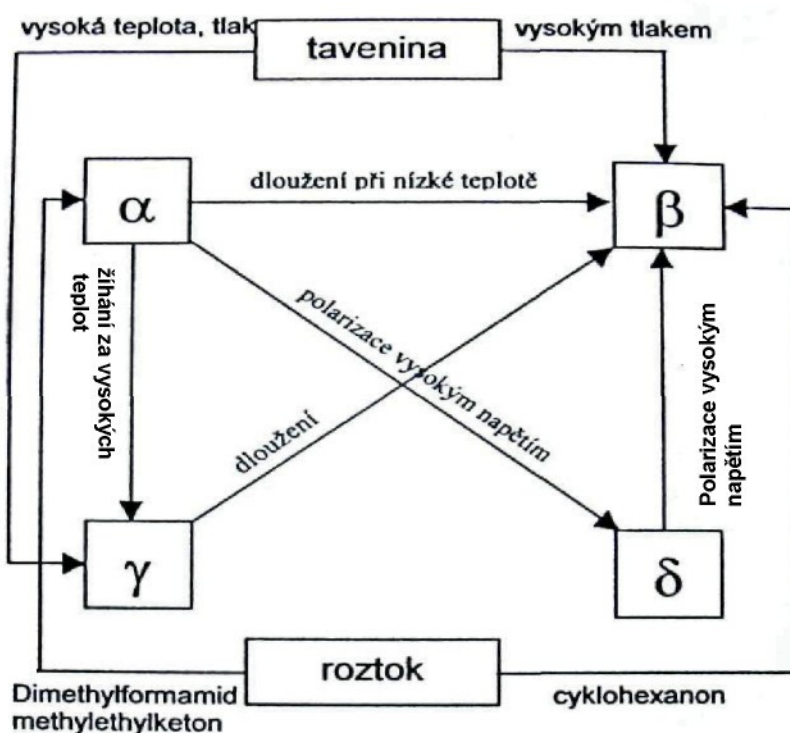
β - fáze se dá získat z filmů s α - fází opakovaným natahováním jejich původní délky. Je to proces, který nám poskytuje vysoce orientované β - fáze filmy s osami řetězců, které jsou paralelní se směrem tažení.

Mezi těmito fázemi existují určité procesy, díky kterým můžeme získávat rozdílné fáze nebo přecházet z jedné do druhé. Z toho vyplývá, že vlastnosti,

které bude tento materiál mít, závisí na způsobu jeho přípravy a na podmínkách, kterými se tento polymer může měnit. K různým fázím můžeme dojít přípravou fólií z různých rozpouštědel nebo z taveniny. Dále se dá použít vysokých teplot při aplikaci vysokého napětí. Nebo tažení při nízkých teplotách atd. (viz obr. 25.)



Obr. 24. Krystalická struktura polární β - fáze polyvinylidenefluoridu



Obr. 25. Schéma vztahů mezi čtyřmi fázemi polyvinylidenefluoridu

3.4. Kompozit

Definice kompozitu říká, že kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně však ze dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací. [20]

Z definice kompozitu plyne, že kompozitů je nepřeberné množství druhů a typů. V práci byl použit kompozit typu 0 – 3 tvaru disku, jehož složení se skládá z EPC856, což je obchodní označení pro materiál titaničitanu zirkoničitanu olovnatého $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, v praxi označovaného jako „SOFT“ keramika a epoxýdu (epoxy 1200).

Kompozit byl vyroben rozmělněním EPC856, který se spojil pomocí epoxidové pryskyřice (epoxy 1200), tím vznikl piezoelektrický kompozitní materiál s mechanickými a chemickými vlastnostmi ovlivněnými použitou pryskyřicí. Dále byl kompozit 24 hodin vytvrzován ve formě, posléze broušen a nakonec byly nanесeny elektrody – „DEGUSSA“. Vzorek byl polarizován v silikonovém oleji za použití stejnosměrného napětí 7,3 [kV], při teplotě 80 [°C] po dobu 15 minut.

4. INTELIGENTNÍ SNÍMAČ [26]

Inteligentní řezné nástroje jsou v současné době na začátku svého vývoje. Jedná se o nástroje osazené v tělese nástroje i v břitové destičce řadou senzorů, jejichž výstupy informují řídicí systém stroje o okamžitém stavu nástroje. Tyto snímačové systémy měří obvykle složky řezné síly, opotřebení břitu nástroje, vibrace, teplotu a deformace některé části nástroje. Řídicí systém stroje může podle těchto informací měnit řezné podmínky, případně určit optimální okamžik výměny řezného nástroje.

Jak už bylo zmiňováno v úvodu této práce a i v pracích předních odborníků v tomto odvětví výzkumu **moderní snímač pro moderní strojírenské celky by měl umět nejen zpracovávat signál, ale zároveň by měl obsahovat i matematický model uvádějící do vzájemného vztahu naměřené hodnoty s monitorovanými a řízenými proměnnými a dále by měl být vybaven i strategií nutnou pro zpracování získané informace v bloku rozhodování (decision maker).** Snímač s výše uvedenými vlastnosti je často nazýván jako tzv. „inteligentní snímač“, a jako takový by měl blok snímače v sobě obsahovat více způsobilostí než jen prostý převodník s předzesilovačem v jednoduchém monitorovacím zařízení. Dornfeld v práci [2] píše: „...vskutku se zdá, že asi **nejdůležitějším prvkem snímačového systému je metodologie zpracování signálu pro získávání informací a pro správné rozhodování.**“

V technické praxi je používáno velké množství různých snímačů, proto aby byla pokryta celá šířka veličin charakterizujících technologické procesy, nejen obrábění.

4.1. Veličiny působící na nástroj během procesu obrábění

Velikost řezné síly je závislá především na vlastnostech obráběného materiálu a řezných podmínkách. Za rozhodující veličiny působící na velikost řezné síly se prakticky považuje deset základních:

- 1) materiál obrobku (pevnost v tahu, tvrdost, stav, struktura, chemické složení)
- 2) posuv nebo tloušťka odřezávané vrstvy
- 3) šířka záběru ostří nebo šířka odřezávané vrstvy
- 4) řezný poměr, což je šířka záběru ku posuvu
- 5) úhel čela
- 6) úhel nastavení

- 7) řezná rychlost
- 8) nástrojový materiál (pevnost, tvrdost, stav, struktura, chemické složení)
- 9) chlazení a mazání
- 10) opotřebení břitu řezného nástroje (VB, KT, stav, struktura)

Pevnost v tahu obráběného materiálu není přímo měřítkem pro velikost řezné síly. Řezná síla roste lineárně se zvyšující se pevností obrobku, ale není dvojnásobná při dvojnásobné pevnosti. Posuv a šířka záběru ostří patří mezi veličiny, které mají na řeznou sílu největší vliv. Jejich velikostí je dán průřez odřezávané třísky. Řezná síla klesá s tím jak je úhel čela kladnější a to zhruba o 1 [%] s 1 [°]. U řezné rychlosti bylo prokázáno, že její zvyšující se hodnoty způsobují pokles řezné síly. Význam použitého nástrojového materiálu se projevuje velikostí třecích sil na čele a hřbetu nástroje. Jako lepší se v tomto případě ukazuje řezná keramika, která vykazuje menší třecí síly než slinutý karbid. Obdobným způsobem ovlivňuje řeznou sílu způsob mazání a chlazení. Zásadní vliv na řeznou sílu má opotřebení na hřbetě nástroje a to nárůstem síly až o 50 [%].

Další veličinou, která ovlivňuje trvanlivost nástroje, je tepelné zatížení břitu. Teplota se zvětšuje především při zvyšování řezné rychlosti. Nástroje jsou citlivé hlavně na kolísání tepelného zatížení břitu. Nezanedbatelným faktorem ovlivňujícím trvanlivost nástroje a jakost obrobené plochy je tvar nože a jeho upnutí. V závislosti na řezných podmínkách může totiž dojít ke kmitání nástroje, což může způsobit i destrukci samotného břitu.

4.2. Požadavky na vlastnosti snímačů

Požadavky kladené na snímače mohou být různé, ale existují určité základní vlastnosti, které by měl splňovat každý snímač. Tyto vlastnosti jsou následující:

1. jednoznačnost – každé hodnotě měřené veličiny má odpovídat jen jedna hodnota výstupní veličiny. Ve skutečnosti se často vyskytuje hystereze, tj. rozdíl mezi hodnotami výstupního signálu odpovídajícími jedné hodnotě vstupního signálu, přiblížíme – li se k ní z „jedné“ nebo z „druhé strany“.
2. lineární závislost výstupní veličiny na vstupní (měřené) veličině
3. malá citlivost – malá hodnota změny měřené veličiny, při které ještě nevzniká zaznamatelná změna výstupního signálu. Parametr „citlivost“ se uvádí jako nejmenší hodnota vstupní veličiny, od které se výstupní signál začíná měnit
4. malá setrvačnost – zanedbatelné časové spoždění výstupního signálu

- snímače po změně vstupní veličiny
5. stálost údaje – údaj snímače se nemění, nemění-li se vstupní veličina. S tím úzce souvisí „reprodukovatelnost“ jako rozptyl hodnot výstupního signálu zjištěný při opakovaném měření
 6. minimální zatěžování měřeného objektu (odběr proudu)
 7. minimální šum – výstupní signál nemá být zatížen parazitní deformací
 8. provozní spolehlivost, přesnost, a jednoduchá údržba

Specifické nasazení snímačů pro „inteligentní obrábění“ ještě vyžaduje odolnost snímačů vůči tepelnému zatížení a mechanickému namáhání.

4.3. Druhy snímačů používaných při obrábění

V dnešní době se při obrábění používá celá řada snímačů. Jedná se o již zmiňované snímače akustické emise, dále pak o snímače sil, vibrací, teploty a opotřebení.

4.3.1. Snímače vibrací

Při experimentálním studiu kmitů se sleduje především časový průběh výchylky „ x “, rychlosti „ v “ a zrychlení „ a “ určitého bodu systému stroj – nástroj – obrobek. Aparatura pro měření kmitů bývá zpravidla složena ze snímače kmitů, zesilovače, integračního resp. derivačního členu a registračního přístroje. Každý snímač chvění obsahuje mechanickou část (kmitající systém), převodník, který transformuje kmitavý pohyb na elektrický a vlastní těleso snímače. Snímač kmitů lze rozdělit na absolutní a relativní.

Relativní snímače měří kmity sledovaného kmitajícího bodu vůči jinému nekmitajícímu okolí. Relativní snímače jsou vhodné zejména pro měření kmitů nízkých frekvencí, mají velmi malé fázové a amplitudové zkreslení.

Snímače absolutní se používají na měření kmitů vyšších frekvencí a tam, kde není k dispozici pevný bod, k němuž by bylo možné výchylku kmitajícího bodu měřit. Snímač je připojen přímo ke kmitajícímu členu. Systém snímače je složen z měřícího tělíska a tlumiče. Měřící tělísko zůstává při pohybu kmitajícího členu v klidu vzhledem k nekmitajícímu okolí.

Snímače absolutní i relativní se rozdělují podle typu převodníků (např. mechanické, optické, tenzometrické, piezoelektrické, indukční, kapacitní).

4.3.2. Snímače opotřebení

Charakteristickým projevem opotřebení bříty řezného nástroje je změna tvaru a rozměrů jednotlivých elementů bříty. Mezi nejdůležitější formy opotřebení bříty patří opotřebení na hřbetě, na čele a vylomení části bříty. Měření opotřebení lze provádět mimo stroj nebo na stroji a to kontinuálně nebo nekontinuálně.

Měření opotřebení mimo stroj patří mezi nejrozšířenější metody, ale má řadu nevýhod. Měření se provádí pomocí mikroskopu. Nejčastěji se měří šířka opotřebení na hřbetě VB, hloubka opotřebení na čele KT a radiální opotřebení VR. Nevýhodou této metody je nutnost vyjmout nůž z nožového držáku před každým měřením. Z toho plyne velká pracnost, časová náročnost a nemožnost použití pro adaptivní řízení.

Nekontinuální měření opotřebení bříty na stroji je oproti měření mimo stroj méně časově náročné, protože odpadá nutnost manipulace s nožem. Měření je jinak principiálně obdobné jako měření mimo stroj. Provádí se v okamžiku, kdy je nástroj v poloze určené pro měření a stroj je zastaven. Měří se opět pomocí mikroskopu nebo se využívá modernějších metod pracujících na optoelektronickém principu. Mezi tyto metody patří například snímání CCD kamerou s následným zpracováním nasnímaného obrazu. Měření radiálního opotřebení lze provádět kontaktními mechanicko-elektronickými snímači. Tyto metody snímání již umožňují nasazení adaptivního řízení.

Kontinuální měření opotřebení nástroje na stroji je jedním z hlavních předpokladů pro návrh dokonalých adaptivních řídicích systémů obráběcích strojů. Dosud existují jen metody s omezenou použitelností. Jednou z těchto kontinuálních metod je měření úbytku břitové destičky ve směru kolmém k ploše řezu nebo ve směru radiálním pneumatickým způsobem. Tím jak se zvětšuje radiální opotřebení, zmenšuje se vzdálenost mezi obrobkem a tryskou zabudovanou v nástroji. Dochází k změně výtokového průřezu trysky, což způsobuje změnu tlaku v pneumatickém měřicím obvodu. Na základě změny tlaku se usuzuje na velikost radiálního opotřebení.

Metoda kontinuálního sledování opotřebení břitových destiček je propagována firmou „KYOCERA“. [36] Jedná se o systém, který je integrován přímo na břitovou destičku. Na ni je napařeno tenké vodivé vinutí, které se opotřebovává současně s opotřebením destičky. Měření opotřebení je založeno na kontinuálním měření odporu vodivého vinutí. Vodivé vinutí má dvě základní funkce. První funkce je relativně kontinuální zvětšování odporu tím jak se zmenšuje průřez vodiče až po úplné přerušení vinutí. Druhá funkce je okamžité přerušení vinutí v okamžiku vylomení bříty

destičky. Přenos signálu k řídicímu systému stroje je řešen pomocí kontaktního systému ve stopce nože. Odtud je vedení napojeno na zařízení měřící elektrický odpor, které informuje řídicí systém stroje o stavu nástroje. Destičky s napařovaným vinutím jsou vyráběny v několika variantách podle toho, zda se jedná o hrubování nebo obrábění na čisto. Pro hrubování jsou určeny destičky se širším vodivým vinutím na hřbetu a naopak pro obrábění na čisto jsou destičky vybaveny jen úzkým vodičem.

4.3.3. Snímače sil

V současné době se používají především snímače elektrické. Vyznačují se velkými výhodami ve srovnání s ostatními dynamometry. Jde především o možnost dálkového přenosu signálu a jeho následné zpracování mnoha různými způsoby (např. zesílení, usměrnění atd.). Stále probíhající miniaturizace vlastních snímačů umožňuje jejich aplikování i na místa s nedostatkem prostoru, kde by nebylo možné nasadit jiné druhy dynamometrů.

Podle způsobu jakým dochází k přeměně deformace na elektrický signál dělíme snímače na parametrické a generátorové.

Snímače parametrické jsou založeny na změně jednoho z parametrů elektrického obvodu. Je to odpor - R , indukčnost - L a kapacita - C . Nejvíce používaný je snímač odporový.

Odporové snímače jsou založeny na měření změny odporu tenzometru. Změny odporu tenzometru se docílí změnou jeho tvaru, která je způsobena deformací deformačního členu dynamometru. Deformační člen je k tenzometru přilepen. Tenzometr je tvořen vinutím vodiče nebo polovodičovým elementem.

Tenzometry tvořené vinutím vodiče rozdělujeme na:

- drátkové
- foliové
- napařované

Tenzometry polovodičové mají tvar válečku a jsou vyrobeny z monokrystalu křemíku. Působením mechanické síly na takovýto tenzometr dochází k výrazným piezorezistivním změnám křemíku. Elektrický odpor křemíku je na mechanické zatěžování řádově citlivější než kovové tenzometry. Nevýhodou polovodičového tenzometru je velká závislost odporu na teplotě. Z toho vyplývá složitější teplotní kompenzace než u kovových tenzometrů. Vzhledem k anizotropii vlastností monokrystalu křemíku je velmi důležité v jaké rovině byl váleček z monokrystalu

odříznut. Při měření se sleduje závislost odporu na síle. Odpor se mění v závislosti na velikosti deformace pružného členu dynamometru, na kterém je tenzometr připevněn.

Odporové změny tenzometru při jeho deformaci jsou velmi malé (řádově 10^{-4} až 10^{-2} [Ω]) a vyžadují proto stabilní i citlivé vstupní obvody a nezkreslující jednotky. Pro měření tak malých změn odporu dnes používáme převážně můstkové metody.

Snímače generátorové samy generují napětí způsobené deformací snímače. Nejpoužívanějším generátorovým snímačem je snímač piezoelektrický. Tento snímač se vyznačuje vysokou citlivostí i při dynamickém zatěžování. Podstatou těchto dynamometrů je využívání piezoelektrického jevu pro snímání deformace. Tento jev je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém namáhání ve směru určité krystalografické osy.

Celý dynamometr se skládá z vlastního tělesa dynamometru, ve kterém jsou umístěny snímače a z elektrického obvodu, který zpracovává signál ze snímačů.

4.3.4. Snímače teploty

Obecně lze k měření teploty využít jakéhokoliv fyzikálního jevu, který závisí na teplotě. Vzhledem ke specifickým podmínkám a složitosti procesu obrábění lze však pro experimentální studium používat jen některé fyzikální děje. Pro potřeby inteligentních řezných nástrojů jsou vhodné pouze metody elektrické, u kterých je možné signál dále vyhodnocovat pomocí PC. Vhodné fyzikální principy jsou tedy termoelektrický jev (použití termočlánků) a změna elektrického odporu (použití termistorů).

Podstatou termočlánků je elektrický obvod, který je složený z různého materiálu a jejichž konce jsou vodivě dokonale spojeny. Jsou-li oba spoje udržovány vzájemně na rozdílných teplotách vznikne v obvodu termoelektrické napětí, které lze pro malé teplotní rozdíly vyjádřit vztahem: $U = \alpha_0 \cdot \Delta\theta$

Utermoelektrické napětí

α_0termoelektrický koeficient dvojice vodičů

$\Delta\theta$teplotní rozdíl mezi oběma spoji

Velikost vznikajícího termonapětí však závisí nejen na rozdílu teplot mezi oběma spoji, ale také na druhu použitých vodičů, charakterizovaných termoelektrickým koeficientem vodiče. Termoelektrický koeficient termočlánku je roven algebraickému rozdílu hodnot koeficientů jednotlivých vodičů z termoelektrické řady. Závislost

termonapětí na teplotě není přesně lineární, protože se s teplotou současně mění i termoelektrický koeficient. Pro termoelektrická měření teploty se používají prakticky jen některé dvojice kovů nebo slitin. Ty jsou sestaveny tak, aby vzniklé termonapětí bylo dostatečně velké v rozsahu teplot, pro něž je dvojice určena. Dále se od termočlánků požaduje pokud možno lineární charakteristika v daném měřicím rozsahu.

Při vlastním měření se jeden spoj termočlánku udržuje na známé teplotě a druhý konec je vystaven účinku měřené teploty. Termonapětí se měří milivoltmetrem nebo jiným vhodným přístrojem. Jednotlivé vodiče termočlánku musí být elektricky dobře izolované a chráněny proti mechanickému poškození.

Pro měření teplot při obrábění se termočlánků používá nejen v klasickém provedení, ale využívá se také materiálu obrobku a nástroje jako vodiče v různých kombinacích.

Existují tři základní provedení termočlánků:

- umělé
- poloumělé
- přirozené

Poloumělé a přirozené termočlánky nemohou být využity v těžkých dílenských podmínkách, proto jsou vhodné pouze pro laboratorní použití.

U umělých termočlánků se používá některého typu normalizovaného termočlánku, jehož měřicí konec je vhodně zabudován do místa měření teploty. Srovnávací konec termoelektrického obvodu je obvykle přímo na svorkách indikačního přístroje. Pomocí umělých termočlánků můžeme stanovit teplotu v různých místech nástroje, s výjimkou stykových ploch bříty s třískou. Zabudování termočlánku do nástroje je však dosti pracné a jeho přítomnost mění do určité míry podmínky vedení tepla. Výhodou umělých termočlánků je především známá charakteristika závislosti termonapětí na teplotě. Odpadá tak pracná kalibrace. Lze je široce použít v průmyslové praxi.

Poloumělé termočlánky se skládají z materiálu nástroje který je vodivě spojen ze dvou vodičů s nástrojem v místě měření teploty. Na rozdíl od umělých termočlánků mají poloumělé širší experimentální použití, vzhledem k malým rozměrům cizího vodiče (průměr 0,1 až 0,01 [mm]). Nevýhodou poloumělých termočlánků je, že pro každý materiál nástroje je nutno experimentálně stanovit kalibrační křivku.

Termoelektrický obvod přirozeného termočlánku tvoří nejčastěji materiál nástroje a obrobku. Měřicí konec tvoří přímo místo styku nástroje s obrobkem. Vznikající termonapětí je úměrné teplotě spoje, která je nazývána teplotou řezání.

Nutnou podmínkou pro funkci přirozeného termočlánu je vzájemné izolování nástroje a obrobku.

Měření teploty termistory je založeno na principu měření elektrického odporu vodiče nebo polovodiče, jehož velikost se mění s teplotou. Charakteristika termistorů je lineární pouze v určitém rozsahu teplot. Relativní změna odporu termistoru je několikrát větší než u kovových vodičů. Termistory se zhotovují ve tvaru destiček, tyčinek a perliček. Pro měření změny odporu se používá můstkového zapojení. Termistor se zapojí do jedné z větví Wheatstoneova můstku napájeného stejnosměrným popř. střídavým proudem. Termistory se vyznačují vysokou citlivostí, malými rozměry a vysokým vlastním odporem. Z hlediska měření teplot při obrábění je hlavním nedostatkem termistorů poměrně malý teplotní rozsah použití (přibližně – 60 až 200 [°C]). Malá setrvačnost termistorů umožňuje stanovení časového průběhu teploty v měřeném místě a jednoho cizího vodiče.

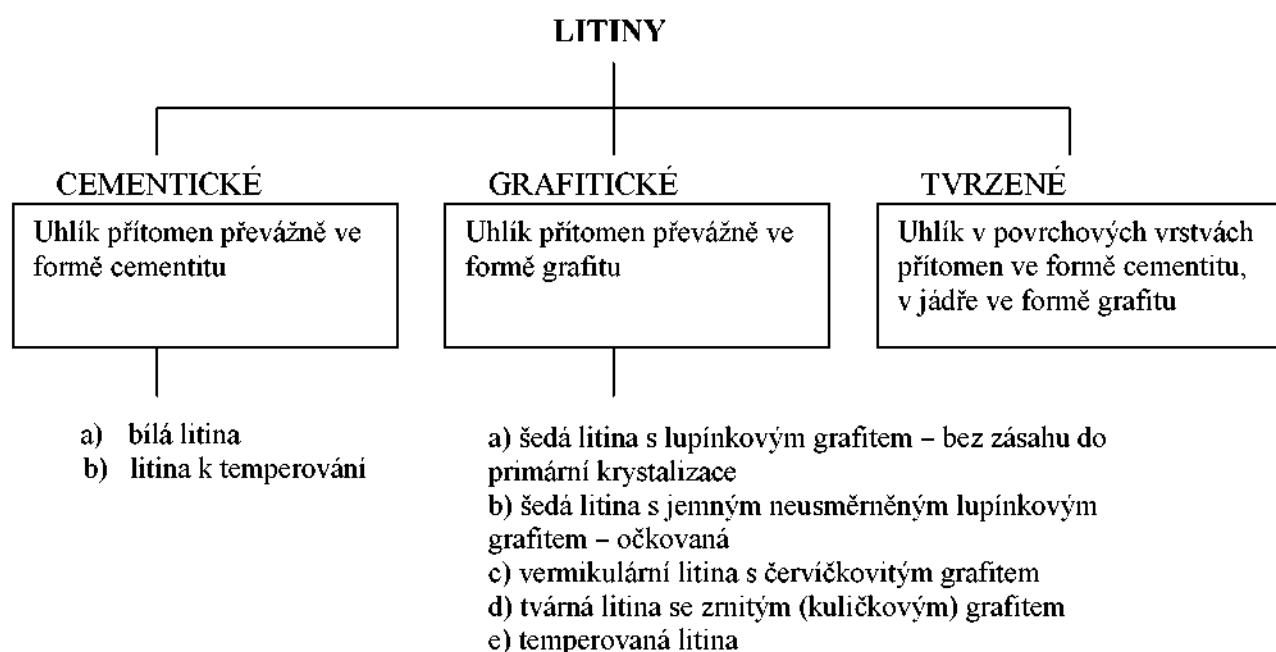
5. OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY

5.1. Litina [31,32,33]

Slitiny železa s uhlíkem, mající vyšší obsah uhlíku než je jeho maximální rozpustnost v austenitu většinou nazýváme surová železa a litiny (výjimku tvoří ledeburitické oceli). Ve srovnání s oceli obsahují litiny více uhlíku a současně i více doprovodných prvků(manganu, křemíku, fosforu, síry).

Základní rozdělení litin je určeno způsobem krystalizace.

Schématické rozdělení litin.



5.1.1. Tvárná litina

Tvárná litina je materiál, v němž jsou spojeny dobré slévárenské vlastnosti litiny s dobrými mechanickými vlastnostmi oceli. Je poměrně pevná v tahu, má vysoký poměr meze průtažnosti k mezi pevnosti a dostatečné plastické vlastnosti. Používá se jí převážně jako konstrukčního materiálu.

Grafit je ve tvárné litině vyloučen ve formě zm . Dosahuje se toho očkováním roztaveného kovu cerem nebo hořčíkem. Technologie její výroby je dost obtížná, a proto se tvárná litina vyrábí jen ve specializovaných slévárnách. Obvyklé složení tvárné litiny bývá v těchto rozmezích 3,4 až 3,8 [%] uhlíku, 2,3 až 2,9 [%] křemíku, 0,1 až 0,8 [%] manganu, 0,01 až 0,04 [%] olova, maximálně 0,05 [%] síry a 0,03 až 0,06 [%] hořčíku.

Pevností se tvárná litina blíží oceli, neboť zrnitý tvar grafitu příliš neporušuje základní kovovou hmotu. Významná je také útlumová schopnost tvárné litiny, i když

není tak velká jako u šedé litiny.

Její obrobitelnost je blízká obrobitelnosti oceli, povrch je hladký. Dobrá je tvárnost za studena i za tepla. Dobrá je i odolnost proti korozi a opalu.

Tvárnou litinu lze svařovat jak plamenem, tak i obloukem.

Podle ČSN 420006 se tvárná litina označuje šestimístným číslem se záčíslem 42 23xx.xx. Litina obráběná během experimentu byla **42 2306**, a z tohoto důvodu blíže popíšu pouze její značení.

42 2306 : - 1. dvojčíslí udává třídu normy tj. 42 – značí hutnictví

- 2. dvojčíslí zařazuje jednotlivé materiály do skupin třídy 42

tj. 23 - tvárná litina

- 3. dvojčíslí rozlišuje jednotlivé materiály ve skupině 42 tj. 06 – tvárná litina nelegovaná a další specifické vlastnosti tohoto materiálu viz níže

vlastnosti materiálu 42 2306: tvárná perliticko - feritická litina o vysoké houževnatosti, obtížně svařitelná i obtížně obrobitelná

použití: na odlitky tl. 5 až 100 [mm] namáhané mechanicky a otěrem, dále se například používá pro výrobu klikových a vačkových hřídelů, ozubených kol, válců, pístů, pístních kroužků, atd.

5.2. Konstrukční oceli [31,32,33]

Rozdělení konstrukčních ocelí do skupin je rozděleno podle účelu použití (norma ČSN 42 0074). Vzhledem k obráběné oceli se zaměříme pouze na třídu 12.

5.2.1. Oceli uhlíkové tř. 12

Těchto ocelí se používá většinou zušlechtěných nebo žíhaných, výjimečně i tepelně nezpracovaných. Obsah uhlíku je obvykle až 0,65 [%], z ocelí s větším obsahem uhlíku se vyrábějí méně namáhané pružiny. Pro malou prokalitelnost klesají podstatně mechanické hodnoty těchto ocelí zejména při jejich tepelném zpracování a mají-li větší průřezy. Součásti mohou mít průměr nanejvýš 40 [mm]. Přísadou 0,004 [%] boru se prokalitelnost uhlíkové oceli zvětší přibližně stejně jako přísadou 1 [%] niklu, 0,3 [%] chromu nebo 0,1 [%] molibdenu. Obrábění po zušlechtění je poměrně snadné. Tlustší předměty se kalí do vody, členité součásti do oleje. Velmi tenké součásti se kalí termálně, nebo se zušlechtují izotermicky.

Z důvodu experimentálně obráběného materiálu **12050.1** se při rozebrání

značení zaměřím pouze na něj.

12050.1 : 1. číslo v značce je 1 a označuje tvářenou ocel

2. číslo ve spojení s první označuje třídu oceli tj. 12

3. a 4. číslo mají různý význam podle třídy oceli

5. číslo je pořadové

1. doplňkové číslo určuje stav oceli v závislosti na tepelném zpracování, tj.

1 – normalizační žíhání

vlastnosti materiálu 12050.1: Ušlechtilá uhlíková ocel normalizačně žíhaná na 840 [°C] s obsahem uhlíku až 0,5 [%].

Použití: Hřídele turbokompresorů, čerpadel, těžních strojů, elektromotorů a dynam, větší ozubená kola, šneky, písty turbokompresorů, automobilové klikové hřídele, ojnice, páky řízení, závěsy pružin, čepy. Poznamenejme, že se jedná o tzv. technologický etalon určený k řezným zkouškám.

5.3. Mosaz [31,32,33]

Mosazi patří mezi těžké neželezné kovy a jsou to slitiny mědi a zinku. Zinek je v mědi rozpustný zhruba do 35 [%] a tvoří substituční tuhý roztok α . S rostoucím obsahem zinku se zvyšuje jak pevnost, tak i tažnost slitiny. Mosaz patří mezi konstrukční materiály s velkou odolností proti atmosférické korozi (kromě prostředí čpavku, kde praskají), s dobrou slévateľností, leštitelností a tvářitelností za studena. Tvářitelnost za tepla závisí především na přesném dodržení optimálních parametrů tváření a prudce se snižuje již s nepatrným obsahem olova, síry, bismutu, antimonu a fosforu. Mosazi pro tváření obsahují 58 až 95 [%] mědi a jsou buď homogenní nebo heterogenní.

Druhů mosazi je velké množství, a tak pro ukázkou přiblížím jen některé z nich.

Speciální mosazi obsahují kromě zinku některé další prvky, které jim dávají vynikající mechanické vlastnosti, jsou však pak obvykle hůře slévateľné.

Manganové mosazi patří mezi speciální mosazi a jsou často s přídavkem železa, jsou velmi pevné i za vyšších teplot, při nichž si uchovávají dobré antifrikční vlastnosti.

Křemíkové mosazi obsahují 3 až 4 [%] křemíku. Jsou velmi hutné, odolávají korozi ve vodě a v páře až do 300 [°C]. Dobře se obrábějí, svařují a pájejí, s přídavkem olova jsou dobrým ložiskovým materiálem.

Atd.

Mosazi jsou značené podle ČSN 42 0055 číslem 42 3xxx.xx

Význam značky je následující: 42 – hutnictví

3 – těžké neželezné kovy

4. číslice rozděluje kovy na tvářené (0, 2, 4, 6, 8) a slévárenské (1, 3, 5, 7, 9) a ve spojení s 5. číslicí jejich dvojčíslí určuje skupinu neželezných kovů, příklady tohoto dvojčíslí pro mosazi jsou uvedené v tabulce 2.

6. číslice je pořadové číslo kovu nebo slitiny

1. doplňkové číslo za tečkou je způsob tepelného zpracování

2. doplňkové číslo za tečkou je způsob odlévání odlitků

Tab. 2.: Rozdělení některých druhů mosazi

Dvojčíslí ze 4. a 5. číslice v materiálové značce podle ČSN 42 0055	Skupina kovů
20	tombaky Cu - Zn
22	automatová mosaz Cu – Pb – Zn
23, 24	speciální mosazi Cu – Zn
25	niklové mosazi

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1. Výroba převodníku

Práce byla z praktických důvodů rozdělena do několik etap. Cílem první části experimentu bylo vytvoření převodníku s dosud pro snímače akustické emise nepoužívaným materiálem, což byla PVDF folie. Z důvodu srovnávání vlastností PVDF převodníku s vlastnostmi komerčního snímače byl současně vytvářen snímač s běžně používanou piezokeramikou.

Na PIEZOMETRU (viz obr. 26.) byl změřen d_{33} (piezoelektrický koeficient) PVDF folie a piezokeramiky. PVDF folie měla $d_{33} = -23,2$ [pC/N] a piezokeramika měla $d_{33} = -590$ [pC/N].



Obr. 26. Piezometr (SENZOR 0643)

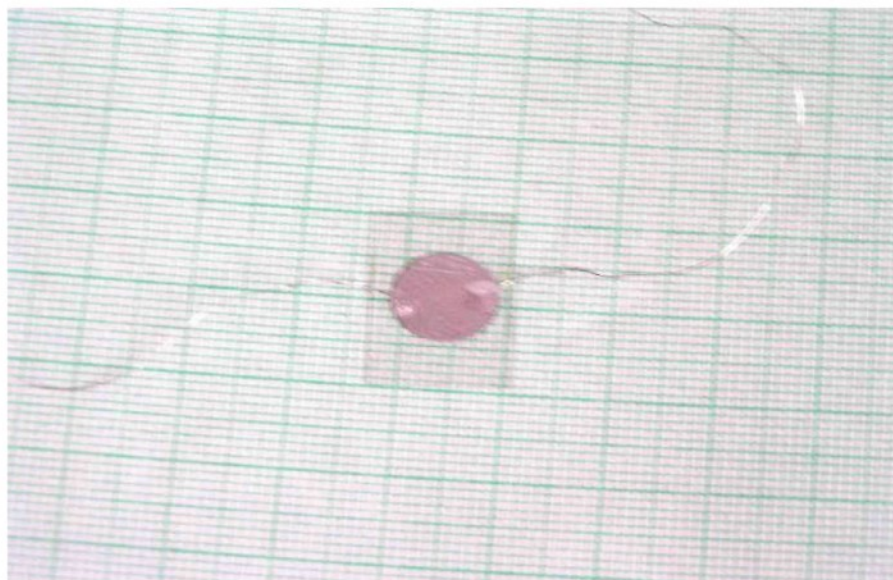
Piezometr je měřicí systém, který poskytuje přesnou metodu pro měření piezoelektrického koeficientu d_{33} . Skládá se ze čtyř částí: provozního generátoru, upínací hlavy, digitálního multimetru a piezo-d kontroléru. Tento přístroj poskytuje hodnoty piezoelektrického koeficientu měřeného ve směru tloušťky vzorků.

Prvním krokem při výrobě převodníku bylo přichystání jednotlivých součástí a pomůcek potřebných pro výrobu snímače, jednalo se o laboratorní sklíčka čtvercového tvaru o straně 2 [cm] a tloušťce 0,13 [mm] dále o čtyři stříbrné drátky, piezokeramický disk (vlastní převodník) o průměru 1cm, PVDF folii také kruhového tvaru o průměru 1 [cm], NITROŘEDIDLO C 600 od firmy SEVEROCHEMA LIBEREC, universální dvousložkové lepidlo LEPOX od firmy PLIVA – LACHEMA A. S. a koloidní stříbro.

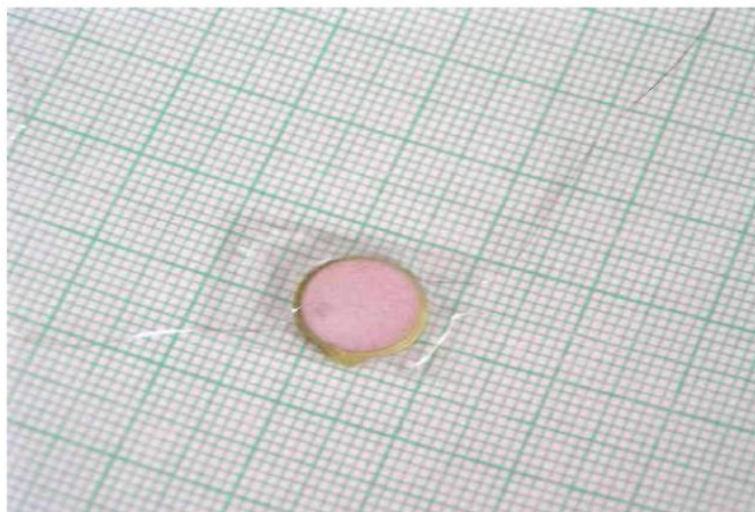
Druhým krokem je vlastní vytváření snímačů. Nejprve byli stříbrné drátky (vývody) spolu s PVDF folií odmaštěny nitroředidlem, poté následovalo jejich zatížení, tak aby

došlo k jejich stabilizaci a zároveň, aby byla malá část odkryta a mohlo tak dojít k přichycení drátku k fólii pomocí důkladně promíchaného koloidního stříbra. Stříbro bylo nanášeno nestříbrným tenkým drátkem. Po uplynutí 1 hodiny došlo k zaschnutí stříbra a následovalo otočení fólie, stejným postupem byl připevněn k fólii i druhý drátek. Pomocí stříhání skla pod proudem tekoucí vody bylo zmenšeno laboratorní sklíčko na tvar obdelníku o rozměrech 1,3 x 2 [cm]. Toto sklíčko bylo osušeno a pomocí nitroředidla odmaštěno. V konečné fázi byla PVDF folie s vývody přilepena pomocí dvousložkového lepidla na připravené sklíčko, zatížena a vytvrzována po dobu 24 hodin. Při lepení fólie na sklíčko se muselo velmi dbát o to, aby se mezi těmito materiály nevytvořili vzduchové bublinky, které by bránily přenosu signálu. Stejným způsobem se vyráběl snímač z piezokeramiky.

Výsledným snímačem první části experimentu, to znamená jak snímači s PVDF fólií (viz obr. 27., 29., 30.), tak snímači s piezokeramikou (viz obr. 28., 29., 30.) byla přeměřena citlivost. Na základě tohoto měření byla zjištěna funkčnost obou snímačů a tudíž možné použití těchto snímačů v další části experimentu.



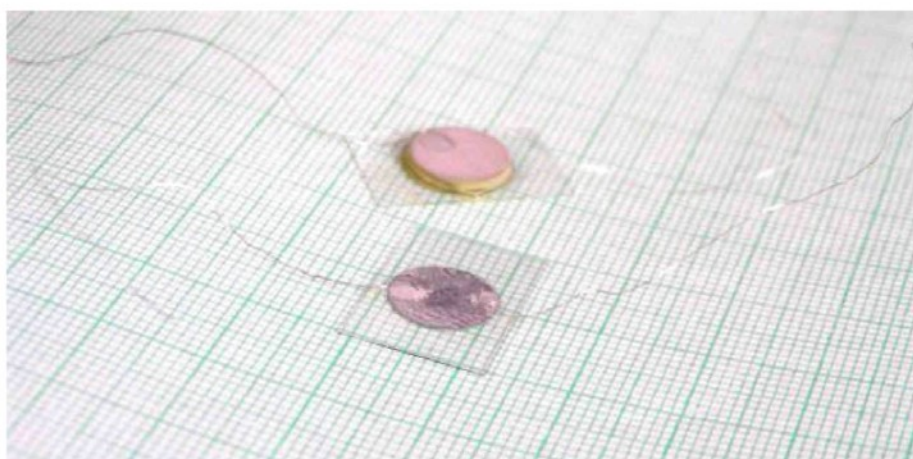
Obr. 27. Snímač z PVDF fólie umístěný na sklíčku a vybavený vývody ze stříbrného drátku



Obr. 28. Snímač s piezokeramikou



Obr. 29. Vzájemné vizuální porovnání snímačů z PVDF fólie a piezokeramiky



Obr. 30. Jiný pohled sloužící ke vzájemnému vizuálnímu porovnání zkonstruovaných snímačů

6.2. Vytvoření experimentálního nože

Cílem druhé části experimentu bylo umístění vytvořených snímačů na soustružnický nůž. Aby bylo možno snáze oba snímače porovnat bylo důležité zajistit jim stejné podmínky při snímání signálu, toho bylo dosaženo umístěním obou snímačů na jeden nůž. Z důvodu co nejmenšího zásahu do homogenity a vyvážení soustružnického nože, které by mohlo při soustružení ovlivnit kvalitu obráběné plochy, byli oba snímače umístěny na zadní část tělesa nože.

6.2.1. Údaje o soustružnickém noži a jeho úpravy důležité pro experiment

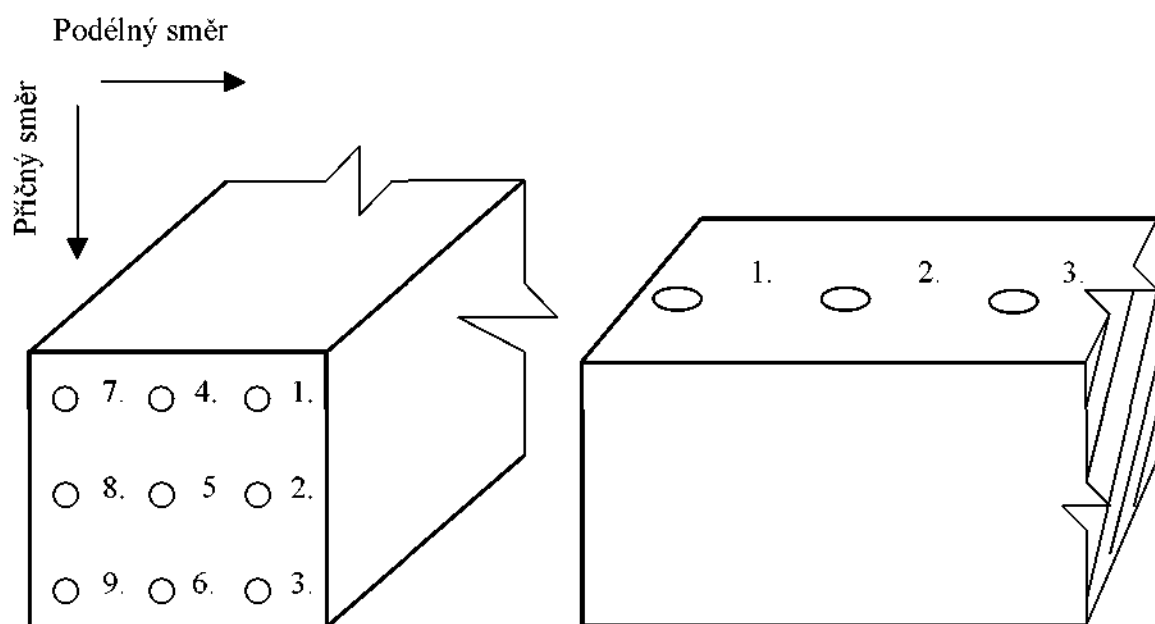
K vlastní konstrukci vestavěného snímače byl použit běžný pravý přímý soustružnický nůž SSBCR 3232 P12-MKT344, který byl upraven tak, aby bylo možné na jeho povrch umístit snímače z první části experimentu. Těleso nože bylo zakaleno na tvrdost HRC 54 (tvrdost podle Rockwella) a vyrobeno z oceli 15 260. Nůž je čtvercového průřez o rozměrech 31,6 x 31,6 [mm].

Prvním krokem s cílem dobrého upevnění snímačů a kvalitního příjmu signálu byl povrch zadní strany a jedné podélné strany zakaleného soustružnického nože přebroušen na drsnost o jakosti 0,7 [μm].

Na broušení byla použita horizontální bruska BPH 320 A od firmy Junker a brusný kotouč A98 60K9 V01 250 x 32 x 76.

Drsnost přeměřené plochy byla zkontrolována pomocí Hommel Tester T500.

Měřená místa na noži jsou zobrazena na obr. 31.



Obr. 31. Zobrazení soustružnického nože s označenými místy, kde byla přeměřována drsnost

Tab. 3.: Tabulka naměřených drsností

MÍSTO MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	HODNOTA PODÉLNĚ MĚŘENÉ DRSNOSTI [Ra]	HODNOTA PŘÍČNĚ MĚŘENÉ DRSNOSTI [Ra]
<i>PODÉLNÁ STRANA NOŽE</i>		
1.	0,06 [μm]	0,10 [μm]
2.	0,04 [μm]	0,13 [μm]
3.	0,03 [μm]	0,09 [μm]
<i>ZADNÍ STRANA NOŽE</i>		
1.	0,04 [μm]	0,05 [μm]
2.	0,04 [μm]	0,06 [μm]
3.	0,04 [μm]	0,07 [μm]
4.	0,03 [μm]	0,06 [μm]
5.	0,04 [μm]	0,06 [μm]
6.	0,03 [μm]	0,07 [μm]
7.	0,05 [μm]	0,06 [μm]
8.	0,04 [μm]	0,06 [μm]
9.	0,04 [μm]	0,07 [μm]

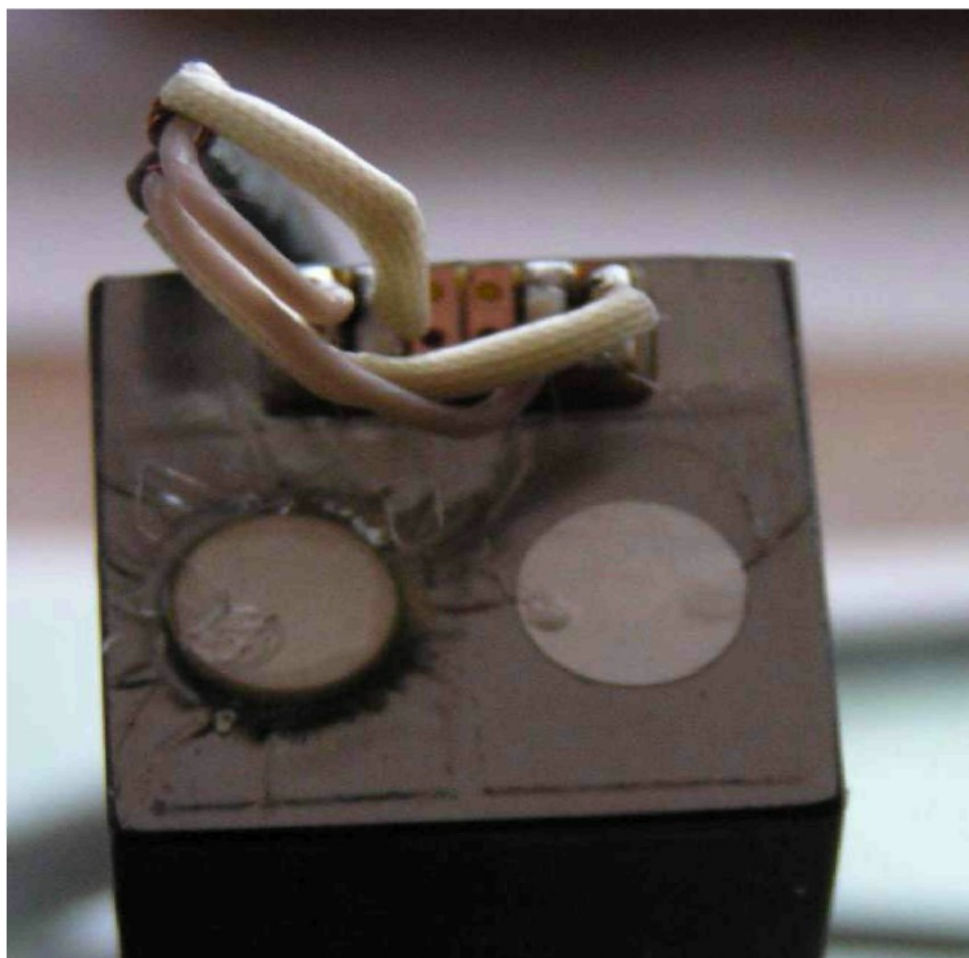
Druhým krokem bylo osazení tělesa nože snímači (viz. obr. 32.). Nejprve se zadní části tělesa nože spolu se spodními stranami obou snímačů odmastili nitroředidlem a pomocí dvousložkového epoxidu byli snímače přilepeny k tělesu

nože, přičemž se muselo opět dbát na to, aby nevznikali ve spoji zbytečné vzduchové bublinky, které by znefunkčnily příjem signálu.

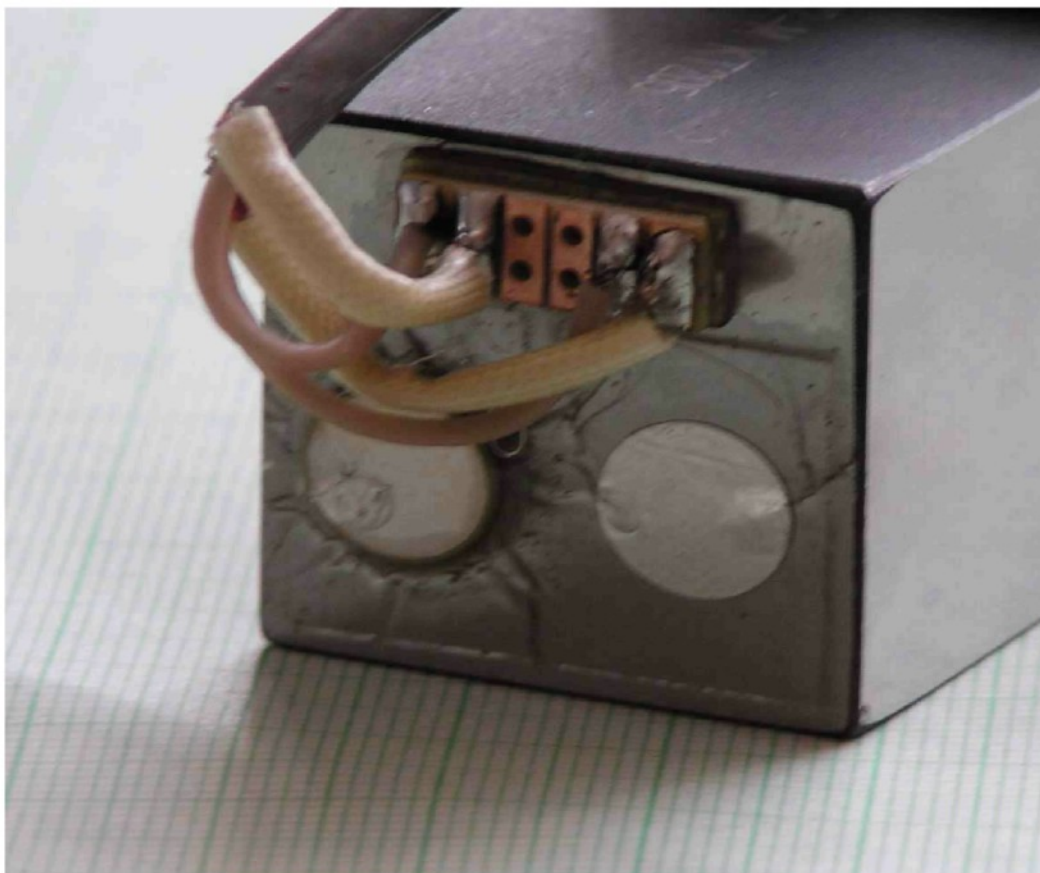
Třetím krokem bylo připevnění univerzálního plošného spoje na zadní část tělesa nože. Univerzální plošný spoj (sběrnice) v tomto případě slouží k převodu tenkých stříbrných vývodů od snímače na pevnější koaxiální kabel, který byl zakončen dvěma koaxiálními koncovkami. Z důvodu zabránění zkratu, který hrozil při protečení cínu skrz plošný spoj na těleso nože, byla mezi těleso nože a univerzální plošný spoj vlepena opět pomocí dvousložkového epoxidu izolační destička z kartitu. Po všech těchto operacích následovalo nezbytné 24 hodinové vytvrzení všech lepených spojů.

Čtvrtým krokem bylo již zmiňované propojení koaxiálních kabelů se stříbrnými vývody na společné sběrnici, toto spojení bylo realizováno pomocí pájeného spoje.

Všechny tyto čtyři kroky jsou zachyceny na obr. 32. a 33.



Obr. 32. Zadní část tělesa experimentálního nože osazená snímači, univerzálním plošným spojem a připájenými kabely.

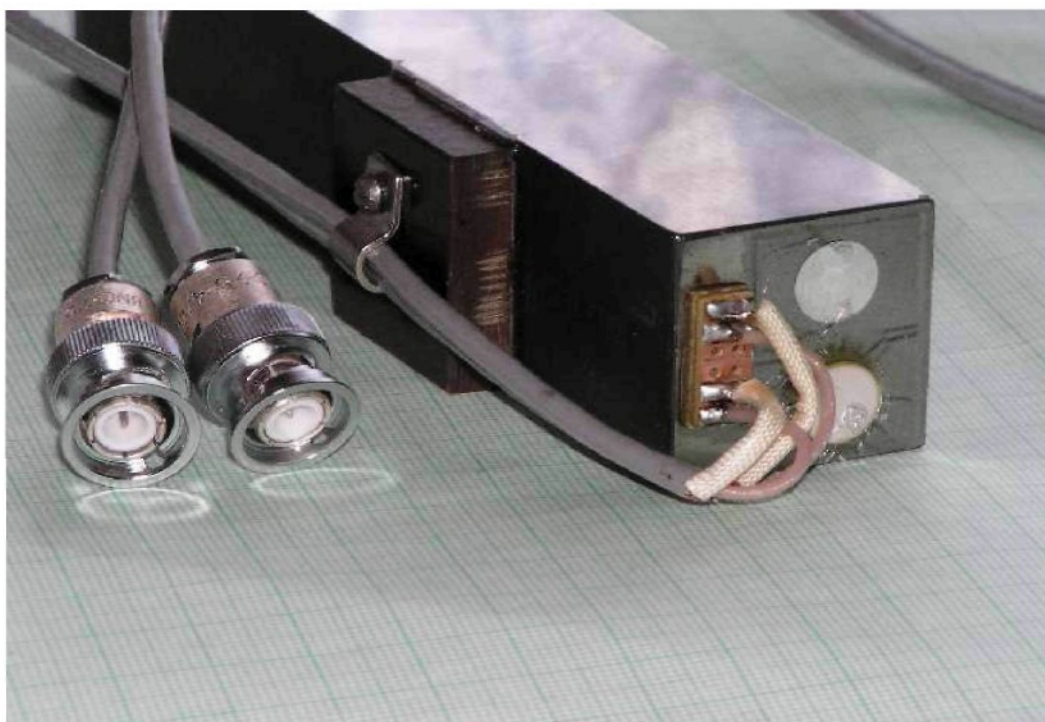


Obr. 33. Druhý pohled na zadní část tělesa experimentálního nože osazená snímači, univerzálním plošným spojem a připájenými kabely

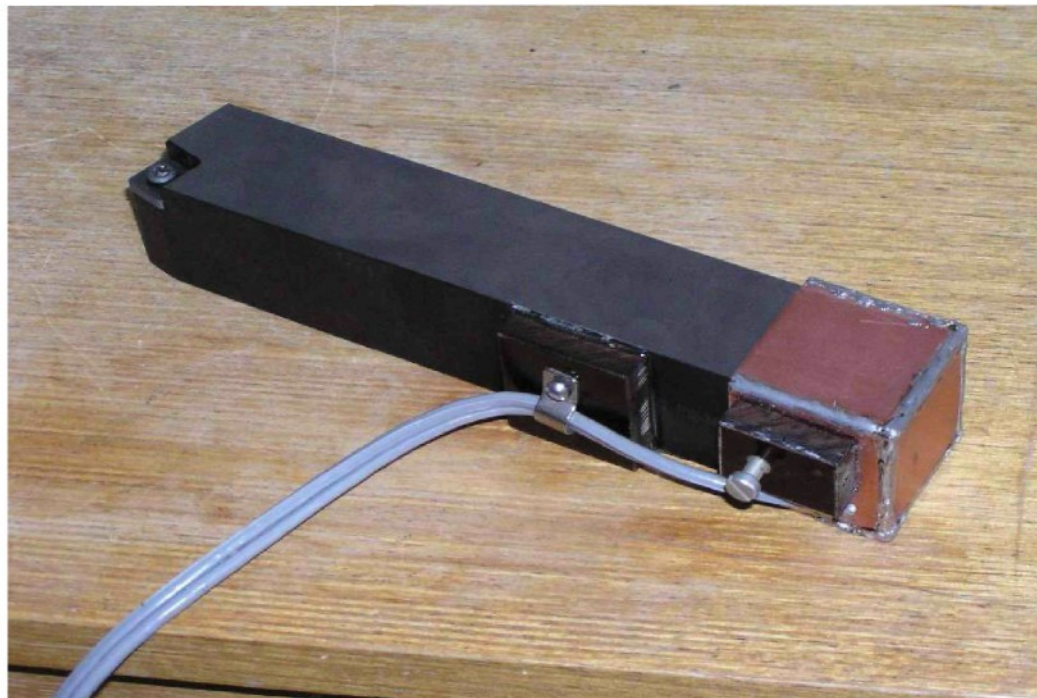
Pátým krokem bylo odstínění elektromagnetického pole okolního prostředí, které narušuje příjem signálu akustické emise. Z tohoto důvodu byla vyrobena plechová krytka na zadní část tělesa nože, které měla převodníky stínit. Krytka byla přilepením dvousložkovým epoxidem opatřena kartitovou destičkou se šroubkem, závit pro šroubek byl vyvrtán jak skrz destičku, tak skrz krytku. Funkcí šroubku je realizovat připevnění krytky k noži, čehož se docílí utažením šroubku.

Šestým krokem bylo z důvodu lepší manipulace s nožem vyrobení kartitové přídržovací destičky pro uchycení kabelů, která byla opět přilepena dvousložkovým epoxidem k boční straně soustružnického nože a vybavena šroubkem. Šroubek připevňoval svorku fixující kabel v požadované poloze k destičce. Přídržovací destička měla zabránit případnému vytržení kabelu v pájeném spoji.

Takto upravený nůž z této přípravné části je zachycen na obr. 34. a 35.



Obr. 34. Experimentální nůž opatřený snímači, kabeláží a přidržovací destičkou



Obr. 35. Celkový pohled na nůž s krytkou a přidržovací destičkou.

6.3. Vliv zatížení a uspořádání PVDF fólie na kvalitě přijímaného signálu

Vzhledem k tomu, že realizace piezoelektrického snímače akustické emise je založena na principu akcelerometru [34], bylo nutné posoudit vliv tlumicí vrstvy, resp. její hmotnosti na frekvenční spektrum a citlivost převodníku. Tím bylo vzato v úvahu konstrukční uspořádání folií a jeho vliv na citlivost.

6.3.1. Citlivost piezoelektrického převodníku

Princip akcelerometru u piezoelektrického snímače akustické emise je schematicky znázorněn na obr. 36. Při určování teoretické odezvy snímače vycházíme ze zjednodušeného předpokladu harmonické mechanické vlny [5]:

Harmonické mechanické buzení s úhlovou frekvencí ω vyvolá zrychlení a tělesa hmotnosti M dané druhou derivací okamžité výchylky:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = -\omega^2 D_0 \sin \omega t = a \quad (1)$$

kde D je okamžitá výchylka a D_0 amplituda kmitu.

Plošné mechanické napětí X aplikované na piezoelektrický element s plochou S při dané zatěžovací hmotnosti M můžeme vyjádřit pomocí:

$$X = \frac{M \cdot a}{S} = M \left(\frac{d^2 D}{dt^2} \right) / S = -(\omega^2 D_0 M / S) \sin \omega t \quad (2)$$

a generované elektrické pole je:

$$E = g \cdot X = -(\omega^2 D_0 M g / S) \sin \omega t. \quad (3)$$

kde g je piezoelektrický napětový koeficient.

Amplituda výstupního napětí U_0 na piezoelektrickém elementu tloušťky h je pak [34]:

$$U_0 = h E_{\max} = \omega^2 D_0 M g h / S. \quad (4)$$

Pro potlačení vlivu vlastní kapacity snímače, která snižuje nejvyšší měřitelnou frekvenci, je vhodnější měření indukovaný náboj v zapojení nakrátko ($E = 0$):

$$Q = d_{33} \cdot X = -(\omega^2 D_0 M d_{33} / S) \sin \omega t, \quad (5)$$

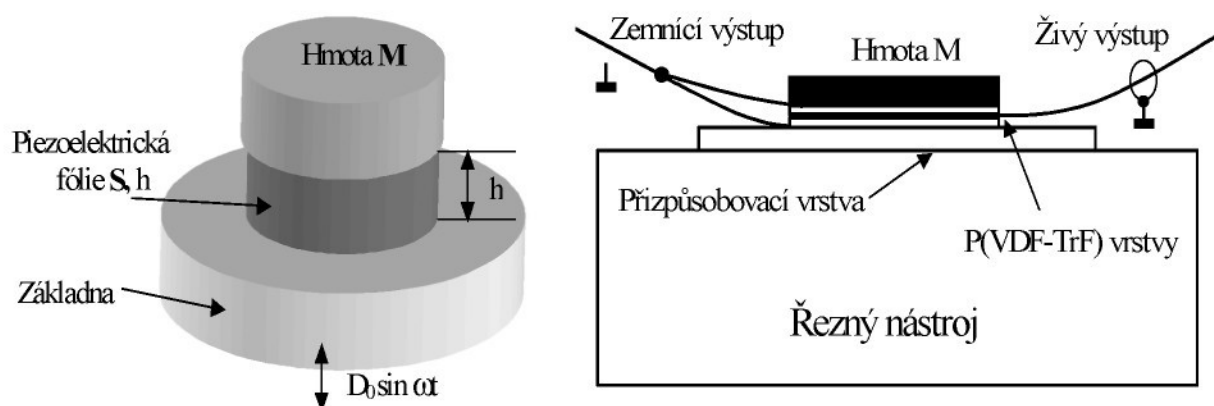
kde d_{33} je piezoelektrický koeficient.

V technické praxi je snadnější měření proudu I :

$$I = \frac{dQ}{dt} = -(\omega^3 D_0 M d_{33} / S) \cos \omega t \quad (6)$$

Amplituda výstupního proudu I_0 na piezoelektrickém elementu je pak:

$$I_0 = \omega^3 D_0 d_{33} M / S \quad (7)$$



Obr. 36. Teoretická a praktická realizace piezoelektrického snímače

6.3.2. Akustické přizpůsobení

Pro akustické impedanční přizpůsobení PVDF fólie ocelovému řeznému nástroji byla opět i v této části experimentu použita skleněná destička, tzv. matching layer. Pro výpočet akustické impedance a vlastní tloušťky přizpůsobovací skleněné destičky jsme užili následujících vztahů [35].

Akustická impedance materiálu Z je definovaná jako součin hustoty ρ a akustické rychlosti v :

$$Z \cong \rho \cdot v \quad (8)$$

Impedance a tloušťka přizpůsobovací mezivrstvy L :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}, \quad L = \frac{c_2}{4f_0}, \quad (9)$$

kde Z_1 je akustická impedance snímaného objektu, Z_2 - akustická impedance přizpůsobovací vrstvy (matching layer), Z_3 – akustická impedance vlastního snímače, c_2 je akustická rychlost v mezivrstvě a f_0 je rezonanční frekvence snímače.

Akustické přizpůsobení senzoru a ocelového řezného nástroje zajišťuje maximální přenos energie a tím i citlivost. Parametry komponent našeho systému jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4.: Vybrané parametry použitých materiálů

Materiál	Akustická impedance Z [$10^6 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Rychlost šíření podélných vln c [m/s]	Hustota ρ [kg/m^3]	Piezoelektrický koeficient d_{33} [pC/N]
Piezokeramika	31	4100	7500	602 ± 3
PVDF ^[34]	4,2	2300	1790	
Sklo ^[34]	13	2200	5900	---
Ocel ^[34]	46	5900	7800	---

6.3.3. Vlastní experiment

Testování citlivosti a odezvy snímačů byla prováděna na kovové desce s danou tloušťkovou rezonancí prostřednictvím pentestu, tzv. lomu tuhy mikrotužky. K lomu se používala tuha průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB.

Experiment navržený pro posouzení snímaných spekter frekvencí byl proveden na několika rozličných převodnících. Výsledky pentestu jsou zobrazeny na obr. 37. - 40. pořízených rychlou Furierovou transformací dostupnou v běžném programovém vybavení. Použité převodníky se vyznačují poměrně výrazným a širokým rozsahem

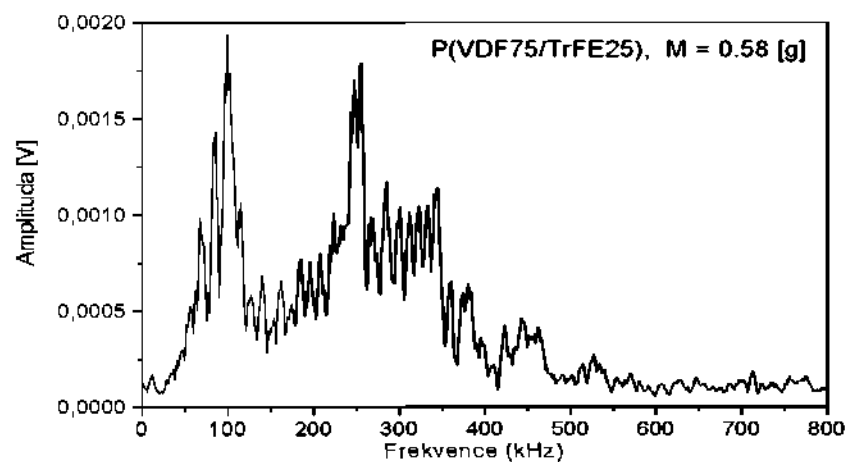
registrovaných frekvenčních pásem do 500 [kHz], přičemž vyšší odezvu lze pozorovat do frekvence 250 [kHz].

V závislosti na zatěžovací hmotnosti M dochází k posuvu získaného frekvenčního pásma, podle očekávání s rostoucí zatěžovací hmotností klesá dolní frekvence získaného frekvenčního pásma. Při vyšších použitých hmotnostech vzrostla citlivost i ve středních frekvencích akustické emise (oblast kolem 450 [kHz]). Pro případ minimální nebo nulové zátěžové hmotnosti je odezva v daném pásmu minimální.

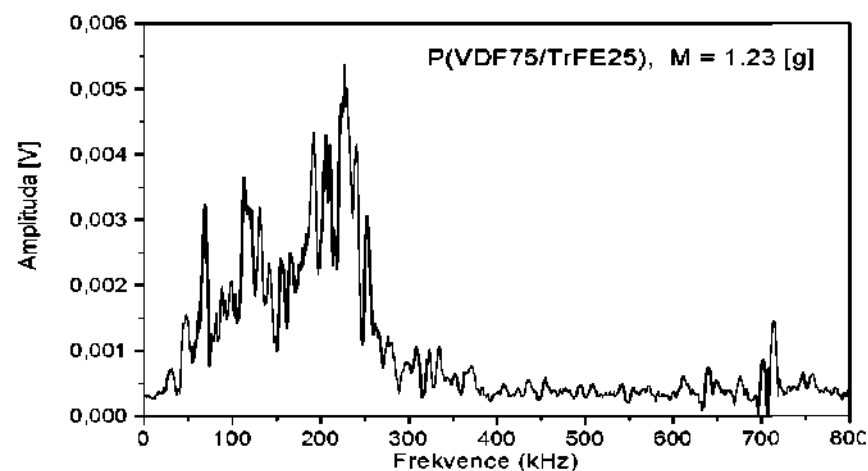
Byl pozorován nárůst amplitudy v oblasti 700 [kHz] zejména pro střední zatěžovací hmotnost. Tato úzká frekvenční oblast je pravděpodobně rezonanční a je způsobena rozměrovou shodou vlnové délky povrchové vlny a velikostí vlastního piezoelektrického elementu převodníku.

Frekvenční charakteristika převodníku s minimální zatěžovací hmotností se odlišuje od charakteristik s vyššími zatěžovacími hmotnostmi konkávním průběhem se dvěma maximy, viz. obr. 37. Tento odlišný průběh by mohl být pravděpodobně způsoben přítomností vzduchové bubliny, která zvyšuje akustický odpor, tedy průchodnost zvuku mezi vrstvami převodníku. Vznik vzduchové bubliny je způsoben nedokonalou technologií přípravy a vytvrzení epoxidové vrstvy.

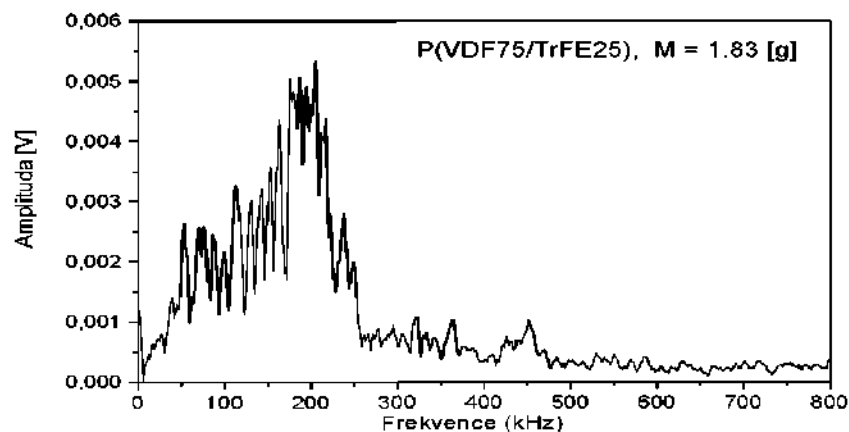
V případě převodníku zhotoveného z PZT keramiky, viz. obr. 40., bylo získáno obdobné frekvenční spektrum. Vzhledem k výrazně větší velikosti hodnoty piezoelektrického koeficientu d_{33} piezokeramiky je i citlivost daného převodníku vyšší.



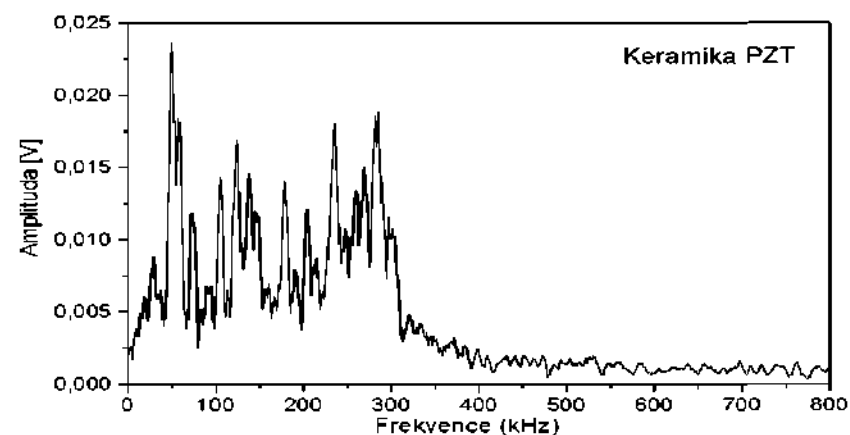
Obr. 37. Vyhlazené frekvenční spektrum převodníku z PVDF folie s minimální zatěžovací hmotností $M = 0.58$ [g]



Obr. 38. Vyhlazené frekvenční spektrum převodníku z PVDF folie se střední zatěžovací hmotností $M = 1.23$ [g]

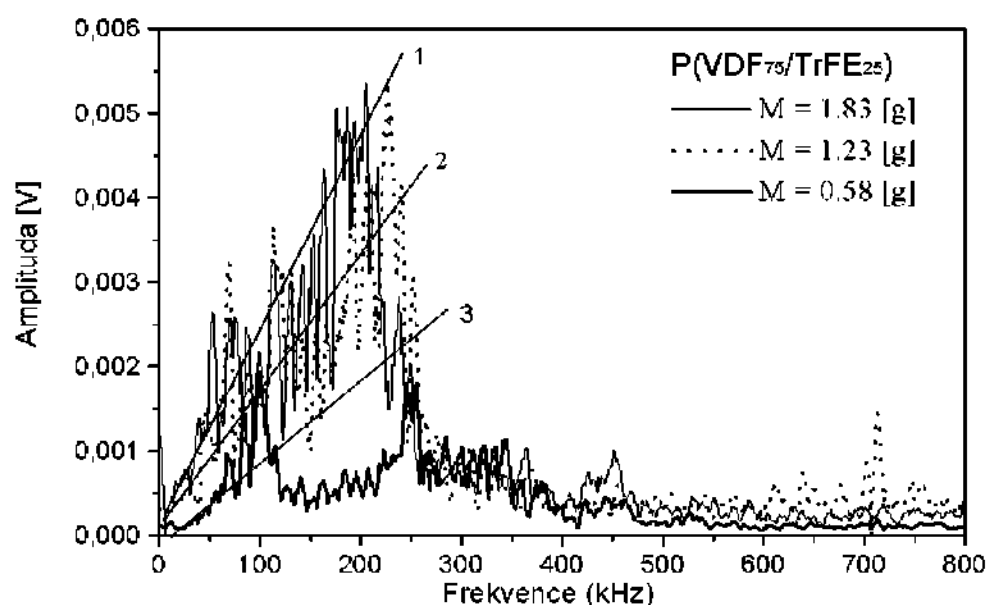


Obr. 39. Vyhlazené frekvenční spektrum převodníku z PVDF folie s maximální zatěžovací hmotností $M = 1.83$ [g]



Obr. 40. Vyhlazené frekvenční spektrum převodníku z piezokeramiky

Pro lepší názornost vlivu zatěžovací hmotnosti M na průběh frekvenční charakteristiky foliového převodníku jsou jednotlivá spektra zakreslena do obr. 41. Lze pozorovat, že s rostoucí hmotností klesá citlivost na dolní hraně frekvenčního spektra. Toto chování je plně v souladu s teoretickými předpoklady uvedenými v matematickém vztahu 6.



Obr.41. Vliv zatěžovací hmotnosti M na náběhovou hranu frekvenčního spektra

6.3.4. Porovnání převodníků vlastní konstrukce s komerčními snímači

V další fázi experimentu bylo potřeba porovnat charakteristiky převodníků s PVDF fólie s charakteristikami běžných komerčně dostupných snímačů. K tomuto účelu bylo vybráno několik komerčních snímačů. Výrobci použitých snímačů jsou jak renomované firmy, tak i výrobci na trhu doposud méně známí. Snímače byly označeny následujícím způsobem:

- A komerční snímač prvního výrobce
- B1 a B2 značí dva rozdílné snímače druhého výrobce
- C komerční snímač třetího výrobce
- D komerční snímač čtvrtého výrobce

Frekvenční charakteristiky byly získávány stejnou experimentální metodikou jako v části předcházející. Důvodem k porovnání charakteristik komerčních snímačů s navrženými převodníky je určit jestli navržená koncepce konstrukce foliových snímačů vyniká předpokládanými přednostmi (široké spektrální pásmo převodníku),

popřípadě je nositelem nežádoucích nedostatků. Výsledky Furierovou transformací jsou zaneseny do obr. 42 - 46.

Sonda A se projevila jako nejhorší z celého testovaného souboru komerčních snímačů, viz obr. 42., přestože se jedná o snímač s nejsilnějším signálem. Získané frekvenční pásmo je velice úzké a to v rozsahu 30 – 50 [kHz], z tohoto důvodu je snímač nevhodný pro účely monitorizace signálu akustické emise.

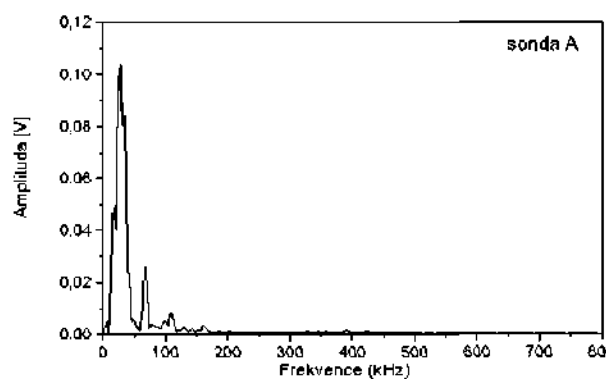
Ve spektrální charakteristice sond B1 (obr. 43) a B2 (obr. 44) lze vypořizovat tři zřetelná frekvenční pásma, která jsou oddělená. Přestože snímač B1 byl poměrně citlivý (dvojnásobně než snímač B2) a frekvenční pásma obou snímačů byla dostatečně široká, zmíněná selektivnost frekvenčního spektra byla nedostatkem těchto snímačů, tyto nedostatky však mohli vzniknout při montáži vlastního převodníku snímače.

Sonda C se svým poměrně lineárním spektrem se jeví jako nejlepší ze zkoumané série (viz. obr. 45.). Její frekvenční spektrum bylo nejširší tím, že dosahovalo hranici 300 [kHz]. I citlivost snímače byla poměrně dobrá.

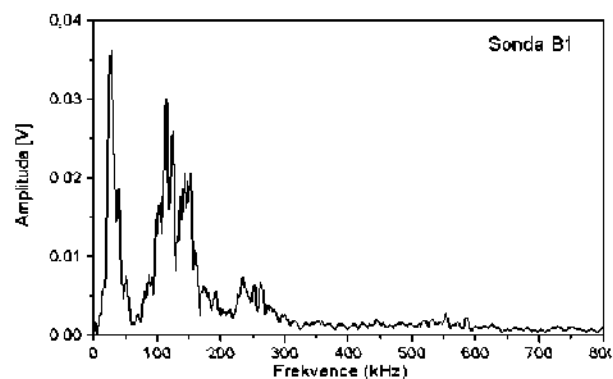
Sonda D (viz. obr. 46.) se vyznačovala relativně lineární charakteristikou frekvenčního spektra v celém pásmu sledovaných frekvencí, které dosahovali pouze 180 [kHz]. Citlivost byla o něco lepší než v případě sondy C.

Charakteristiky převodníků A, B1, B2, C, D se vyznačují v porovnání s převodníky z PVDF fólie 3x až 5x vyšší citlivostí. Frekvenční pásmo převodníku z PVDF fólie se zatěžovací hmotností $M = 0,58$ g je nejširší dosahuje 350 až 480 [kHz]. Převodník na bázi keramiky dosahuje pouze 300 [kHz] a je plně srovnatelný s vlastnostmi snímače C, který lehce předčí.

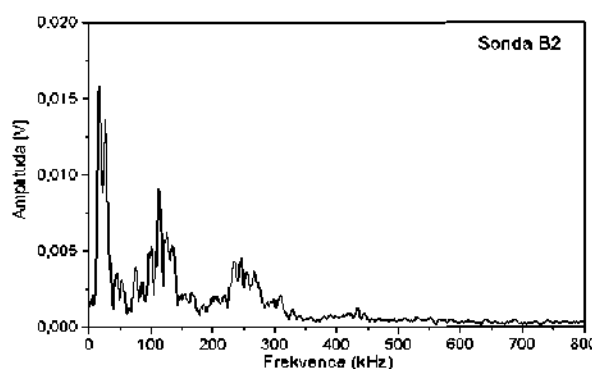
PVDF převodníky se zatěžovací hmotností $M = 1,28$ a $1,83 \approx g$... mají vlastní frekvenční spektra dostatečně široká, širší než většina snímačů komerčních piezokeramických (A, B1, B2 a D). Všechny realizované převodníky akustické emise úspěšně obstojí v porovnání s frekvenční charakteristikou nejlepšího komerčního snímače – C. Jistým nedostatkem je však poměrně nízká úroveň získaného elektrického signálu, tento nedostatek se však dá odstranit vhodným předzesilovačem.



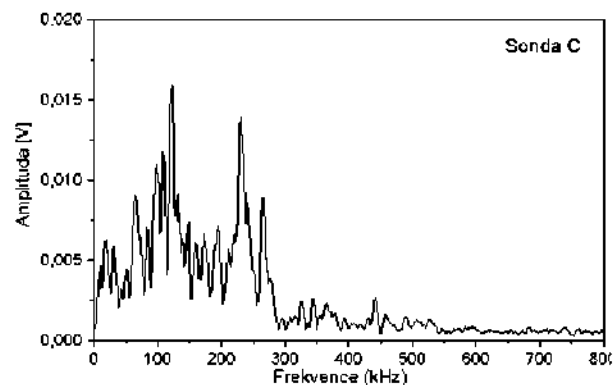
Obr. 42. Vyhlazené frekvenční spektrum snímače akustické emise „A“



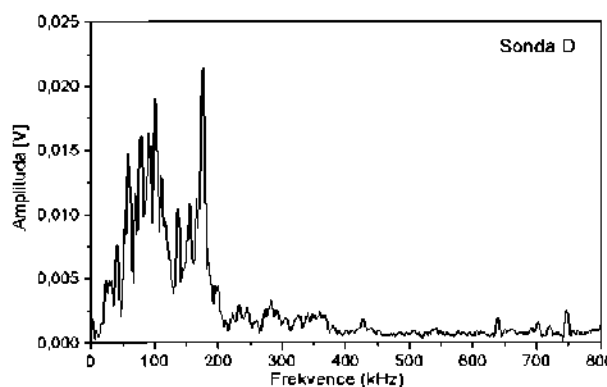
Obr. 43. Vyhlazené frekvenční spektrum snímače akustické emise „B1“



Obr. 44. Vyhlazené frekvenční spektrum snímače akustické emise „B2“



Obr. 45. Vyhlazené frekvenční spektrum snímače akustické emise „C“



Obr. 46. Vyhlazené frekvenční spektrum snímače akustické emise „D“

K této části byl napsán článek k nahlédnutí je v příloze IV.

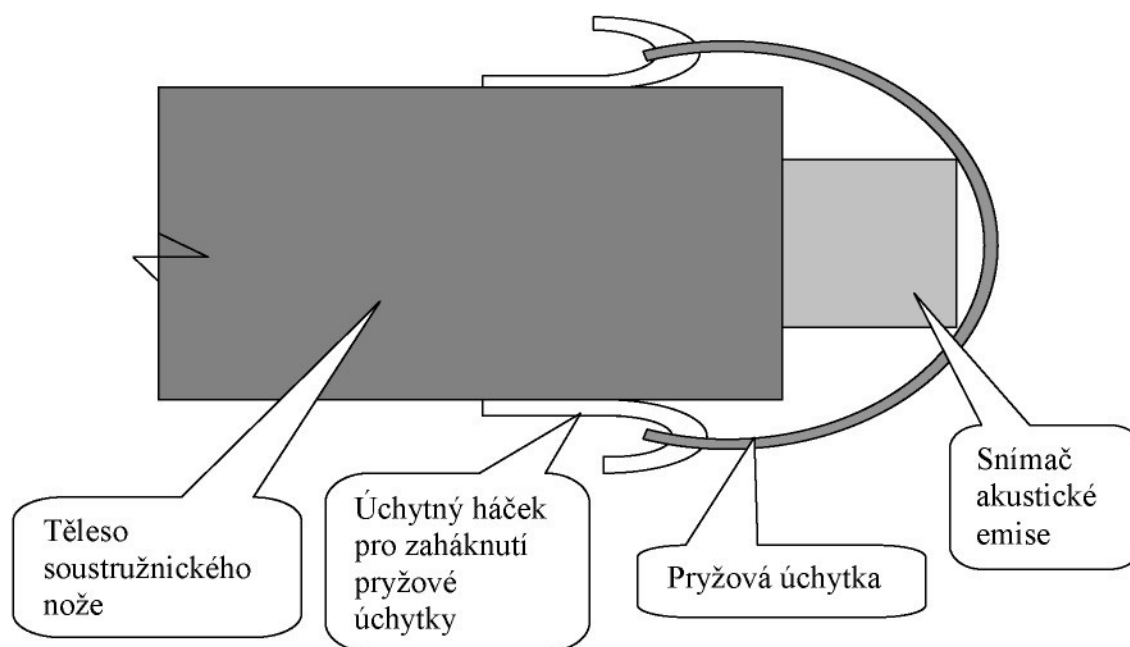
6.4. Vytvoření externích snímačů akustické emise

Hlavním cílem této práce je zabudování snímačů akustické emise do tělesa soustružnického nože. Před zabudováním snímačů do tělesa soustružnického nože je však dobré ověřit funkčnost převodníků akustické emise vytvořením externích snímačů. K doposud zkoumaným materiálům, kterými byli PVDF fólie a piezokeramika, byla přibrána piezokeramická fólie a kompozit.

6.4.1. Konstrukce externích snímačů akustické emise

Prvotním úkolem, který bylo potřeba při tvorbě externích snímačů vyřešit, bylo uchycení a konstrukce externích snímačů.

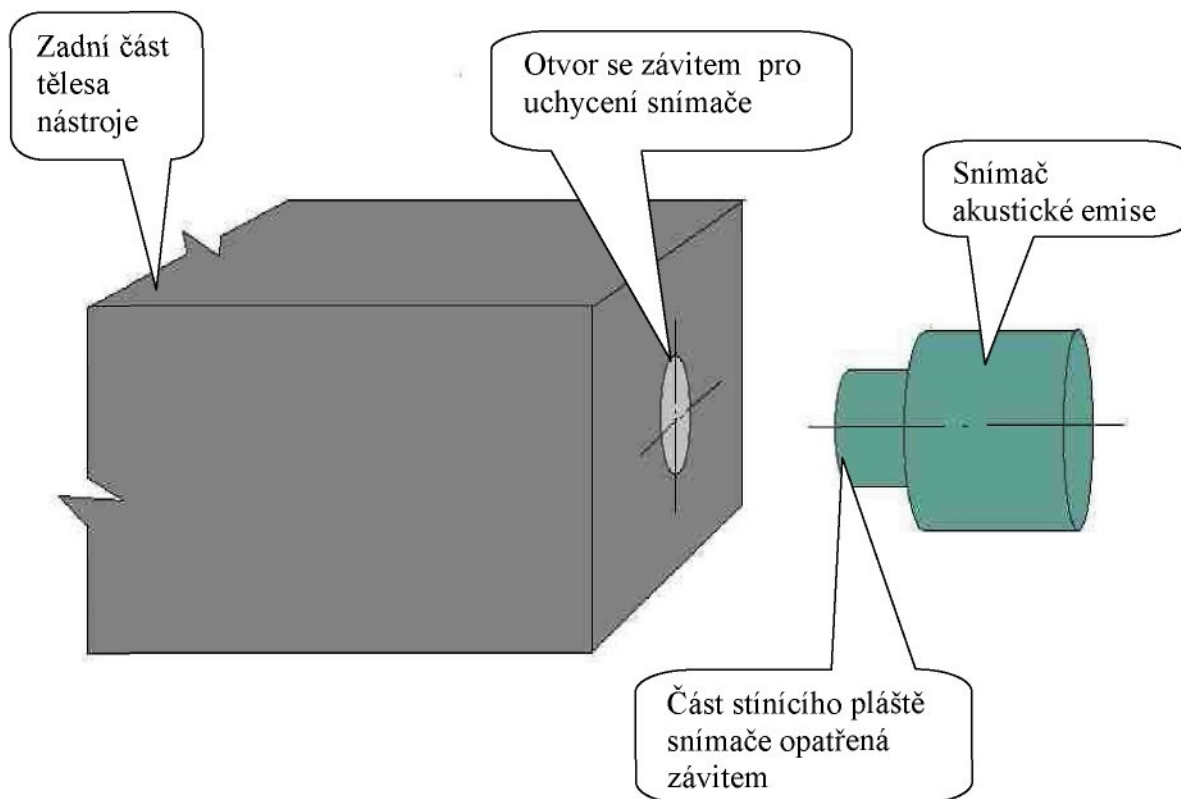
Prvním návrhem bylo vytvoření stínícího pláště snímače s plochým dnem, který by byl uchycen k tělesu nože pomocí pryžové úchytky. Na bocích tělesa nože se přilepí úchytné háčky, které slouží k přichycení pryžové úchytky (viz. obr. 47.). Tento návrh je však vhodný pouze pro experiment a nikoliv pro běžné dílenské podmínky.



Obr. 47. Schématický náčrt uchycení externího snímače akustické emise k soustružnickému noži pomocí pryžové úchytky

Druhým návrhem bylo uchycení snímače na nůž pomocí zašroubování. Představa tohoto uchycení byla taková, že do zadní části tělesa soustružnického nože by se vytvořil závit, a k tomu by se vyrobil odpovídající stínící plášť se závitem

(viz. obr. 48). Spojení by bylo pevné a snímač by byl snadno vyměnitelný. Hlavní nevýhodou spojení by však byla pevná poloha snímače, která by byla závislá na poloze závitu v soustružnickém noži.



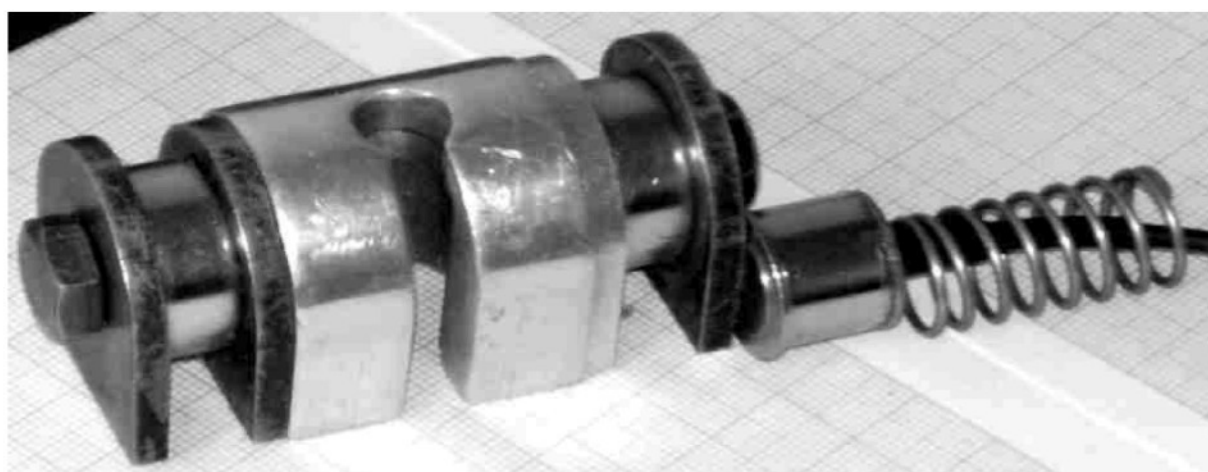
Obr. 48. Schematický náčrt uchycení externího snímače akustické emise k soustružnickému noži pomocí šroubového spoje

Třetím návrhem bylo vytvoření stínícího pláště snímače s plochým dnem, který by byl k zadní části tělesa nože přilepen. Toto provedení je sice pro dílenské použití velmi nepraktické, ale pro experimentální účely (výzkum) je zcela postačující.

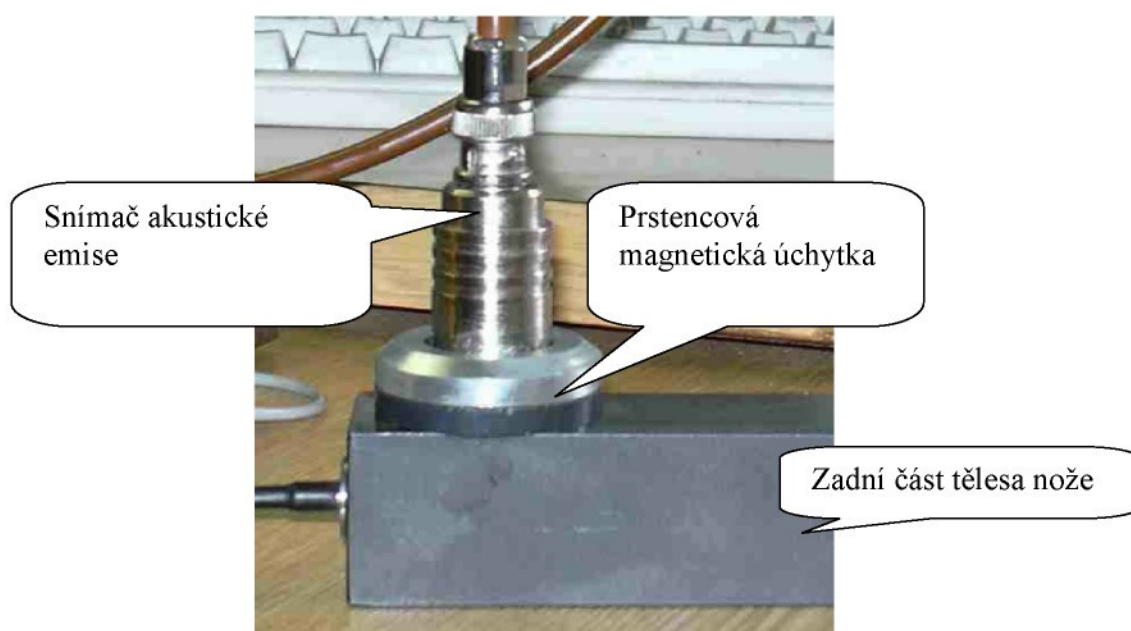
Čtvrtým návrhem bylo vytvoření stínícího pláště snímače s plochým dnem, který by byl k tělesu nože přichycen magnetickou úchytkou (viz. obr. 49.-51.). Hlavní výhodou uchycení je libovolná volba polohy umístění snímače k tělesu nože a to bez zásahu do jeho konstrukce. Jedna z možných nevýhod tohoto uchycení by se mohla projevit až při samotném obrábění a to přichytáváním třísek na magnetickou úchytku. Tento návrh se však i přes uvedený nedostatek jevil z konstrukčního, ekonomického a manipulačního hlediska jako nejlepší a z tohoto důvodu byl i nakonec vybrán.



Obr. 49. Prstencová magnetická úchytka



Obr. 50. Magnetická úchytka s přitlačnou pružinou a externím snímačem



Obr. 51. Uchycení externího snímače k soustružnickému noži pomocí magnetické prstencové úchytky

Další úkol jenž bylo potřeba vyřešit, bylo vnitřní uspořádání snímače. Na základě předcházejících experimentů bylo zjištěno, že pokud má převodník akustické emise fungovat musí být zatížen. Přicházejí v úvahu dvě varianty zatížení převodníku a to přitlačná síla na převodník vyvozena hmotností zátěže a nebo je přitlačná síla vyvozena silou přitlačné pružiny, obě tyto varianty byly u vytvořených externích snímačů akustické emise použity.

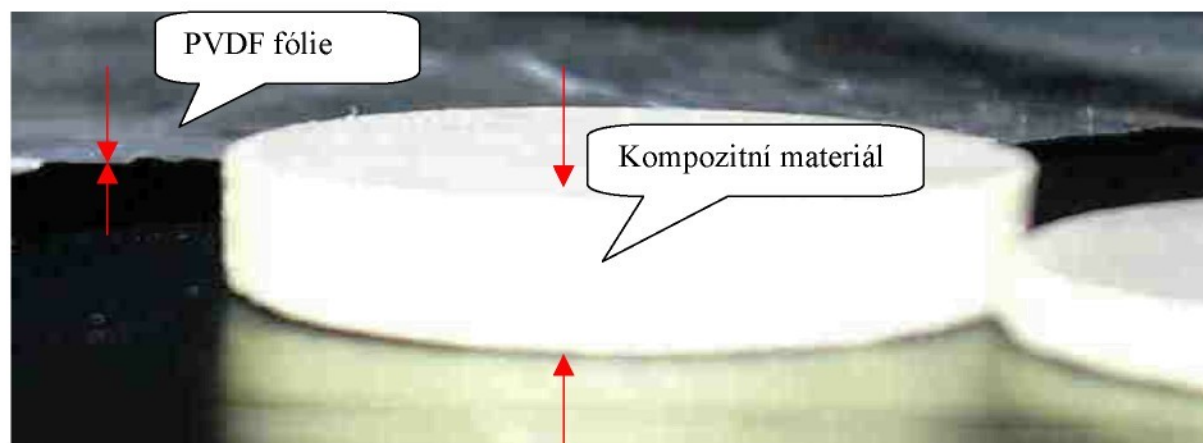
Pro dobrý přenos dat je potřeba předzesilovač. Ten může být buď interní (zabudován ve snímači) a nebo externí.

6.4.2 Technické parametry použitého kompozitu

V další části experimentu byl použit kompozit vyrobený katedrou fyziky TU v Liberci. Z devíti obdržených vzorků (viz. obr. 52-53) různých parametrů byly vybrány dva pro výrobu externích snímačů akustické emise. Tyto dva vzorky byly především vybrány z důvodu přibližně stejného průměru disku jako má piezokeramický materiál (10 [mm]).



Obr. 52. Ukázka šesti vzorků kompozitního materiálu o průměru disku 10 [mm] a různé tloušťce



Obr. 53. Vzájemné porovnání tloušťky kompozitního materiálu a PVDF fólie

Tab. 5: Vybrané parametry kompozitního převodníku vzorku číslo 1 a 2

Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Průměr [mm]	d_{33} [pC/N]	C_0 [pF]	ϵ_r [1]
1	1,27	10,14	5,3	9,5	16,87
2	1,3	10,2	5,1	9,4	16,89

d_{33}piezoelektrický koeficient

ϵ_r relativní permitivita

C_0kapacita převodníku

6.4.3. Přehled vytvořených externích snímačů

Ve snímači označeném jako **01** byla převodníkem **PVDF folie** se zátěží **2 [g]** o průměru 10 [mm], kterou byla keramika, převodník se zátěží byl zabudován v pouzdru firmy DAKEL typu DK 15

02.....převodníkem byla **PVDF folie** (viz. obr. 54) se zátěží **3 [g]** o průměru 10 [mm], kterou byl kovový materiál neznámého složení, převodník se zátěží byl zabudován v pouzdru firmy DAKEL typu DK 15, tento snímač v úvodních měřeních neměřil a tudíž byl **2x přepolarizován**. Přepolarizováním by se mělo dosáhnout stejnosměrného uspořádání do té doby chaoticky uspořádaných domén a to do stejného směru jako má pole elektrické. Po prvním přepolarizování snímač stále nereagoval na žádný podmět, avšak po druhém přepolarizování snímačem bylo možno měřit.



Obr. 54. a) PVDF fólie s vývodem a se zátěží, b) Snímač s PVDF fólií těsně před uzavřením do pouzdra firmy DAKEL typu DK 15

03.....převodníkem byl **KOMPOZIT** (viz. obr. 55) číslo 1 s keramickou zátěží **2 [g]** o průměru 10 [mm], převodník se zátěží byl zabudován v pouzdra firmy DAKEL typu DK 15



Obr. 55. Externí snímač akustické emise s kompozitním převodníkem se zátěží, krátce před uzavřením do pouzdra firmy DAKEL typu DK 15

04.....převodníkem byla **PIEZOKERAMIKA** (viz. obr. 56) firmy DAKEL s označením DK 432 se zátěží **2 [g]**, převodník se zátěží byl zabudován v pouzdra firmy DAKEL typu DK 15



Obr. 56. Externí snímač akustické emise s piezokeramickým převodníkem firmy DAKEL s označením DK 432 s keramickou zátěží, krátce před uzavřením do pouzdra firmy DAKEL typu DK 15.

05.....převodníkem byl **KOMPOZIT** číslo 2, jenž byl **přítlačený pružinou** a umístěný v pouzdře VTS 200 firmy DAKEL (viz. obr. 57)

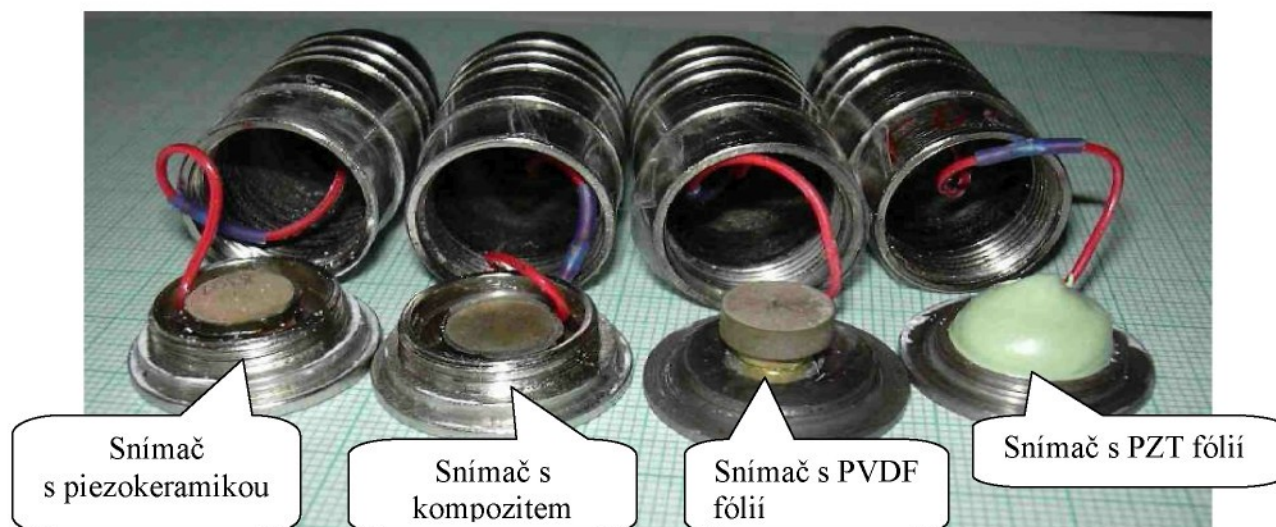


Obr. 57. Pouzdro VTS 200 firmy DAKEL pro snímače s přítlačnou pružinou místo zátěže

Ve snímači označeném **57** byl převodníkem „**troj-sendvič**“ (sériové uspořádání převodníku) **z PVDF folie**, zátěž zde byla **2,6 [g]** a její průměr byl 6 mm, převodník se zátěží byl zabudován v pouzdru firmy DAKEL typu DK 15, fólie byli bez přepolarizace. Tento snímač byl vytvořen až po úvodních měřeních snímačů a to na základě informací, které byli získány při ověřování snímačů 01 a 02. Během měření totiž bylo zjištěno, že riziko protrhnutí fólie při jedné vrstvě je značné a že i když se podaří fólii při výrobě snímače nepoškodit, musíme minimálně fólii dvakrát přepolarizovat, aby vůbec bylo možno s ní něco naměřit. Bylo usouzeno, že riziko protržení se odstraní tím, když na sebe položíme vícero fólií. Dále bylo uvažováno jakým způsobem by se měly fólie na sebe položit a to zda sériově a nebo paralelně, pokud by byly fólie na sebe položeny paralelně, tak by jejich celková kapacita byla daleko vyšší než kapacita jedné fólie, což je nežádoucí. U sériového zapojení zůstává náboj stejný a kapacita se naopak sníží, což je naopak žádoucí.

Ve snímači označeném **F01** byla převodníkem **tenká piezokeramická (PZT) fólie typu 274** o tloušťce 0.2 [mm], průměru 12 [mm], zatížena tlumící směsí epoxidu + oxidu wolframu (viz. obr. 58), převodník s tlumící směsí byl zabudován v pouzdru firmy DAKEL typu DK 15.

F02..... snímačem byla **tenká piezokeramická(PZT) fólie typu 274** o tloušťce 0.2 [mm], průměru 12 [mm], zatížen tlumící směsí epoxidu + oxidu wolframu, převodník se zátěží byl zabudován v pouzdru firmy DAKEL typu DK 15.



Obr. 58. Vizuální srovnání všech vyrobených externích snímačů akustické emise, krátce před jejich uzavřením do pouzdra firmy DAKEL typu DK 15.

Tab. 6 Tabulka parametrů vytvořených externích snímačů akustické emise

DRUH SNÍMAČE	KAPACITA(C) [pF]	$\text{tg } \delta * 10^{-4}$ [1]
01-PVDF FÓLIE	890	199
02-PVDF FÓLIE	877	177
03-KOMPOZIT	14	200
04-KERAMIKA	311	250
05-KOMPOZIT	19	200
57-PVDF FÓLIE	90	13
F01-PZT FÓLIE	14000	215
F02-PZT FÓLIE	14500	211

$\text{tg } \delta$činitel dielektrický ztrát

Činitel dielektrických ztrát byl měřen z důvodu zjištění případného důvodu neměření snímače a taky pro vzájemné porovnání snímačů. Pokud by se například $\text{tg } \delta$ snímače blížila nekonečnu je převodník zkratovaný.

Konečný vzhled některých externích snímačů po montáži do stínícího pláště je zachycen na obr. 59.



Obr. 59. Vizuální porovnání některých externích snímačů akustické emise po zamontování do stínících plášťů.

6.4.4. Laboratorní měření externích snímačů na tělese soustružnického nože pomocí Hsu - Nielsenova zdroje

Všechna měření byla provedena s externím předzesilovačem 32 [dB]. Předzesilovač se snímačem byl propojen pomocí koaxiálního kabelu o kapacitě 7 [pF] a $\tan \delta = 10 \cdot 10^{-4}$ [1]. Zesilovač byl umístěn na kartě XEDO.

Na základě výsledků bakalářské práce slečny Tůmové [4], jež vyhodnocovala, vhodnosti různých mezivrstev mezi snímačem a tělesem, byla použita silikonová vazelína WP 235, která dlouhodobě prokazovala velmi dobré vlastnosti pro snímání akustické emise. V její práci vykazovaly ještě o něco lepší vlastnosti modrá a červená indulona, avšak z důvodu praktického laboratorního využití kdy je snímač dlouhodobě umístěn na sledovaném objektu se upřednostňuje silikonová vazelína, protože je stabilnější v dílenském prostředí (odolnost vůči atmosférickému kyslíku).

Měření bylo realizováno pomocí Hsu - Nielsenova zdroje akustické emise (AE), tj. lomem tuhy mikrotužky tzv. pen testem s tuhou o tvrdosti HB a průměrem

tuhy 0,5 [mm]. Všechna měření byla prováděna přímo na tělese soustružnického nože v blízkosti lůžka pro VBD viz. obr. 60.

Grafické výsledky provedených měření jsou uvedeny v příloze V. V horní levé straně obrázku je záznam frekvenční analýzy odezvy převodníku na Hsu – Nielsenův zdroj akustické emise, v pravé horní straně je průběh Furierovy transformace zaznamenané odezvy a v dolní části obrázku je časový graf countů.

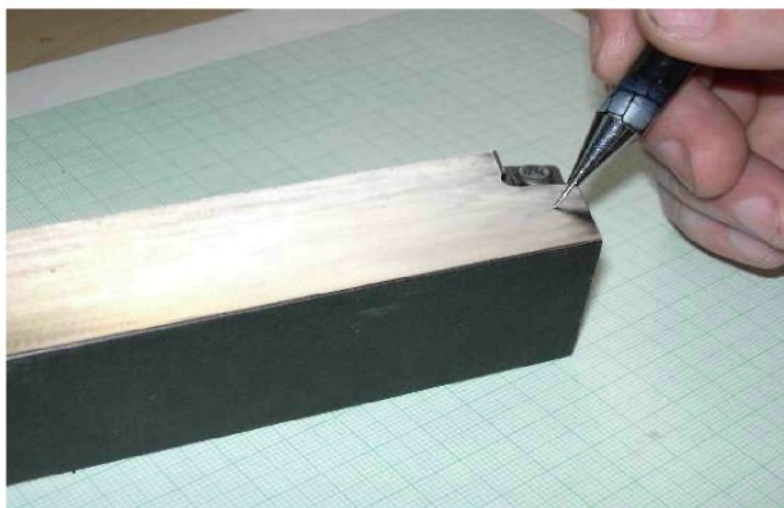
Časový graf countů hodnotí střední kvadratickou úroveň detekovatelného signálu – RMS a počty překmitů přes několik prahových úrovní za stanovený časový interval. Výpočet hodnoty RMS pro celkový počet N hodnot je dán vztahem:

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}},$$

kde hodnota N je $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$.

Systém Daemon vyhodnocuje RMS a počty překmitů přes dvě prahové úrovně Count1 a Count2. Hodnoty Count jsou zobrazovány v měřítku levé logaritmické osy 0 – 10^6 , hodnota RMS v měřítku pravé lineární osy 0 – 1000 [mV]. Osa X není skutečnou časovou osou, hodnoty jsou zobrazovány bod po bodu „po sobě“ a nikoliv proporcionálně vzhledem k času. Dojde-li tedy ke krátkodobému výpadku měření a chybí-li jistý časový úsek, neprojeví se to v grafu žádnou „mezerou“ apod. Časové popisky u hodnot jsou však vždy uváděny správně, v každou celou minutu.

Grafické výsledky jsou uvedeny v pořadí tak jak byla prováděna jednotlivá měření v časové posloupnosti. S politováním je nutno poznamenat, že většina převodníků nevynikala vysokou citlivostí, proto při měření bylo použito různých zesílení tak, aby došlo k registraci signálu AE.



Obr. 60. Ukázka místa lomu tuhy na soustružnickém noži u měření označeném m 01 - m 06, f01 a f02 (viz příloha V.).

Přehled provedených měření

V měření označeném **m 01** je záznam lomu tuhy v blízkosti lůžka pro VBD na horní ploše nože (viz. obr. 60), byl použit **snímač číslo 4 (piezokeramika)**, zesílení bylo **0 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 1.

m 02 – byl použit **snímač číslo 3 (kompozit)**, zesílení bylo **55 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 2.

m 03 - byl použit **snímač číslo 2 (PVDF folie bez přepolarizace)**, toto měření se nakonec neuskutečnilo, neboť **se** snímač ani **nechytl**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 3.

Poznámka: Experimentální ověřování snímačů č. 1 a 2 nebylo realizováno z důvodu nulové citlivosti převodníku. Po bližším prozkoumání důvodu necitlivosti (nefunkčnosti) snímačů bylo zjištěno, že na snímači č. 1 nastal zkrat, byl tedy neopravitelný. Snímač č. 2 byl po konstrukční stránce v pořádku, proto bylo nutné provést další přepolarizace PVDF fólie. Grafický výsledek opraveného snímače č. 2 je uveden v příloze V na obr. 05.

m 04 - byl použit **snímač číslo 5 (kompozit)**, zesílení bylo **50 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 4.

m 05 - byl použit **snímač číslo 2 (PVDF folie)**, zesílení bylo **50 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 5.

m 06 - byl použit **snímač číslo 57 (troj-sendvič PVDF folie)**, zesílení bylo **30 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 6.

m 06b - lom tuhy vedle keramické destičky na horní ploše nože, byl použit **snímač číslo 57 (troj-sendvič PVDF folie)**, zesílení bylo **35 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 7.

f01 – byl použit snímač F01 s **tenkou piezokeramickou (PZT) fólií typu 274**, zesílení bylo **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 8.

f02 – byl použit snímač F02 s **tenkou piezokeramickou (PZT) fólií typu 274**, zesílení bylo **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze V obr. 9.

6.4.5. Výsledky měření externích snímačů akustické emise

Výsledné vlastnosti testovných externích snímačů akustické emise jsou uvedeny v následující tabulce 7.

Tab. 7 Výsledné vlastnosti testovaných externích snímačů akustické emise

Číslo snímače AE	Převodník snímače AE	Vlastnost snímače
1	PVDF fólie	Nefunkční (zkratovaný)
2	PVDF fólie	Málo citlivý, úzkopásmový
3	Kompozit č.1	Málo citlivý, úzkopásmový
4	Piezokeramika	Hodně citlivý, širokopásmový
5	Kompozit č. 2	Poměrně citlivý, širokopásmový
57	Troj-sendvič PVDF fólie	Málo citlivý, širokopásmový
F01	PZT fólie	Málo citlivý, úzkopásmový
F02	PZT fólie	Málo citlivý, úzkopásmový

6.5. Zabudování snímače akustické emise do tělesa soustružnického nože

Po ověření funkčnosti externích snímačů bylo možné přistoupit k vlastnímu zabudování snímače do tělesa soustružnického nože. Na základě předešlých výsledků, kde nejlepší předpoklady pro snímání akustické emise při obrábění jevil snímač s piezokeramickým převodníkem byl nejprve zabudován a testován právě tento převodník. Druhým převodníkem určeným pro zabudování do tělesa nástroje byla PVDF fólie a to hlavně z hlediska výzkumného. Dalším důvodem je neměnné stejnorodé složení oproti kompozitu. Kompozitní převodníky mají vzhledem k jejich laboratorní výrobě odlišné vlastnosti.

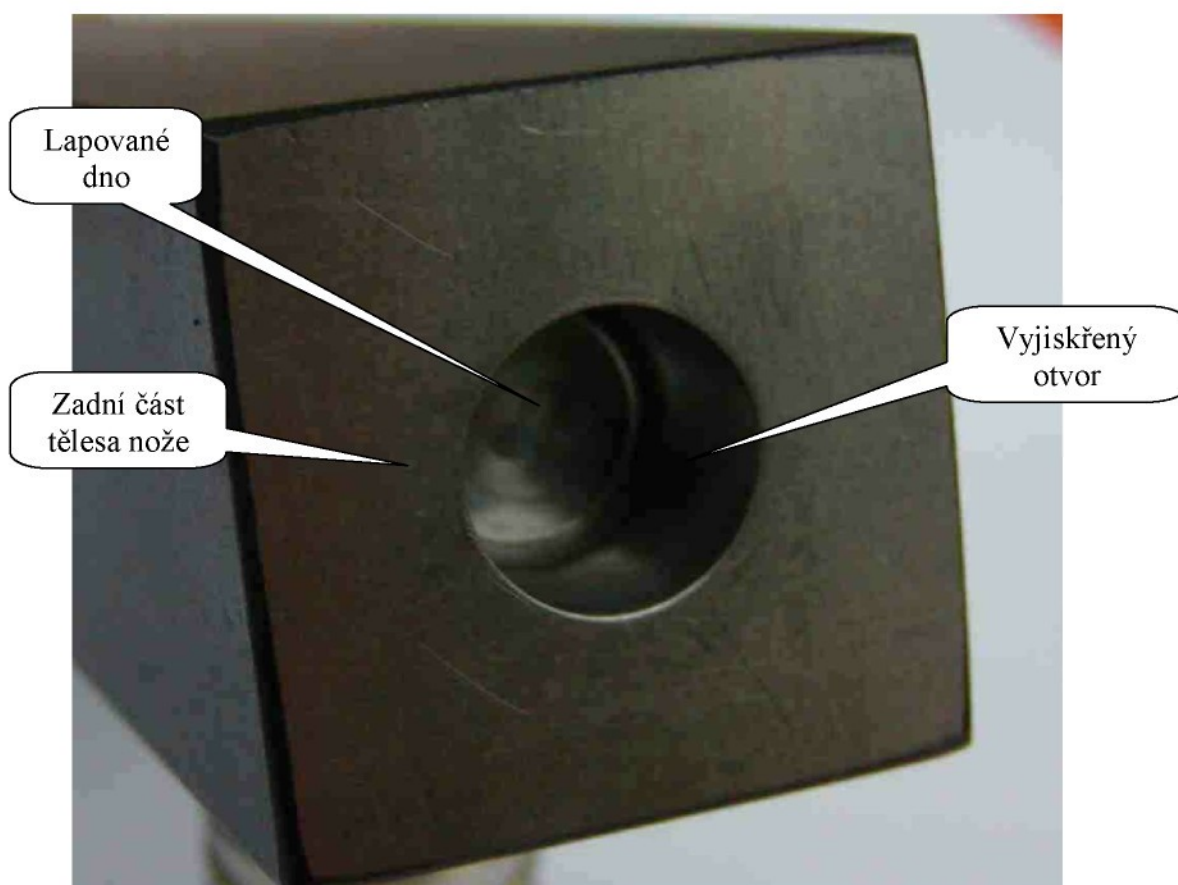
6.5.1. Vlastní koncepce zabudování snímače do nože

Z důvodu co nejmenšího zásahu do tělesa nože byl vybrán převodník o průměru 10 mm, uvažovalo se i o menším průměru, ale vzhledem k už tak velmi malému prostoru pro zabudování snímače se od tohoto záměru upustilo. Dalším úkolem bylo určení místa zabudování snímače do nože. Po přihlédnutí k podmínkám dílenského provozu (překážení kabelů v oblasti tvorby třísky a jejich možnému poškození) a zabránění rizika vzniku vibrací z důvodu snížení tuhosti nože při obrábění, což by vedlo k výrobě nepřesných obrobků, popřípadě zmetků a co

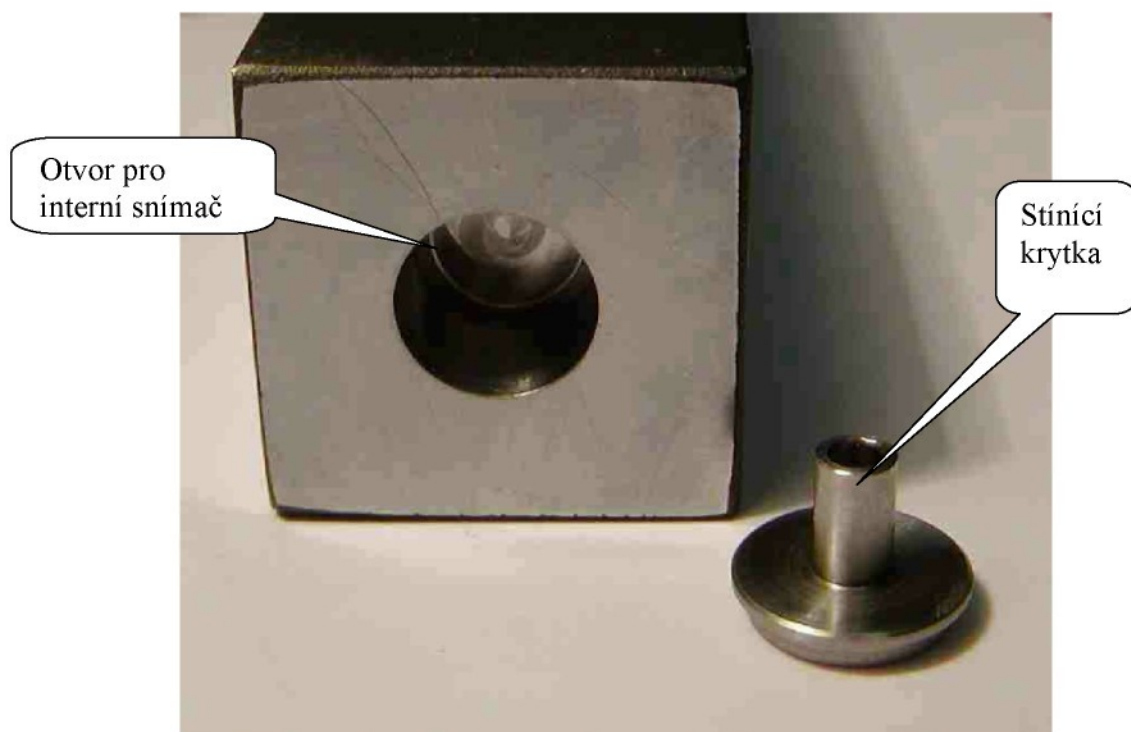
nejlepšího místo pro příjem akustických vln, byla vybrána poloha ve středu jeho zadní strany soustružnického nože.

Otvor do zadní části tělesa nože (viz. obr. 61.) byl vyroben vyjiskřením a pro dosažení drsnosti dna $Ra\ 0,4\ [\mu m]$ byl povrch dna lapován brusnou pastou na bázi diamantového zrna.

Pro elektromagnetické odstínění snímače od okolí byla vyrobena stínící krytka (viz. obr. 62) z nerezové oceli (17 246). Tato krytka měla také fixovat kabeláž (zabránit tak případnému vytržení) a chránit převodník před nežádoucími nečistotami.

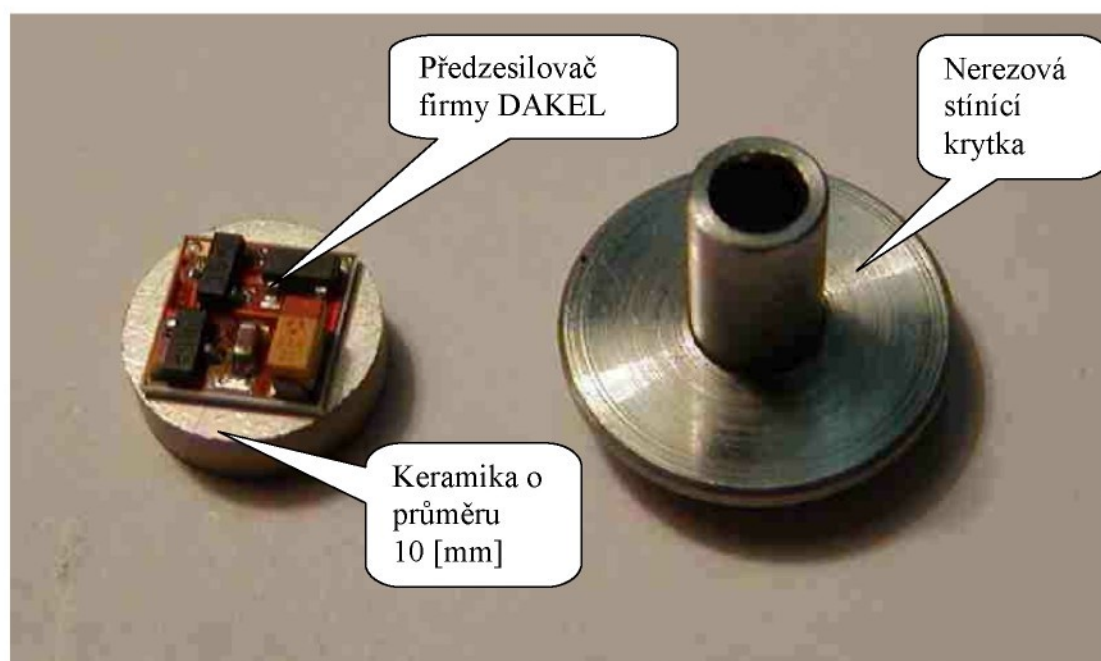


Obr. 61 Detailní pohled na vyjiskřený otvor pro interní snímač akustické emise v tělese nože.

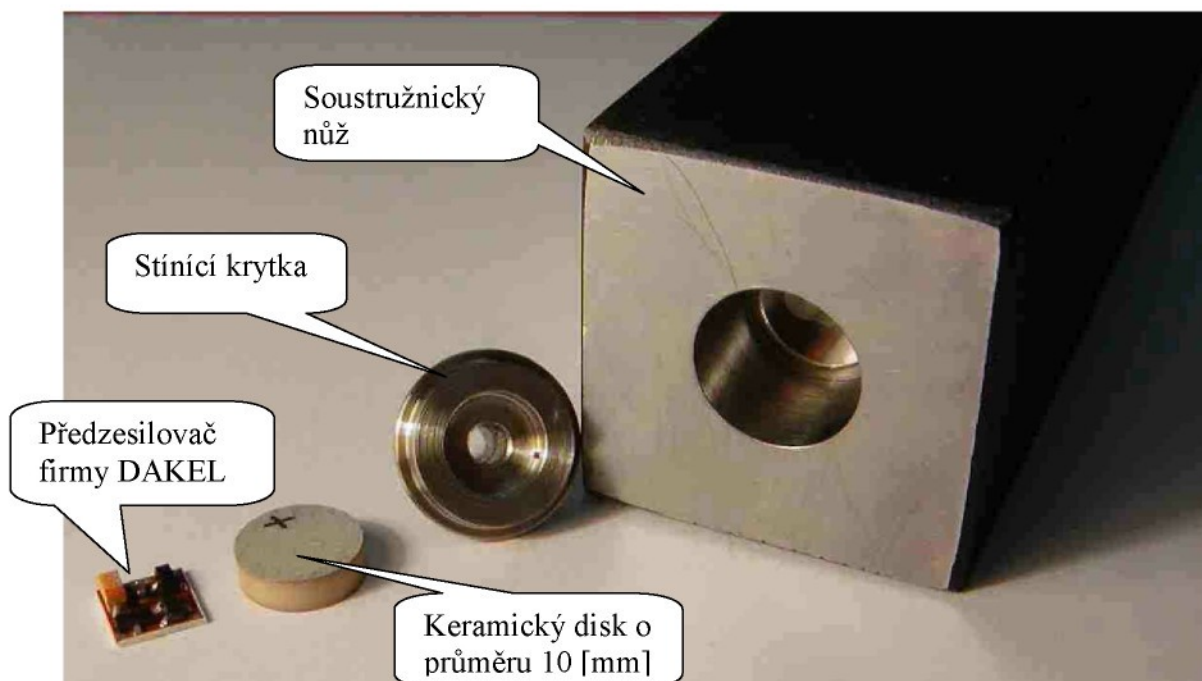


Obr. 62. Otvor v noži pro zabudování snímače a stínící krytka

Do dutiny v tělese soustružnického nože byl umístěn i miniaturní předzesilovač (viz obr. 63, 64) z důvodu zesílení signálu AE a ke zkvalitnění přenosu signálu .



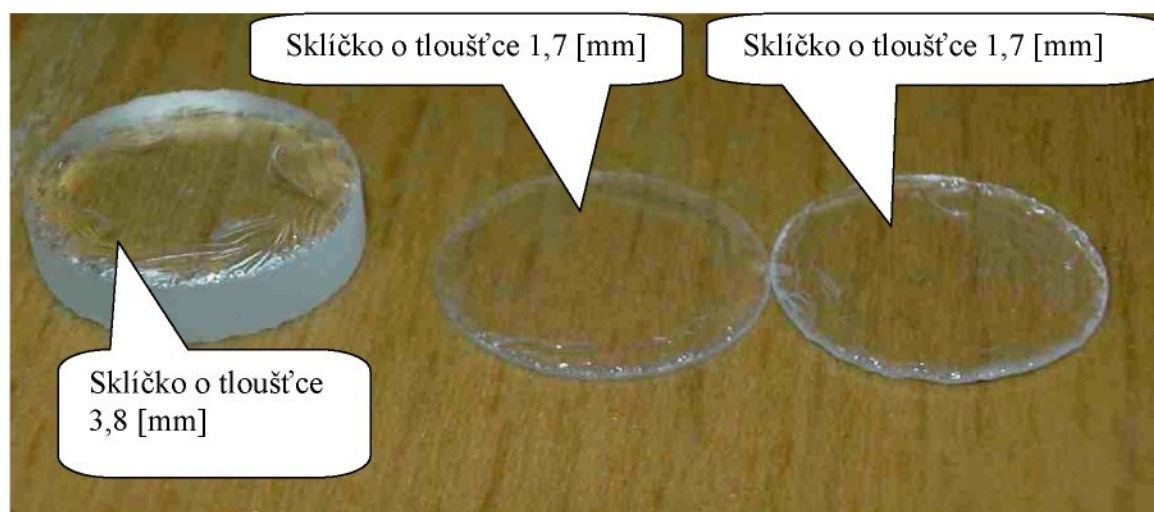
Obr. 63. Vizuální porovnání velikosti krytky, předzesilovače a keramiky



Obr. 64. Vizuální porovnání velikostí nože, stínící krytky, keramického disku a předzesilovače

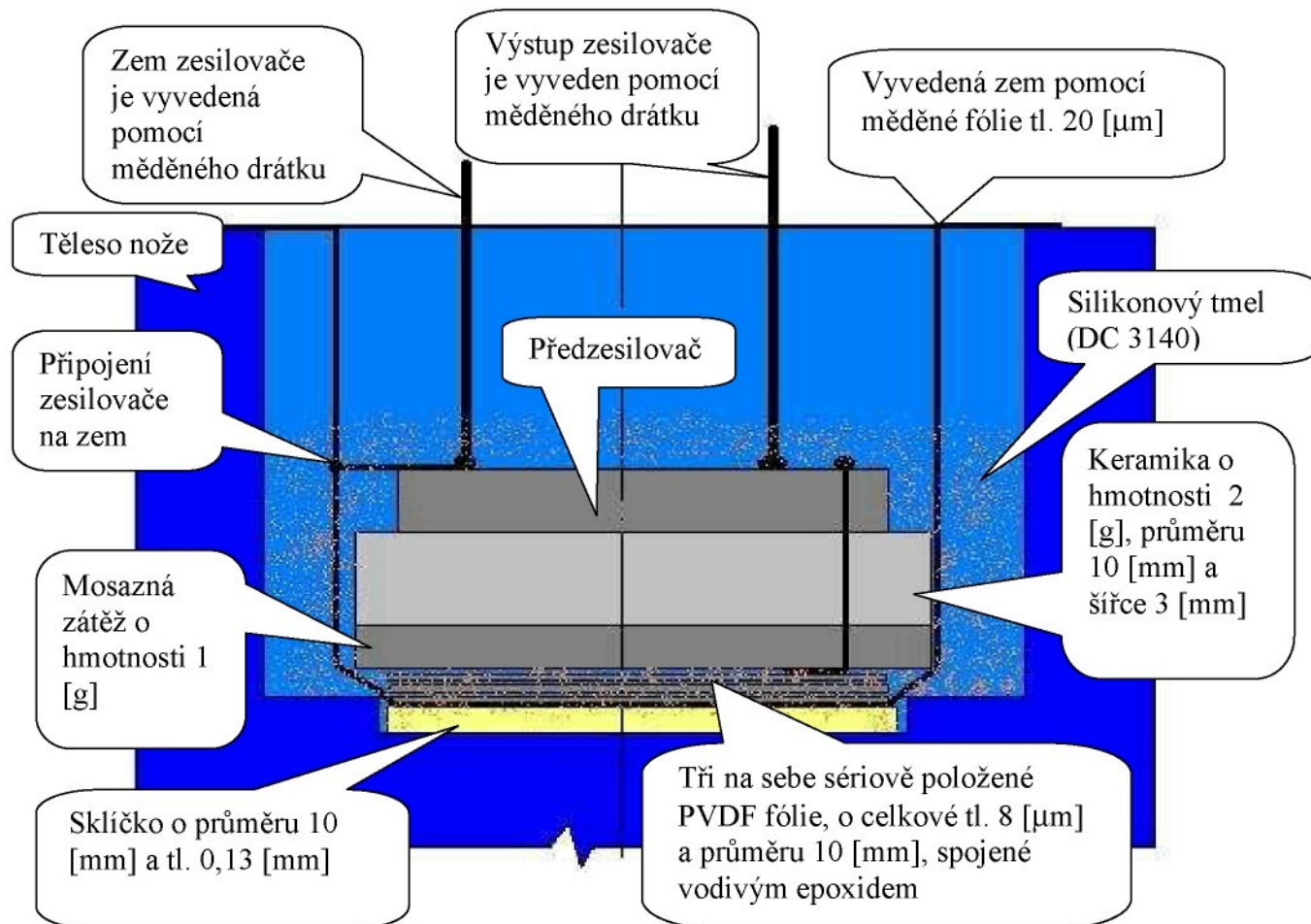
Zapojení a uspořádání interního snímače akustické emise s piezokeramkou je „know how“ firmy DAKEL, a proto zde nebude detailně popsán. Prozradíme aspoň to, že vnitřní uspořádání a zapojení interního snímače je velmi podobné zapojení internímu snímači s PVDF fólií, který je detailně popsán níže.

Dalším úkolem, který bylo potřeba vyřešit bylo nutné odizolování PVDF fólie od tělesa nože, nejvodnější materiálem se jevilo tenké sklíčko. Problém byl však v malém kruhovém otvoru, neboť běžná laboratorní sklíčka, která mají vyhovující tloušťku jsou čtvercová. Původně požadovaný průměr byl 11 [mm] a tloušťka 0,2 [mm]. Výroba sklíčka s takovými parametry je však velmi složitá pro křehkost a malý rozměr sklíčka. Prvním nápadem bylo vyrobit sklíčko pomocí vrtání diamantovým vrtákem na jádro, tato technologie však zcela selhala, neboť sklíčko se po odvrtání zcela rozdrtilo. Pokusili jsme se proto zvýšit tloušťku skla ovšem ani tento pokus nevedl k požadovanému cíli, sklíčko se sice povedlo vyvrtat, ale došlo k jeho poškrábání od vrtacího nástroje (viz. obr. 65), což bylo z pohledu konstrukce snímače AE naprosto nepřijatelné. Dále se uvažovalo o využití technologií obrábění pomocí vodního paprsku či laseru, případně broušení, všechny dané technologie byly nakonec opuštěny. Sklíčko o průměru 10 [mm] a tloušťce 0,13 [mm] bylo nakonec díky spolupráci s pracovníkem z Textilní fakulty TUL objednáno u Rakouského výrobce dle jejich katalogu.

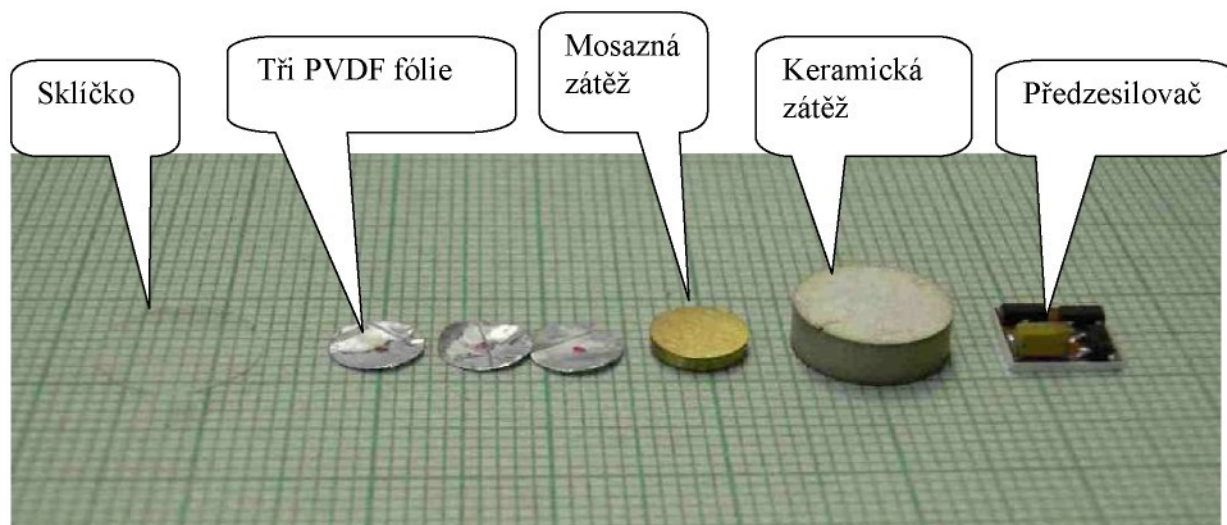


Obr. 65. Ukázka výrobou (vrtáním) poškozených sklíček, průměr všech zobrazených sklíček je 11 [mm].

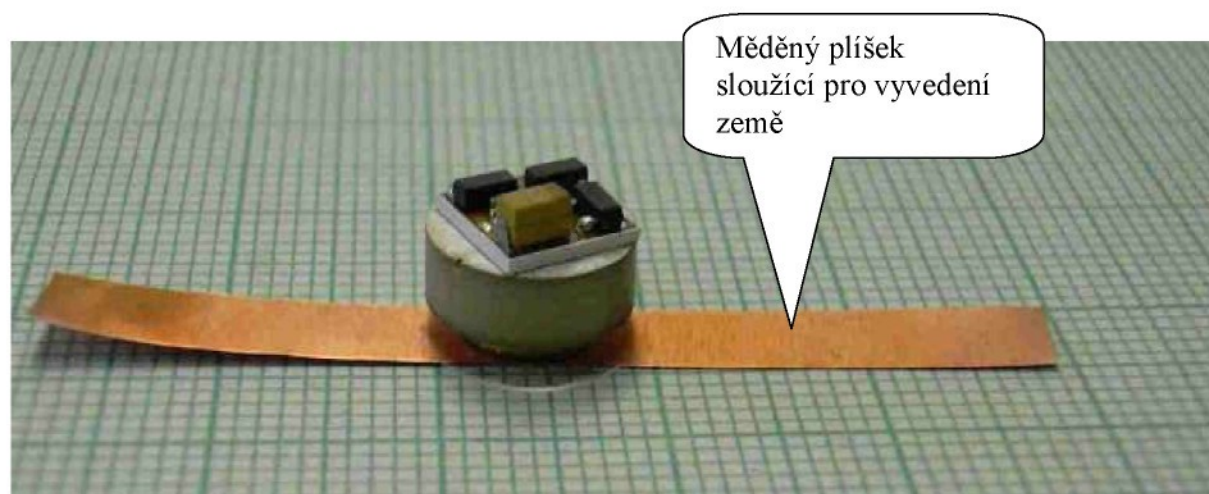
Schéma vnitřního uspořádání snímače akustické emise s PVDF fólií v tělese soustružnického nože a postup při jeho výrobě je zdokumentován na obr. 66–68.



Obr. 66. Náskres vnitřního uspořádání krytky včetně zakápnutí a kabeláže.



Obr. 67. Ukázka jednotlivých dílů snímače tak jak jsou za sebou uspořádány v tělese soustružnického nože



Obr. 68. Ukázka sestaveného interního snímače

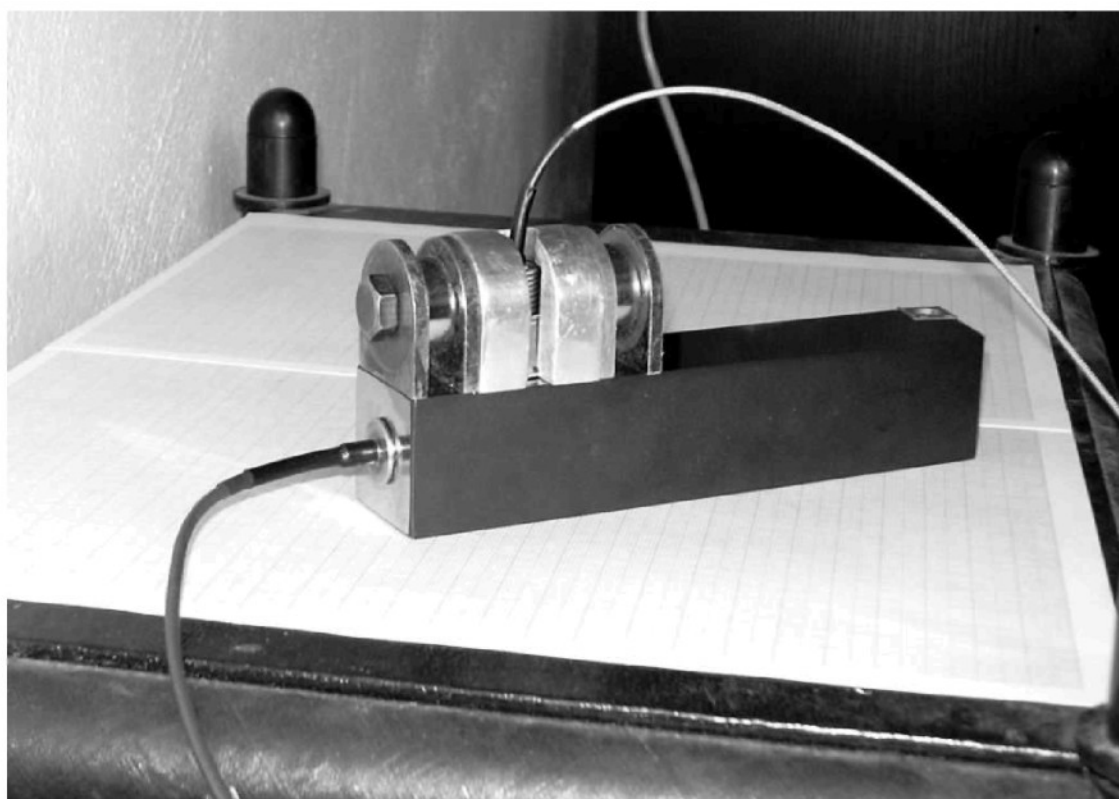
Jednotlivé díly snímače až na tři PVDF fólie jsou spojeny normálním epoxidem, vzhledem k nutnému vodivého spojení PVDF fólií byl pro jejich spojení použit vodivý epoxid. Pro vzájemnou fixaci jednotlivých dílů a zabránění odtržení jednotlivých drátků bylo vše ještě zalito silikonovým tmelem DC 3140, včetně drátků procházející stínící krytkou.

Horní stínící krytka interního snímače byla do vyjiskřeného otvoru zalisována.

Výrobní výkresy stínící krytky a otvorů do soustružnického nože jsou v příloze VI.

6.5.2 Laboratorní testování interního snímače AE s externími snímači AE pomocí Hsu - Nielsenova zdroje AE

Pomocí Hsu - Nielsenova zdroje bylo provedeno porovnání tří snímačů akustické emise. První snímač byl uložen v zadní části tělesa nože (viz. obr. 69) s již zabudovaným předzesilovačem a piezokeramickém převodníkem, nazýváme ho tedy interním snímačem akustické emise. Druhý snímač je klasický komerční snímač vyrobený firmou Dakel, který je již rovněž s předzesilovačem a piezokeramickým převodníkem, nazýváme ho tedy externím snímačem akustické emise s předzesilovačem. Poslední třetí snímač je opět klasickým snímačem vyrobeným firmou Dakel s piezokeramickým převodníkem, ale bez předzesilovače. Pro naše měření se bude tedy nazývat externí snímač akustické emise bez předzesilovače.



Obr. 69. Umístění snímačů akustické emise na tělese soustružnického nože

Původním záměrem bylo provést měření pomocí Hsu - Nielsenova zdroje se dvěma interními snímači akustické emise umístěnými ve stejném místě v zadní části tělesa nože. Hlavním důvodem bylo, že poloha příjmu akustické vlny šířené tělesem

nože bude pro snímače stejná a tudíž proto srovnatelná. Vzhledem k tomu, že se nepodařilo zařídit včasné opracování druhého soustružnického nože, bylo rozhodnuto, že se externí snímače umístí na boční stranu tělesa nože, která je stejné drsnosti jako zadní strana téhož nože. I toto umístění má jednu podstatnou výhodu a to sice, že se snímá oběma snímači najednou tentýž signál od téhož zdroje. Snímače jsou sice v jiné poloze, ze které vlnu snímají, ale odchylka v příjmu vlny by měla být zanedbatelná.

Externí snímače jsou připevněny na boku nože pomocí komerčně vyrobené magnetické úchytky (viz. obr. 50), která zabezpečuje velmi dobrou přitlačnou sílu k tělesu nože (viz. obr. 69). Mezivrstvou mezi tělesem nože a snímačem byla opět silikonová vazelína.

Grafické výsledky provedených měření jsou uvedeny v příloze VII.

Přehled provedených měření

1. Porovnání interního piezokeramického snímače s externím piezokeramickým snímačem se zabudovaným předzesilovačem. Externí snímač byl umístěn v magnetické úchytkce ve vzdálenosti 3 [cm] od zadní části nože (viz. obr. 70).

Signál ze snímačů postupoval na měřicí kartu počítače následovně:

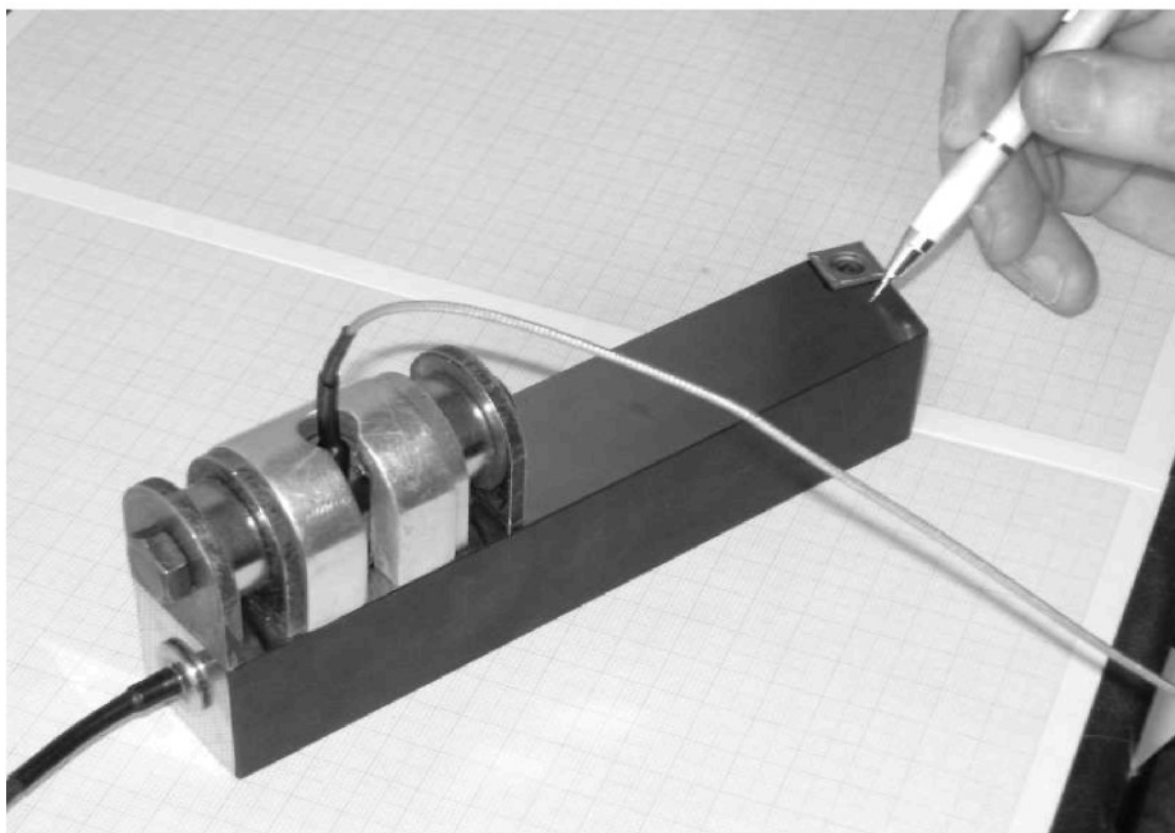
Na slot 04 byl přiveden signál z interního piezokeramického snímače.

Na slot 05 byl přiveden signál z externího piezokeramického snímače se zabudovaným předzesilovačem.

Měření označené čísly 01 až 04 byly iniciovány lomem tuhy mikrotužky v místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Byla lámána tuha o průměru 0,5 [mm] a o tvrdosti H. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 4 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 1-4.

Měření 05 bylo měřeno v místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti H. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 5.

Měření 06 bylo měřeno se vzorkováním 8 [MHz] a s tuhou o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti H, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu umístěné na noži (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 6



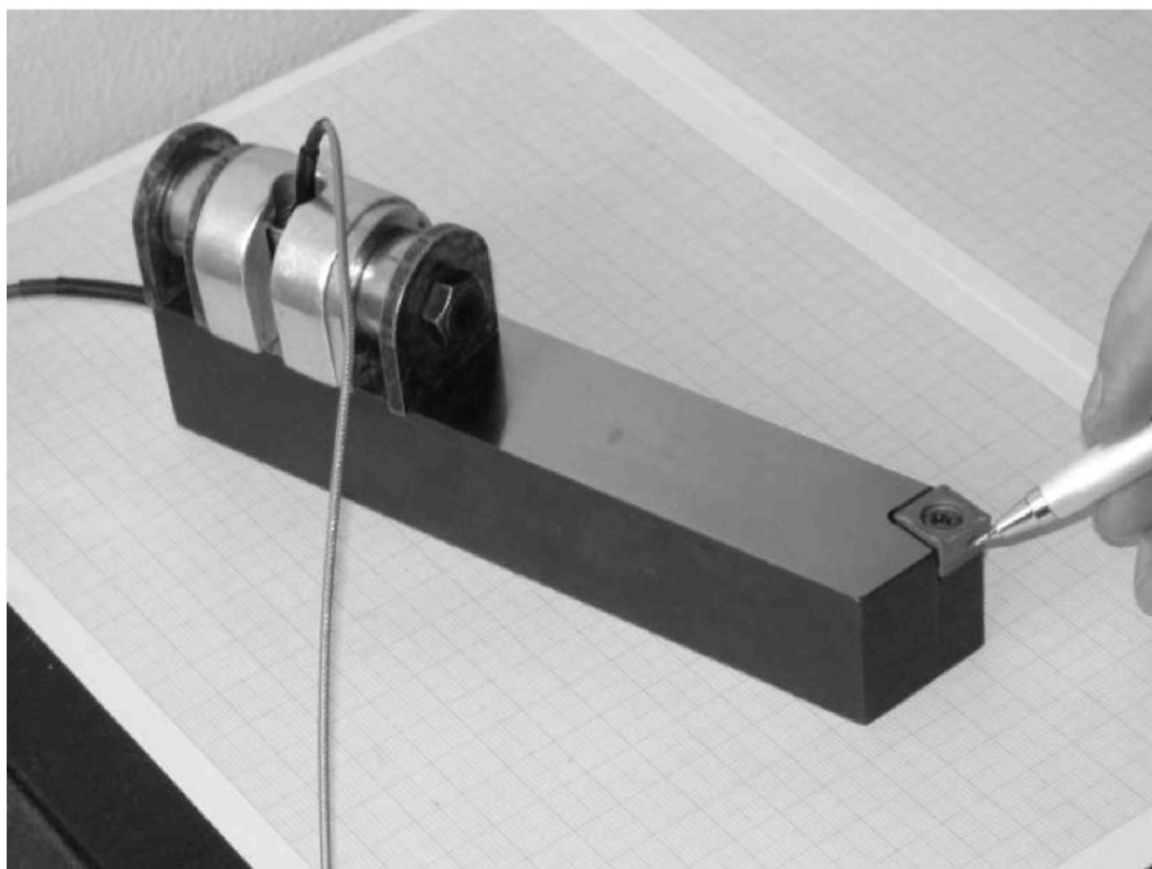
Obr. 70 Ukázka místa lomu tuhy pomocí Hsu - Nielsenova zdroje na horní části tělesa nože.

Měření 07 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,3 [mm] o neznámé tvrdosti. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 7.

Měření 08 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 8.

Měření 09 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 4 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 9.

Měření 10 bylo měřeno se vzorkováním 4 [MHz] a s tuhou o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 10.



Obr. 71. Ukázka místa lomu tuhy pomocí Hsu - Nielsenova zdroje na hřbetu břitové destičky ze slinutého karbidu

Měření 11 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,7 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 4 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 11.

Měření 12 bylo měřeno se vzorkováním 4 [MHz] a s tuhou o průměru 0,7 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 12.

Měření 13 bylo měřeno se vzorkováním 4 [MHz] a s tuhou o průměru 0,7 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Na základě zjištění, že externí snímač zde měl problémy se snímáním signálu (někdy je ani nezachytil, příčinou byla nízká úroveň amplitudy signálu), tak byla změněna trigrovací (spouštěcí) úroveň z 70% na 30% plného rozsahu. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 13.

2. Porovnání snímače interního s externím bez interního předzesilovače. Externí snímač byl opět umístěn ve vzdálenosti 3 [cm] od zadní části nože (viz. obr. 70).

Signál ze snímačů postupoval na měřicí kartu počítače následovně:

Na slot 04 byl přiveden signál z interního snímače.

Na slot 05 byl přiveden signál z externího snímače bez interního předzesilovače.

Měření 14 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 4 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 14.

Měření 15 bylo měřeno se vzorkováním 4 [MHz] a s tuhou o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 15.

Měření 16 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 16.

Měření 17 bylo měřeno se vzorkováním 8 [MHz] a s tuhou o průměru 0,5 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 17.

Měření 18 bylo měřeno na místě vedle vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu na broušené straně nože (viz. obr. 70). Lámala se tuha o průměru 0,7 [mm] o tvrdosti HB. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8 [MHz]. Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 18.

Měření 19 bylo měřeno se vzorkováním 8 [MHz] a s tuhou o průměru 0,7 [mm] o tvrdosti HB, lom mikrotužky byl proveden na hřbetu vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 71). Grafické zpracování měření je v příloze VII obr. 19.

6.5.3. Výsledky měření interního snímače AE s externími snímači AE

Interní snímač AE s piezokeramikou jako převodníkem a se zabudovaným předzesilovačem zaznamenával téměř schodné vlastnosti jako externí komerční snímač AE firmy DAKEL, který byl rovněž opatřen interním předzesilovačem. Oba tyto snímače se jeví jako širokopásmové, avšak málo citlivé.

Při vzájemném srovnání interního snímače AE s externím snímačem AE, který využívá externí předzesilovač se oba snímače jeví jako širokopásmové, ale interní snímač, vykazoval nepatrně větší citlivost než snímač externí.

6.5.4. Laboratorní testování interního PVDF snímače pomocí Hsu - Nielsenova zdroje

Pomocí Hsu - Nielsenova zdroje bylo prováděno ověření funkčnosti vestavěného snímače akustické emise v tělese soustružnického nože s PVDF fólií jako převodníkem a interním předzesilovačem, test byl prováděn s touhou o průměru 0,5 [mm] a tvrdosti HB.

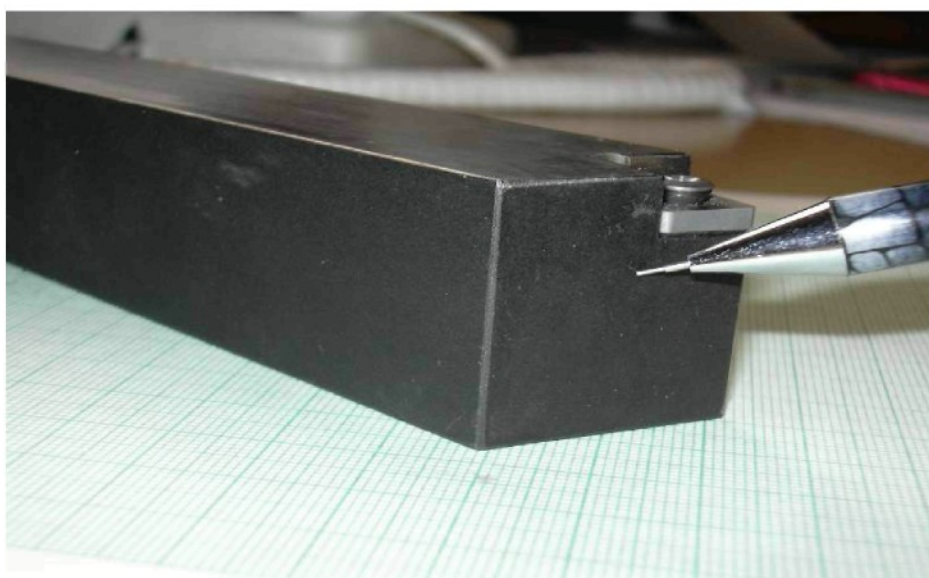
Přehled provedených měření

Měření označené **P01b** bylo iniciováno na obroušené ploše vedle vyměnitelné břitové destičky (viz obr.60) se vzorkovací frekvencí 8 [MHz] a zesílení **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 1.

P02 - měřeno na obroušené ploše vedle vyměnitelné břitové destičky (viz obr. 60) se vzorkovací frekvencí 4 [MHz] a zesílení **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 2.

P03 – měřeno z přední strany tělesa nože (viz obr. 72) se vzorkovací frekvence 8 [MHz] a o zesílení **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 3.

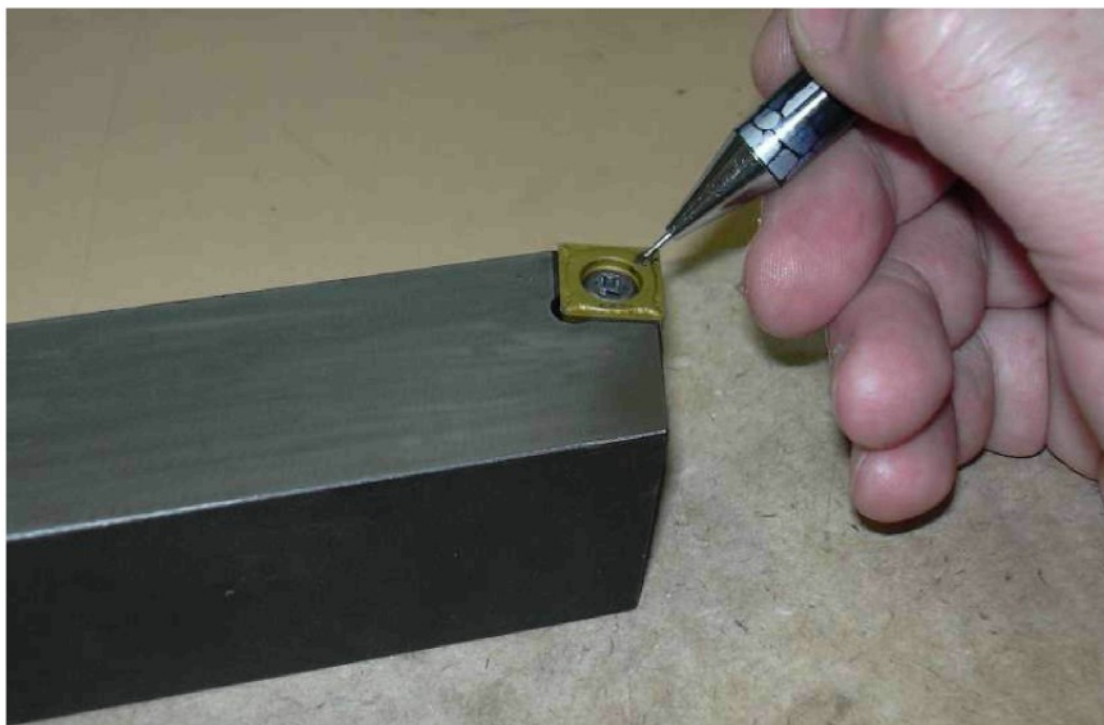
P04 - měřeno z přední strany tělesa nože (viz. obr. 72) se vzorkovací frekvencí 4 [MHz] a o zesílení **25 [dB]**. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 4.



Obr. 72. Ukázka lomu tuhy z přední strany soustružnického nože

P06 – měřeno na horní straně břitové destičky (viz. obr. 73) se vzorkovací frekvencí 8 [MHz] a o zesílení **30 [dB]**, trigger 60% rozsahu . Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 5.

P07 – měřeno na horní straně břitové destičky (viz. obr. 73) se vzorkovací frekvencí 8 [MHz] a o zesílení **25 [dB]**, trigger 40% rozsahu. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 6.

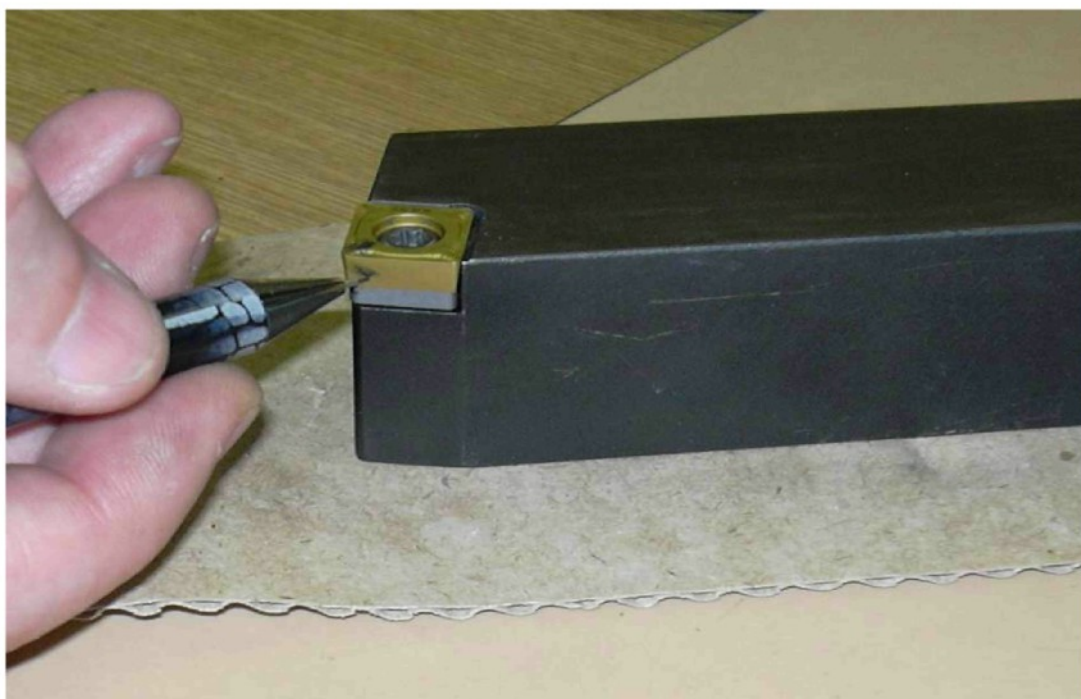


Obr. 73 Ukázka lomu tuhy na horní straně břitové destičky ze slinutého karbidu

P08 – měřeno na boční straně břitové destičky (viz. obr. 74) se vzorkovací frekvencí 8 [MHz] a o zesílení **30 [dB]**, trigger 60% rozsahu. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 7.

P09 – měřeno na boční straně břitové destičky (viz. obr. 74) se vzorkovací frekvencí 4 [MHz] a o zesílení **25 [dB]**, trigger 60% rozsahu. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 8.

P10 – měřeno na horní straně břitové destičky (viz. obr. 73) se vzorkovací frekvencí 8 [MHz] a o zesílení **30 [dB]**, trigger 60% rozsahu. Grafické zpracování měření je v příloze VIII obr. 9.



Obr. 74. Ukázka lomu tuhy na boku břitové destičky ze slinutého karbidu umístěné na soustružnickém noži.

6.5.5. Výsledky měření interního PVDF snímače AE

Zabudovaný snímač AE s PVDF fólií jako převodníkem a interním předzesilovačem se jevil jako snímač širokopásmový avšak málo citlivý.

Registrované odezvy signálu AE při lomu tuhy na tělese soustružnického nože jsou i přes jinou vzorkovací frekvenci zařízení takřka totožné. Signál tohoto snímače byl zpracováván frekvenční analýzou, Furierovou transformací a metodou časového grafu countů. Při lomu tuhy na výměnné břitové destičce ze slinutého karbidu byl signál tak slabý, že bylo možné zpracovat signál pouze časovým grafem countů. Frekvenční analýzu a Furierovu transformaci nebylo možné provézt, neboť signál byl slabý. Slabší příjem akustických vln při lomu tuhy na vyměnitelné břitové destičce, byl zapříčiněn asi akustickým přechodem mezi šroubovým spojem břitové destičky a tělesem soustružnického nože. Ke zlepšení příjmu akustických vln při lomu na břitové destičce nepomohlo ani podmáznutí šroubového spoje silikonovou vazelínou.

Z dosud provedených experimentů vyplývá, že interní snímač AE s piezokeramickým převodníkem je citlivější než interní snímač s PVDF fólií jako převodníkem.

6.6. Testování zabudovaných snímačů AE při procesu soustružení

Závěrečnou částí této práce bylo otestování již zabudovaných snímačů AE uvnitř tělesa soustružnického nože při procesu soustružení. Obráběcím strojem byl soustruh SU 52. Uspořádání měřicího pracoviště v dílně KOM (KATEDRY OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽ) je na obr. 75. Zvolenými materiály pro obrábění byli litina 42 2306, konstrukční ocel 12 050.1 a mosaz.



Obr. 75. Uspořádání měřicího pracoviště pro testování soustružnických nožů s integrovanými snímači akustické emise

Z důvodu porovnání různé odezvy snímače na rozlišné opotřebení vyměnitelné břitové destičky byla série experimentů realizována s destičkami různého opotřebení a to: s novou destičkou, mírně opotřebovanou, středně opotřebovanou a silně opotřebovanou destičkou (s ulomenou špičkou), konkrétní hodnoty opotřebení používaných řezných destiček jsou uvedeny v tabulce 8. Obrábělo se břitovou destičkou s označením SCMT 120408E-UR, 6630 firmy Pramet Diadur, a.s. Šumperk, která je vyrobena z povlakovaného slinutého karbidu. Destička je vhodná pro soustružení různých materiálů. Na základě průběžně měřených hodnot opotřebení výměnné břitové destičky během obrábění můžeme říci, že se opotřebení řezného nástroje během jednotlivých experimentů téměř nezměnilo.

Obrábělo se bez řezné kapaliny jednalo se tedy o tzv. obrábění na sucho.

Tabulka 8. Opotřebení používaných břitových destiček ze slinutého karbidu

Označení břitové destičky	Počáteční opotřebení břitové destičky – VB [mm]	Počáteční opotřebení břitové destičky – VR [mm]	Konečné opotřebení břitové destičky – VB [mm]	Konečné opotřebení břitové destičky – VR [mm]
Nová	0	0	Minimální známky otěru	Bez poškození
Mírně opotřebovaná	0,12	0,1	0,125	0,09
Středně opotřebovaná	0,21	0,2	0,23	0,2
Silně opotřebovaná	0,26	1,2	0,26	1,27

VB – opotřebení břitu

VR – opotřebení špičky

6.6.1. Přehled měření při procesu soustružení

Posuv (f) je u všech provedených měřeních 0,42 [mm/ot].

Měření označené **LIB 01** je měření šumu při obrábění (vše probíhalo stejně jako při vlastním procesu obrábění – motor byl zapnut, otáčky (n) a posuv byly nastaveny stejně jako u následujícího měření, pouze nedocházelo k vlastnímu úběru materiálu). Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 1.

První série měření sloužila ke vzájemnému porovnání funkčnosti a citlivosti obou nožů, obrábění probíhalo za stejných řezných podmínek pouze docházelo k výměně břitové destičky. **Obráběným materiálem byla litina 42 2306.**

Měření **LIB 02** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 2.

Měření **LIB 03** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a

převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 3.

Měření **LIB 04** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 4.

Měření **LIB 05** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 5.

Měření **LIB 06** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 6.

Měření **LIB 07** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 1120 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 7.

V druhé sérii obrábíme materiál **konstrukční uhlíkovou ocel 12 050.1** snižujeme otáčky, přísuv zůstává stejný. Opět porovnáváme vlastnosti obou nožů (se snímači) na stejné obráběcí podmínky.

Měření **LIB 08** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení se v průběhu měření měnilo z $A_u = 0$ [dB] na $A_u = 10$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 8.

Měření **LIB 09** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 10$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 9.

Měření **LIB 10** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 10$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 10.

Měření **LIB 11** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 11.

Měření **LIB 12** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 12.

Měření **LIB 13** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 13.

Měření **LIB 14** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 14.

Ve třetí sérii porovnáváme vzájemné závislosti různé hloubky záběru a různé opotřebované břitové destičky. Tato série měření se realizována pouze s nožem s PVDF fólií jako převodníkem. Obráběným materiálem zůstává **konstrukční uhlíková ocel 12 050.1**. Otáčky v průběhu celé této série byly konstantní (560 [ot/min]).

Měření **LIB 15** – hloubka řezu (a_p) je 0,1 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 15.

Měření **LIB 16** – hloubka řezu (a_p) je 0,2 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 16.

Měření **LIB 17** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 17.

Měření **LIB 18** – hloubka řezu (a_p) je 0,1 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a

převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 18.

Měření **LIB 19** – hloubka řezu (a_p) je 0,2 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 19.

Měření **LIB 20** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 20.

Měření **LIB 21** – hloubka řezu (a_p) je 0,1 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 21.

Měření **LIB 22** – hloubka řezu (a_p) je 0,2 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 22.

Měření **LIB 23** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 23.

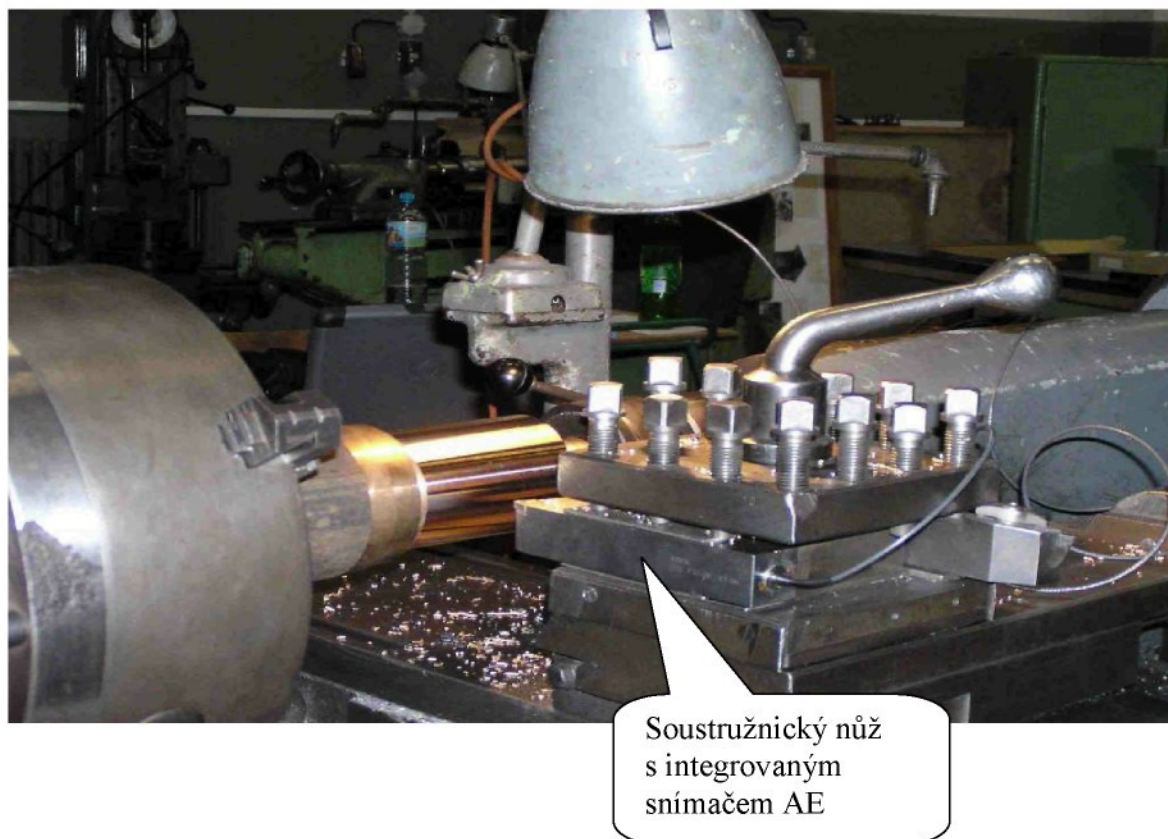
Měření **LIB 24** – hloubka řezu (a_p) je 0,1 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 24.

Měření **LIB 25** – hloubka řezu (a_p) je 0,2 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 25.

Měření **LIB 26** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebovanou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a

převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 26.

Ve čtvrté sérii měření se opět porovnávali vzájemné odezvy obou snímačů na změny opotřebení břitových destiček při stejných řezných podmínkách. **Obráběným materiálem byla mosaz**. Detailní pohled na soustružnický nůž se zabudovaným snímačem AE, jenž je připravený k obrábění mosazi je na obr. 76.



Obr. 76. Detailní pohled na soustružnický nůž se zabudovaným snímačem AE, jenž je připravený k obrábění mosazi.

Měření **LIB 27** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 27.

Měření **LIB 28** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 28.

Měření **LIB 29** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 29.

Měření **LIB 30** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 15$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **PVDF fólie**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 30.

Měření **LIB 31** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **novou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 31.

Měření **LIB 32** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se s **mírně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 32.

Měření **LIB 33** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **středně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 33.

Měření **LIB 34** – hloubka řezu (a_p) je 0,4 [mm], otáčky (n) jsou 560 [ot/min], soustružilo se **silně opotřebenou** břitovou destičkou, zesílení $A_u = 0$ [dB] a převodníkem ve snímači byla **piezokeramika**. Grafický výsledek měření je zobrazen v příloze IX obr. 34.

6.6.2. Výsledky měření při procesu soustružení

Časový graf countů (viz příloha IX obr. 1.) ukazuje, že hodnota šumu je díky integrovanému předzesilovači velice nízká (střední aritmetická hodnota RMS naměřených dat je 15 mV).

V první sérii měření jsme vzájemně porovnávali funkčnost a citlivost obou nožů při obrábění litiny ČSN 42 2306. Řezné podmínky zůstávali stejné pouze se měnili různě opotřebované břitové destičky. Z grafických výsledků (viz příloha IX obr. 2. – 7.) je patrné, že piezokeramický snímač je mnohem více citlivý než PVDF. Při standardní konfiguraci vyhodnocovacího zařízení pro AE bylo běžně dosahováno u snímače s piezokeramickým převodníkem hodnot na hranici přebuzení. U některých měření je zaznamenán ze začátku průběhu časového grafu countů výrazný pik (viz obr. 2 a 4 v příloze IX), který je pravděpodobně způsoben nastavováním hloubky řezu pro následné obrábění. Na obrázku 7. v příloze IX je v závěru průběhu grafu countů výrazný pik, který je pravděpodobně zapříčiněn vznikem otřepu při vyjíždění soustružnického nože ze záběru. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních v první sérii při vlastním procesu obrábění viz Tabulka 9. Na hodnotě count 2 se nejvíce projevuje vliv stavu opotřebení břitové destičky.

Tabulka 9. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních v první sérii při vlastním procesu obrábění .

Číslo měření	Obráběcí podmínky	Aritmetický průměr hodnoty count 1 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty count 2 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty RMS při vlastním obráběcím procesu [mV]
2	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	48 742	39 012	754
3	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	77 420	48 872	799
4	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	77 087	58 764	867
5	PVDF fóliový převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	23 198	6 678	545
6	PVDF fóliový převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	11 795	107	361
7	PVDF fóliový převodník, Au = 0 [dB], n = 1120 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál litina ČSN 42 2306	7768	16	323

V druhé sérii měření jsme vzájemně porovnávali funkčnost a citlivost obou nožů při obrábění konstrukční uhlíkové oceli ČSN 12 050.1 a při snížených otáčkách. Řezné podmínky během druhé série zůstávali konstantní a měnily se pouze různě opotřebované břitové destičky. Grafické výsledky (viz příloha IX obr. 8. – 14.) nám opět potvrzují, že piezokeramický snímač je mnohem více citlivý než PVDF. Na těchto měřeních je také patrná závislost signálové odezvy na otáčkách a druhu materiálu. U měření 9., 13. a 14. je stejně tak jako v první sérii měření zaznamenán z počátku průběhu časového grafu countů výrazný pik (viz obr. 9, 13 a 14 v příloze IX), který je pravděpodobně způsoben nastavováním hloubky řezu pro následné obrábění. Na obrázku 8. – 10. v příloze IX se taktéž i znovu jako v předcházející sérii měření vyskytuje v závěru průběhu grafu countů výrazný pik, který je pravděpodobně zapříčiněn vznikem otřepu při vyjždění soustružnického nože ze záběru. V měření č. 9 jsou hodnoty count 1 a count 2 v průběhu obrábění silně rozkolísané, proto vzhledem k velkému rozptylu hodnot countů není výhodné (důležité) udávat střední hodnoty těchto hodnot. V 11. měření (viz obr. 11. v příloze IX) se v grafu countů po záznamu vlastního průběhu obrábění vyskytují ještě tři výrazné piky. Tyto piky jsou pravděpodobně od rotující třísky, která způsobila aperiodické úder do držáku nože nebo by se případně mohlo jednat o omylem zaznamenanou činnost operátora (čištění pracovního prostoru). Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních v druhé sérii při vlastním procesu obrábění viz Tabulka 10.

Tabulka 10. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních ve druhé sérii při vlastním procesu obrábění .

Číslo měření	Obráběcí podmínky	Aritmetický průměr hodnoty count 1 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty count 2 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty RMS při vlastním obráběcím procesu [mV]
8	PVDF fóliový převodník, Au = 0 a 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	244	2	164
9	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	121
10	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	114
11	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	104 343	80 655	939
12	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	92 251	27 165	694
13	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	114 996	45 890	771
14	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	95 699	54 447	833

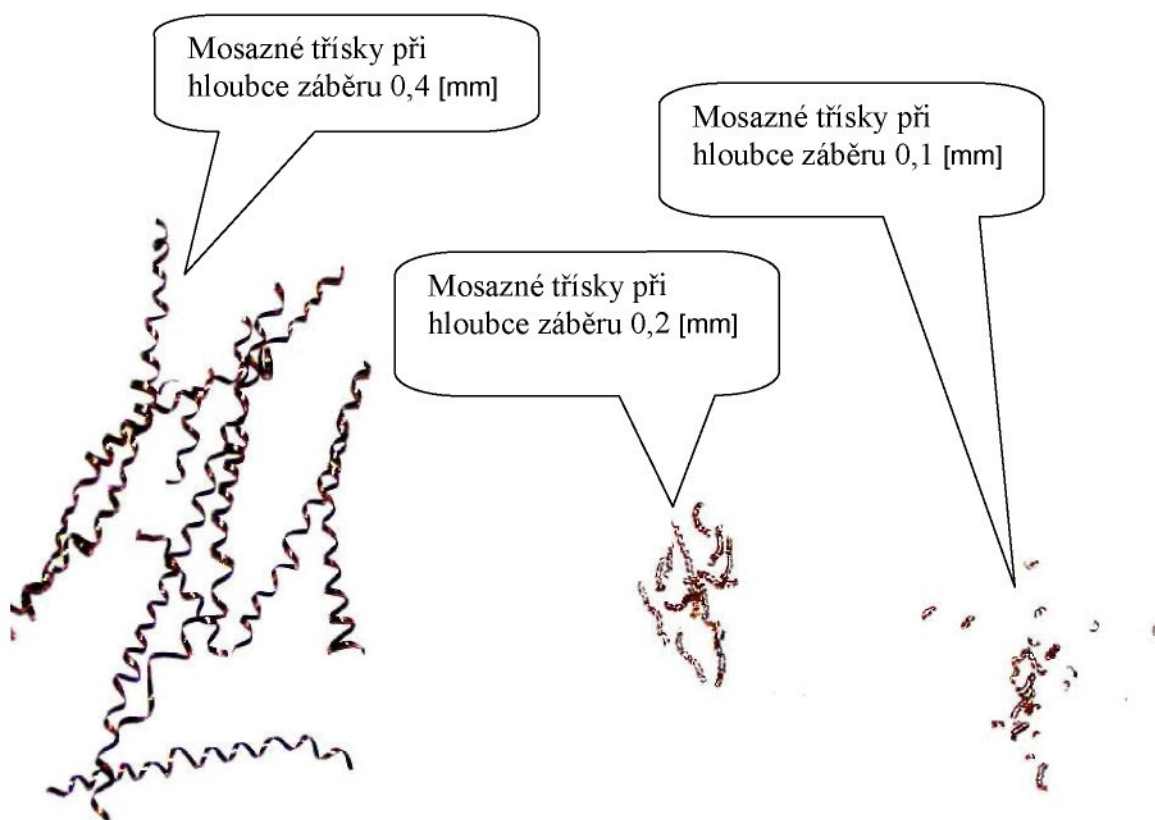
Ve třetí sérii měření byli porovnávány vzájemné závislosti různě opotřebovaných břitových destiček na různých hloubkách záběru, ostatní řezné podmínky zůstávali stejné jako ve druhé sérii měření. Celá série byla realizována pouze s nožem s PVDF fólií jako převodníkem. Při porovnání jednotlivých břitových destiček při stejných hloubkách záběru lze předpokládat, že k největšímu gradientu napětí při oddělování třísky obrobku dochází u silně opotřebované břitové destičky. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních ve třetí sérii při vlastním procesu obrábění viz Tabulka 11.

Tabulka 11. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních ve třetí sérii při vlastním procesu obrábění .

Číslo měření	Obráběcí podmínky	Aritmetický průměr hodnoty count 1 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty count 2 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty RMS při vlastním obráběcím procesu [mV]
15	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	433	1	194
16	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	1102	Rozkolísané hodnoty	204
17	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	941	Rozkolísané hodnoty	205
18	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	292	0	182
19	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	223	0	180

20	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	173
21	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	15 195	529	392
22	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	16 461	784	405
23	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	11 747	241	339
24	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	12 396	473	379
25	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	29 163	11 291	688
26	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál ocel ČSN 12 050.1	34 889	13 532	725

Ve čtvrté sérii měření se porovnávali vzájemné odezvy obou snímačů na změny opotřebení břitových destiček při stejných řezných podmínkách. Obráběným materiálem byla mosaz. V této sérii měření se opět ukázal snímač s piezokeramickým převodníkem AE mnohem citlivější než snímač s PVDF fóliovým převodníkem AE. Ze středních aritmetických hodnot RMS lze usuzovat, že z blíže neurčitých materiálových vlastností této slitiny se signál AE chová poněkud atypicky. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních ve třetí sérii při vlastním procesu obrábění viz Tabulka 12. Ukázka různých délek mosazných třísek v závislosti na různé hloubce záběru je na obr. 77.



Obr. 77. Ukázka mosazných třísek při různé hloubce záběru

Tabulka 12. Přehled aritmetických průměrů hodnot naměřených při jednotlivých měřeních ve čtvrté sérii při vlastním procesu obrábění .

Číslo měření	Obráběcí podmínky	Aritmetický průměr hodnoty count 1 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty count 2 při vlastním obráběcím procesu [1]	Aritmetický průměr hodnoty RMS při vlastním obráběcím procesu [mV]
27	PVDF fóliový převodník, Au = 15 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál mosaz	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	155
28	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	141
29	PVDF fóliový převodník, Au = 10 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	205
30	PVDF fóliový převodník, Au = 15 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	Rozkolísané hodnoty	Rozkolísané hodnoty	182
31	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], nová břitová destička, obráběný materiál mosaz	78 515	16 864	587
32	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], mírně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	85 439	16 040	601
33	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], středně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	80 093	8 865	543
34	piezokeramický převodník, Au = 0 [dB], n = 560 [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], silně opotřebovaná břitová destička, obráběný materiál mosaz	65 957	5 084	521

7. ZÁVĚR

Hlavními úkoly této bakalářské práce bylo navrhnout a porovnat novou koncepci vbudovaných do nástroje převodníků AE, které byly realizovány z nových v praxi doposud pro snímače AE nepoužívaných materiálů. Jednalo se o zabudování převodníků s PVDF fólie a piezokeramiky do vlastního tělesa soustružnického nože. Funkčnost převodníků byla otestována při procesu obrábění, z důvodu časové náročnosti provádění vlastních experimentů, byla realizována série základních porovnání signálů AE s technologickými parametry.

Na základě provedených měření lze říci, že nejcitlivější převodník byl převodník piezokeramický, který se zároveň jevil jako snímač širokopásmový. Převodník z PVDF fólie se choval jako úzkopásmový a s politováním nutno poznamenat, že byl málo citlivý. Kompozitní převodník se díky své nehomogenitě struktury choval „neočekávaně“ jednou jako převodník úzkopásmový, málo citlivý, a podruhé jako širokopásmový, poměrně citlivý.

Při procesu obrábění bylo ověřeno, že oba integrované snímače jsou vhodné pro zaznamenávání odezvy při procesu soustružení. Pro sledování procesu obrábění se jevil jako vhodnější nůž se zabudovaným PVDF fóliovým převodníkem a to i přesto, že se v laboratorních podmínkách jevil jako vhodnější nůž se zabudovaným piezokeramickým převodníkem. Vhodnost nože se zabudovaným převodníkem z PVDF fólie byla dána nastavením vyhodnocovací aparatury (velmi vysoká základní vstupní citlivost), z tohoto důvodu bylo možné pokrytí širokého spektra obráběných materiálů a řezných podmínek. Možnou nevýhodou PVDF fóliového převodníku je nízká Curieova teplota a tudíž je nutno zachovat provozní teplotu části obráběcího nože s integrovaným snímačem AE na teplotu do cca 60 [°C], jinak dochází k úplné degradaci piezoelektrických vlastností převodníku. Pomocí vestavěného předzesilovače do tělesa nože, tedy do bezprostřední blízkosti převodníku, dochází k zesílení informativního signálu, což potlačuje indukování rušivých vysokofrekvenčních šumů na kabeláži. Zesílený signál je tedy minimálně ovlivňován danými šumy. Také se potvrdilo, že vestavěný předzesilovač s napájením ze strany měřicí karty umožňuje propojení vlastního snímače umístěného v tělese soustružnického nože s vyhodnocovacím zařízením pouze jedním koaxiálním kabelem. Výhodou umístění převodníku v zadní části tělesa soustružnického nože a

jednokabelové řešení napájení a snímání signálu je, že kabeláž minimálně omezuje vlastní proces obrábění.

Závěrem dodejme, že tuto oblast výzkumu by bylo dobré podrobit ještě dalšímu a hlubšímu prozkoumávání, jelikož zjištěné výsledky se jeví jako optimistické a perspektivní.

SEZNAM LITERATURY

- [1] Prof. Ing. MAYER, J., Ing. Matějka, J. : Základy strojnictví. 1. vydání Skripta TUL, Liberec 1969. 196 s. ISBN 55 – 804 – 68
- [2] Žižka, J.: Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje, Liberec 2003 TUL, s.106 ISBN 80 – 7083 – 687 – 1
- [3] Stejskalová, V.: Monitorizace procesu obrábění [bakalářská práce] Liberec 2004, TUL – FS – KOM, s. 84
- [4] Tomová, Z.: Akustická emise při frézování litiny [bakalářská práce] Liberec 2001, TUL – FS – KOM, s. 57
- [5] Vích, M.: Zkušenosti s použitím metody akustické emise v oblasti skla. Sklář a keramik, 33, 1983, č. 4, s. 94 – 96
- [6] Dušek, F. – Buchar, J. – Juda, P.: Akustická emise.[Výzkumná zpráva]. Brno, Ústav fyzikální metalurgie ČSAV 1975,62 s.
- [7] E 1316 – 97 a. Standard Terminology for Nondestructive Examination. 1997
- [8] Wevers, M.: Fundamentals of acoustic emission. In: 22nd European Conference on Acoustic Emission Testing. 22. Aberdeen UK, 29 – 31 May 1996, p. 1 – 10
- [9] Jacobs, H. J. – Knorr, b. – Scheibe, W.: Primärdatenge – winnung für Fräsoptimierung durch Richterwertmaschine. In: TU Dresden – Informationen. – Dresden. Technische Universität 1975, 11 s. Als Manuskript gedruckt. [Sběr vstupních dat pro optimalizaci frézování zařízením pro snímání normativních ukazatelů. Český překlad J. Gazda, TU Liberec – KOM 1996]
- [10] Hiršl, J. – Černohlávek, D. – Stefan, O. – Čermák, F. :Keramická piezoelektrika. 1. vydání Praha 1970, s. 96
- [11] Veselský, M.: Měření a kalibrace snímačů akustické emise, zpráva ZD RPETY – DAKEL
- [12] Rindorf, H. J.: Acoustic emission source location in theory and in practice, No. 2 – 1981, Brüel & Kjær ISSN 0007 – 2621
- [13] Poppeová, V. – Novák, S.: Využitie signálu akustickej emisie pri monitorovaní opotrebovania rezného nástroja, článok ŽU ŽILINA 2003
- [14] Propagační materiály firmy DAKEL
- [15] Materiálové listy firmy DAKEL

[16] Dokumentace firmy DAKEL

[17] Chaloupek, P.: Vláknenné útvary s piezoelektrickými vlastnostmi [diplomová práce] Liberec 2002, TUL – FT – KNT, s.68

[18] Kepler, R. G. – Anderson, R. A.: Ferroelectric polymers, 1. vydání USA 1992, s.57

[19] Agarwal, B. D. – Broutman, L. J.: Vláknové kompozity, 1. vydání SNTL Praha 1987, s.296

[20] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály, 1. vydání SNTL Praha 1988, s. 328

[21] Řasa, J.: Co přinesla EMO – Paříž 99, Věda, technika a my 11/99

[22] Akustická emise pomáhají řídit broušení, EVOLUTION 1/00

[23] Řasa, J.: Inteligentní řezné nástroje, Věda, technika a my 5/97

[24] Gabriel, V. – Řasa, J.: Vývoj technologie obrábění, MM průmyslové spektrum 6/99

[25] Dornfeld, D.: Monitoring Technologies for Intelligent Machining, VDI BERICHTE NR. 1179, Berkeley/USA 1995

[26] Tyl, M.: Inteligentní řezné nástroje [diplomová práce] Liberec 2002, TUL – FS – KOM, s. 96

[27] Inteligentní snímač pro inteligentní obrábění

[28] Tönshoff, H. K. – Wobker, H. –G. – Hartmann, M. – Kilsmark, P.: The Future of Monitoring, VDI BERICHTE NR. 1179, Hannover 1995

[29] Zehnula, K.: Využití ultrazvukové emise při obrábění, Vysoké učení technické v Brně, článek

[30] Akustická emise, <http://www.ped.muni.cz/wphy/stare/KEMIS.HTML> 2002, s. 4

[31] Macek, K. – Zuna, P. : Nauka o materiálu, 1. vydání skriptu ČVÚT Praha 1996, s. 209, ISBN 80 – 01 – 01507 - 6

[32] Vávra, P.: Strojnické tabulky pro SPŠ strojnické, 1. vydání SNTL Praha 1983, s. 672

[33] Černoch, S.: Strojně technická příručka, 13. vydání SNTL Praha 1977, s. 2568

[34] <http://www.ultrasonic.com>.

[35] Zelenka J.: Piezoelektrické rezonátory a jejich použití, Praha, Academia 1983, s.256

[36] <http://www.mmsonline.com/articles/1000rt3.html>

Seznam příloh

ČÍSLO	NÁZEV
PŘÍLOHY	
PŘÍLOHA I	PŘEHLED TYPICKÝCH PIEZOELEKTRICKÝCH POLYKRISTALICKÝCH MATERIÁLŮ
PŘÍLOHA II	ROZDĚLENÍ KATEGORIÍ PIEZOKERAMICKÝCH MATERIÁLŮ DLE DIELEKTRICKÝCH A PIEZOELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ.
PŘÍLOHA III	UKAZKA SNÍMAČŮ VYRABĚNÝCH FIRMOU DAKEL
PŘÍLOHA IV	ČLÁNEK: NÁVRH SNÍMAČE AE NOVÉ GENERACE
PŘÍLOHA V	GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ EXTERNÍCH SNÍMAČŮ
PŘÍLOHA VI	VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE
PŘÍLOHA VII	GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ POROVNÁVAJÍCÍ INTERNÍ SNÍMAČ S PIEZOKERAMICKÝM PŘEVODNÍKEM S EXTERNÍMY SNÍMAČI S PIEZOKERAMICKÝMY PŘEVODNÍKY
PŘÍLOHA VIII	GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ INTERNÍHO SNÍMAČE S PVDF FÓLÍÍ JAKO PŘEVODNÍKEM
PŘÍLOHA IX	GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ PŘI PROCESU SOUSTRUŽENÍ

Vlastnost	γ	$\epsilon_{20}^{\circ\text{C}}$	$\text{td}\delta_{20}^{\circ\text{C}}$	k_r	k_{33}	d_{31}	d_{33}	Q_m	C_T	$t/t_{20}^{\circ\text{C}}$
Měrná jednotka	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$					$\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	$\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$		$^{\circ\text{C}}$	%
Rozměr	10^{-3}		10^{-4}			10^{-11}	10^{-11}			v tepl. oblasti
Materiál:										
BaTiO_3	5,3-5,8	1100-1800	300	0,18-0,37	-	4,25-8,35	8,35-20	-	+120	0 až +40 $^{\circ\text{C}}$ 7
$(\text{Ba}_{0,95}\text{Ca}_{0,05})\text{TiO}_3$	5,1-5,7	870-1200	150	0,33	0,49	3,1-5,8	5,3-7,0	500	+115	0 až +40 $^{\circ\text{C}}$ 4
$(\text{Ba}_{0,8}\text{Ca}_{0,08}\text{Pb}_{0,12})\text{TiO}_3$	4,8-5,4	300-600	100	0,17-0,25	0,34	1,3-5,0	4,7-8,4	1200	+140	0 až +40 $^{\circ\text{C}}$ 1
$(\text{Pb}_{0,6}\text{Ba}_{0,4})\text{Nb}_2\text{O}_6$	5,6-6,0	1100-1900	100	0,26-0,40	-	5,7-12	17-20	-	+220	0 až +40 $^{\circ\text{C}}$ 0,8
$(\text{K}_{0,5}\text{Na}_{0,5})\text{NbO}_3$	4,3	290	400	0,34-0,39	0,51	3,2	8,0	130	+200	-
$\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$	7,5	730	50	0,53	0,67	9,3	22,3	860	+350	-
$\text{Pb}_{0,80}\text{Sr}_{0,20}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_3$	7,5	1130	-	0,32	-	7,0	19,1	330	+200	-60 až +80 $^{\circ\text{C}}$ 0,3
$\text{Pb}(\text{Zr}_{0,54}\text{Ti}_{0,46})\text{O}_3$ + 1 váh. % Nb_2O_5	7,6	1600	200	0,54	-	-	12	70	+360	-80 až +140 $^{\circ\text{C}}$ 0,5
$\text{Pb}[(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0,25}\text{Ti}_{0,375}\text{Zr}_{0,375}]\text{O}_3$	7,6	980	200	0,50	-	-	-	100	-	+20 až +80 $^{\circ\text{C}}$ 0,3
$\text{Pb}[(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0,375}\text{Ti}_{0,375}\text{Zr}_{0,25}]\text{O}_3$	7,7	930	40	0,55	-	-	-	2000	-	+20 až +80 $^{\circ\text{C}}$ 0,1
$\text{Pb}[(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0,375}\text{Ti}_{0,375}\text{Zr}_{0,25}]\text{O}_3$ + 7 v. % NiO	7,7	2680	150	0,57	-	-	--	100	-	-

Rozdělení kategorií piezokeramických materiálů dle dielektrických a piezoelektrických parametrů .
Norma ČSN - EN 50324-1

			TYP 100		TYP 200	
			PZT		PZT	
Vlastnost	Symbol	Jednotka	min	max	min	max
Relativní permitivita	ϵ_{33}^T	1	1100	1600	1600	2500
Dielektrický ztrátový činitel	$\text{tg } d$	$\cdot 10^{-4}$		60		250
Nárůst ϵ_{33}^T od 0V/mm do 400V/mm		%		20		
Nárůst $\text{tg } d$ od 0V/mm do 400V/mm		%		1000		
Koeficient vazby pro planární kmit	k_p	1	0,55		0,55	
Koeficient vazby pro tloušťkový kmit	k_t	1				
Curieova teplota	T_c	°C	300		330	
Mechanický činitel jakosti	Q_M	1	300			100
Piezoelektrická nábojová konstanta	d_{33}	$\cdot 10^{-12}$ C/N	250		400	

TYP 300		TYP 400		TYP 500		TYP 600		TYP 700	
PZT		bárium titanát		PZT s nízkým ϵ_{33}^T		PZT		titaničitan olovnatý	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
800	1150	700	1400	300	850	2500		150	300
	50		100		50		300		300
	300								
0,5		0,23		0,4		0,55			
								0,35	
300		100		250		180		230	
800			400	800			100	500	
200		100		150		500		40	

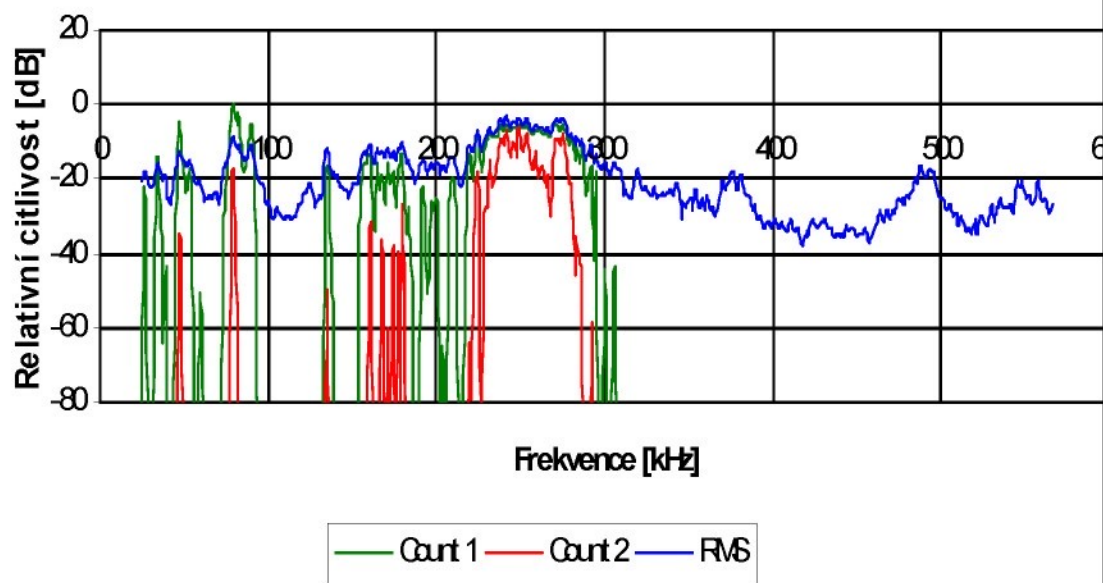
TYP 800	
metaniobát olovnatý	
min	max
200	300
	100
0,3	
400	
	20
70	

TYP **MICRO2001**



rozměry snímače	průměr 3.4 mm, výška 3.7 mm
materiál pouzdra	nerezová ocel
dotyková plocha	nerezová ocel průměr 2.8 mm
provedení vývodu	radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1.2 mm s BNC konektorem
materiál piezoelementu	DAK 15B DAK 274
provozní teploty	s keramikou DAK 274 ... - 20 až + 75 °C s keramikou DAK 15B ... - 20 až + 150 °C
určení snímačů	pro laboratorní měření akustické emise na malých měřených objektech snímač vyžaduje externí koaxiálový impedanční převodník s předzesilovačem, pokud by koaxiálová trasa byla delší jak cca 2 m
přípevnění snímačů	lepením

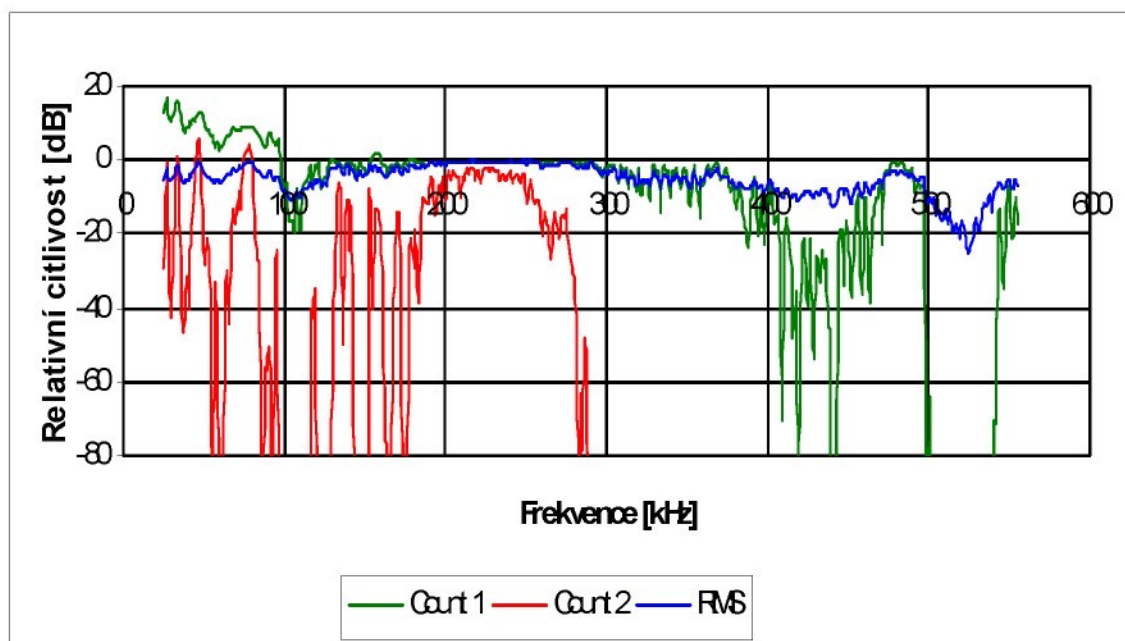
Relativní srovnávací charakteristika REF05 (snímač s keramikou DAK 274):



TYP MIDI2001

	rozměry snímače	průměr 6 mm, výška 6.3 mm
	materiál pouzdra	nerezová ocel
	dotyková plocha	nerezová ocel průměr 5 mm
	provedení vývodu	radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1.2 mm s BNC konektorem
	materiál piezoelementu	DAK 15B DAK 274
	provozní teploty	s keramikou DAK 274 ... - 20 až + 75 °C s keramikou DAK 15B ... - 20 až + 150 °C
	určení snímačů	pro laboratorní měření akustické emise na malých měřených objektech snímač vyžaduje externí koaxiální impedanční převodník s předzesilovačem, pokud by koaxiálová trasa byla delší jak cca 2 m
	přípevnění snímačů	lepením

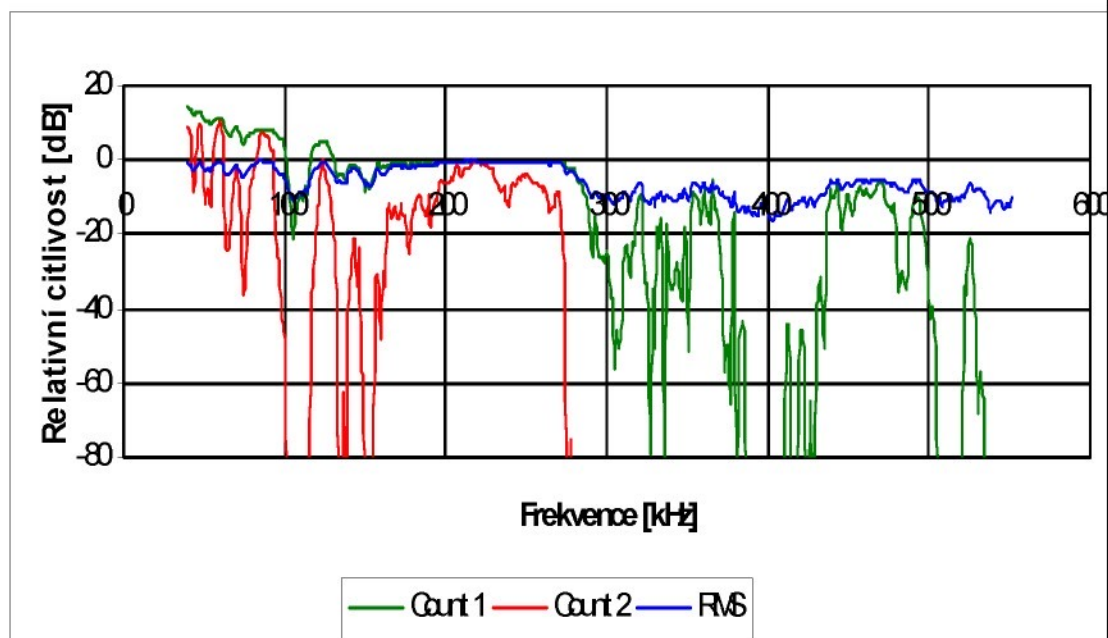
Relativní srovnávací charakteristika REF05 (snímač s keramikou DAK 274):



TYP **MTR-5/MTPA-5**

	rozměry snímače	průměr 16 mm, výška 17 mm
	materiál pouzdra	ocel s povrchem Ni
	dotyková plocha	ocelová membrána s Ni povrchem průměr 12 mm
	provedení vývodu	radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 3 mm s BNC konektorem
	materiál piezoelementu	DAK 15B DAK 274 DAK 191
	provozní teploty	s keramikou DAK 274 ... - 20 až + 75 °C s keramikou DAK 15B ... - 20 až + 150 °C s keramikou DAK 191 ... + 20 až + 350 °C
	určení snímačů	pro laboratorní i průmyslová měření akustické emise snímač vyžaduje externí koaxiálový impedanční převodník s předzesilovačem, pokud by koaxiálová trasa byla delší jak cca 2 m
	předzesilovač (MTPA-5)	vestavěný impedanční převodník se zesilovačem typ. 35 dB
	přípevnění snímačů	magnetickým držákem, lepením, přírubou

Relativní srovnávací charakteristika REF05 (snímač s keramikou DAK 274):



Návrh snímače akustické emise nové generace

URČENÉHO PRO SLEDOVÁNÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ

Prof. Ing. Jan Žížka, CSc., Zdeněk Motyčka, RNDr. Petr Hána*, CSc., Lenka Hamplová

Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci

* Katedra fyziky, Fakulta pedagogická, Technická univerzita v Liberci

Hálkova 6, 461 17 Liberec

Jan.Zizka@vslib.cz Petr.Hana@vslib.cz

Anotace: Vývoj moderní průmyslově-spotřební společnosti směřuje k tomu, že lidé ve výrobě budou nahrazováni stroji. Nezbytností výroby bez přítomnosti lidské obsluhy bude vybavit stroje umělými receptory, které by zajišťovaly sběr dat a informací pro vyhodnocení a stanovení zpětnovazebních reakcí vhodnou rozhodovací jednotkou. Jednou z možných snímaných veličin by mohl být signál akustické emise. Koncepce tzv. inteligentních řezných nástrojů předpokládá použití miniaturních vysoce citlivých snímačů vbudovaných do tělesa řezného nástroje. Příspěvek pojednává o možnosti praktického použití a využití piezoelektrických vlastností kopolymerní folie pro snímač akustické emise jako převodníku mechanické povrchové vlny na signál elektrický.

Klíčová slova: monitorizace, inteligentní řezný nástroj, snímač akustické emise, převodník, kopolymerní folie

1. MÍSTO ÚVODU TROCHA HISTORIE O „KORMIDLOVÁNÍ“

„Kyber-“, je dnes velmi populární předponou, a to díky spisovateli Williamu Gibsonovi (nar. 1948), autorovi sci-fi románů, který v polovině 80. let minulého století vytvořil pojem „kyberprostor“. Termínem kyberprostor se míní něco více než okolí řádného vesmíru, jde o kvazirealitu vytvořenou telekomunikačními počítači, kde na sebe novými a zvláštními způsoby vzájemně působí lidé a počítačová data [5].

Uvážíme-li, jak běžně je pro označování nového vztahu mezi člověkem a počítači užíváno předpony „kyber-“, k překvapení nás přivádí poznatek, že tato předpona je odvozena od řeckého slova *kybernétés*, znamenajícího „kormidelník“. Poznamenejme, že z něho vychází i slovo „guvernér“. Poprvé však bylo toto slovo řeckého původu použito nikoliv v 80. letech minulého století, ale již v letech čtyřicátých matematikem Norbertem Wienerem (1894 – 1964) z Massachusettského technického institutu, který v roce 1948 vydal knihu *Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine* (český překlad *Kybernetika neboli řízení a sdělování v živých organismech a strojích*, vyšel ve SNTL Praha, v roce 1960). Daný termín „kybernetika“ použil k pojmenování vědy o ovládání neboli „kormidlování“ automatických zbraní a dalších strojů.

Wiesnera zajímala zejména podobnost mezi příkazy dávanými strojům na straně jedné a lidským jazykem a chováním na straně druhé. Jako východisko si vzal využití „zpětné vazby“ v automatizaci. Jím vytvořené slovo „kybernetika“ bylo pravděpodobně částečně inspirováno prvním významným pojednáním o zpětné vazbě autora Jamese Clerka Mexwella (1831 – 1879). Zpětná vazba v podstatě znamená, že výsledky získané činností stroje vložíme zpátky do stroje. Poznamenejme, že pojem „zpětná vazba“ se především zásluhou kybernetiky

stal obecně známým a umožnil a umožňuje vysvětlit řadu dějů odehrávajících se v nejrůznějších dynamických systémech.

Zpětná vazba je důležitou složkou Wiesnerovy obecnější téze, že stroje a lidské bytosti zpracovávají informace velmi podobným způsobem. **Zpětná vazba je věcí žádoucí, neboť umožňuje strojům přizpůsobit se, a ne jen spoléhat na pevně dané instrukce.** Centrální nervová soustava může být také chápána jako určitý typ zpětnovazebního stroje. Mozek vysílá impulsy neboli „informace“ svalům ruky a říká jí, aby se pohnula tím či oním způsobem, a to podle zpětné vazby, kterou zprostředkovávají nervy v ruce. (Mozek přikazuje dlani, aby se sevřela; ruka sděluje, že je hrnek horký, načež mozek velí prstům pustit.) Tento proces, který se pořád dokola opakuje, je základem reflexů i učení. Dokonce i stroje se mohou prostřednictvím shromažďování zpětnovazebních informací „učit“.

Zásadní podobnost mezi člověkem a strojem spočívá podle Wiesnera v tom, že oba (tedy alespoň tehdy, jde-li o stroje „inteligentní“) mají schopnost věci uspořádat a získávat informace. Druhý termodynamický zákon praví, že soustavy mají sklon stát se neuspořádanými, statickými a co do chování předpověditelnými – tj. „entropickými“. Pokud je informace řádem, pak představuje opak k entropii; čím neuspořádanější a předpověditelnější je sdělení, tím má menší informační hodnotu. „Fráze,“ dokládá na příklad Wiener, „vás [také] osvítlí méně než slavné básně.“

Kybernetická teorie je základem pro novější studie v oblasti umělé inteligence. Umělá inteligence je možná do té míry, že lidské myšlení lze formálně modelovat – to znamená, že ho lze přeměnit v soubor jasných instrukcí pro zpracování informací.

2. INTELIGENTNÍ SNÍMAČ KE SLEDOVÁNÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ

Současné moderní třískové obrábění je orientováno na plnou automatizaci vlastního procesu řezání. Automatizaci výroby umožňuje použití vhodného monitorovacího systému vybaveného vhodným snímačem podle možnosti i více snímači, a dále i nezbytným vhodným programovým vybavením k včasnému a spolehlivému určení stavu řezného procesu a uskutečnění potřebných korekcí včas. Jednou z mnoha snímaných veličin může být signál akustické emise charakterizující stav opotřebení řezného nástroje [11]. Vyhodnocování nepřetržitě snímaného signálu by mělo být realizováno prostředky umělé inteligence např. umělou neuronovou sítí.

V publikacích předních odborníků [2, 8] se lze setkat s upozorněním na důležitost vhodného snímače jako nezbytné součásti monitorovacího systému. Avšak **moderní snímač pro moderní strojírenské celky by měl umět nejen zpracovávat signál, ale zároveň by měl obsahovat i matematický model uvádějící do vzájemného vztahu naměřené hodnoty s monitorovanými a řízenými proměnnými a dále by měl být vybaven i strategií nutnou pro zpracování získané informace v bloku rozhodování (decision maker).** Snímač s výše uvedenými vlastnostmi je často nazýván jako tzv. „inteligentní snímač“, a jako takový by měl blok snímače v sobě obsahovat více způsobností než jen prostý převodník s předzesilovačem v jednoduchém monitorovacím zařízení. Dornfeld v práci [2] píše: „...vskutku se zdá, že asi **nejdůležitějším prvkem snímačového systému je metodologie zpracování signálu pro získávání informací a pro správné rozhodování.**“ Je tedy potřeba zdůraznit, aby současný výzkum byl zaměřen na inteligentní snímačové systémy, popřípadě na vícesnímačové systémy pro monitorizaci procesů obrábění [8]. V technické praxi je používáno velké množství různých snímačů, proto aby byla pokryta celá šířka veličin charakterizujících technologické procesy, nejen obrábění. Jedním z mnoha je signál akustické emise [2, 7, 8, 11].

Termín inteligentní obrábění nebyl zatím zcela jasně definován a není ani ve výčtu odborného názvosloví pro projektování a činnost takovýchto systémů. V příspěvku [6] **Moriwaki rozlišuje inteligentní obráběcí stroj od stroje konvenčního na řízení**

založeném na „vlastním rozhodování“ jako protikladu k „předem zadaným příkazům“. Vedle toho zpětnou vazbu ze snímače procesu obrábění Moriwaki považuje za část adaptivně řízeného obráběcího stroje postaveném na předem zadaných příkazech. **Inteligentní obráběcí stroj musí být schopen zužitkovat zkušenosti a know-how nahromaděné během poslední operace, dále aplikovat vědomosti nahromaděné prostřednictvím procesu učení se a musí si umět poradit i s nejasným vstupem [2].**

3. PIEZOELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH FOLIÍ

Nezbytnou podstatou každého sofistikovaného snímače „konvečního“, ale i „inteligentního“ (vybaveného jednotkou zpracování informací a matematického aparátu uvádějícího do vzájemného vztahu naměřené hodnoty s monitorovanými a řízenými proměnnými) je kvalitní převodník mechanické veličiny (napětové vlny) do proporcionální veličiny elektrické. V oblasti snímačů akustické emise se dnes běžně používají snímače piezokeramické a na bázi piezokrystalu. S rozvojem nových materiálů přichází v úvahu využití piezoelektrických vlastností polymerních folií.

Polymery a polymerní fólie mají významné využití v mnoha oborech lidské činnosti. Např. speciální feroelektrické folie našly uplatnění v senzorové technice počínaje snímáním zvuku - směrové mikrofony přes hydrofonní aplikace - ultrazvukové hydrofony až po speciální ultrazvukové a defektoskopické snímače. Vynikají zde variabilitou tvaru a zvláště nízkou cenou. Nelze nepoznamenat, že u počátků výzkumů feroelektrického jevu, který byl poprvé pozorován již v roce 1921, stál ještě v bývalém Československu Antonín Glanc z Fyzikálního ústavu ČSAV, svými zahraničními kolegy nazýván Mr. Tandel, podle objevu, který nazval TANDEL - tepelně autostabilizující nelineární dielektrický element [9]. Jednalo se pokusy s monokrystalem feroelektrického triglycinsulfátu, který byl vyhřát na pracovní teplotu v okolí Curierova bodu přiložením vysokofrekvenčního pole.

Piezoelektrických vlastností polymerní folií je možné využít ve snímání akustické emise (AE) jako převodníku mechanické povrchové vlny na signál elektrický. Výborné vlastnosti má komerční kopolymer vinyldifluórethylénu (VDF) a trifluórethylénu (TrFE) ve formě P(VDF₇₅/TrFE₂₅) polarizovaných koronovým výbojem. Kopolymerní fólie díky svému nerezonančnímu charakteru vynikají velikou šířkou pracovního frekvenčního pásma v porovnání s materiály piezokeramickými, popřípadě monokrystaly. Bylo provedeno srovnání piezokeramického převodníku AE na bázi keramiky složené z titaničitanu zirkoničitanu olovnatého Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (PZT) s fóliovým převodníkem vyrobeným z P(VDF₇₅/TrFE₂₅) kopolymeru.

4. VLASTNOSTI POLYMERŮ

Piezoelektrické polymery mají následující charakteristiky [3]: nízkou permitivitu ϵ a vysoký piezoelektrický napětový koeficient g [1]. Jejich nízká hustota a vysoká poddajnost vede k dobrému akustickému impedančnímu přizpůsobení s vodou. Díky svému nízkému mechanickému faktoru kvality Q_M mají široké rezonanční spektrum.

5. PIEZOELEKTRICKÝ PŘEVODNÍK NA BÁZI AKCELEROMETRU

Realizace piezoelektrického snímače akustické emise je založena na principu akcelerometru [3] a je schematicky znázorněna na obr. 1. Při určování odezvy snímače vycházíme ze zjednodušeného předpokladu harmonické mechanické vlny [10]. Harmonické mechanické buzení s úhlovou frekvencí ω vyvolá zrychlení a tělesa hmotnosti M dané druhou derivací okamžité výchylky:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = -\omega^2 D_0 \sin \omega t = a \quad (1)$$

kde D je okamžitá výchylka a D_0 amplituda kmitu.

Plošné mechanické napětí X aplikované na piezoelektrický element s plochou S při dané zatěžovací hmotnosti M můžeme vyjádřit pomocí:

$$X = \frac{M \cdot a}{S} = M \left(\frac{d^2 D}{dt^2} \right) / S = -(\omega^2 D_0 M / S) \sin \omega t \quad (2)$$

a generované elektrické pole je: $E = g \cdot X = -(\omega^2 D_0 M g / S) \sin \omega t$, (3)

kde g je piezoelektrický napěťový koeficient.

Amplituda výstupního napětí U_0 na piezoelektrickém elementu tloušťky h je pak [3]:

$$U_0 = h E_{max} = \omega^2 D_0 M g h / S. \quad (4)$$

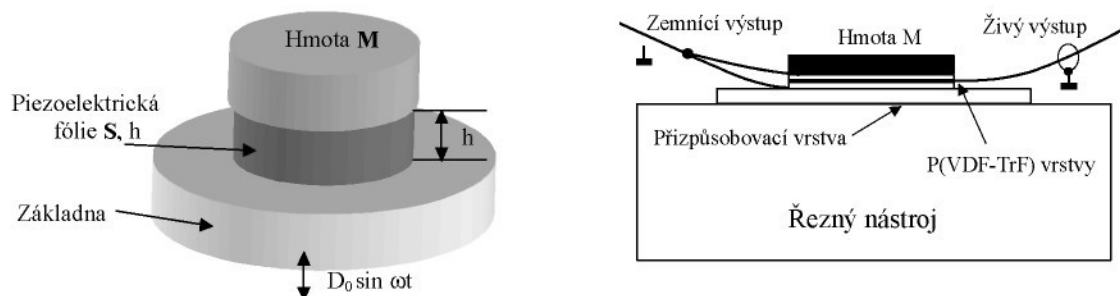
Pro potlačení vlivu vlastní kapacity snímače, která snižuje nejvyšší měřitelnou frekvenci, je vhodnější měření indukovaný náboj v zapojení nakrátko ($E = 0$):

$$Q = d_{33} \cdot X = -(\omega^2 D_0 M d_{33} / S) \sin \omega t, \quad (5)$$

kde d_{33} je piezoelektrický koeficient.

V technické praxi je snadnější měření proudu I :

$$I = \frac{dQ}{dt} = -(\omega^3 D_0 M d_{33} / S) \cos \omega t \quad (6)$$



Obr. 1. Teoretická a praktická realizace piezoelektrického snímače

Fig. 1. Theoretical and practical realization of piezoelectric sensor

5. 1. AKUSTICKÉ PŘÍZPŮSOBENÍ

Pro akustické impedanční přizpůsobení foliového senzoru ocelovému řeznému nástroji slouží skleněná destička, tzv. matching layer. Pro výpočet akustické impedance a vlastní tloušťky přizpůsobovací skleněné destičky jsme užili následujících vztahů [10]:

Impedance a tloušťka přizpůsobovací mezivrstvy L :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}, \quad L = \frac{c_2}{4f_0}, \quad (7)$$

kde Z_1 je akustická impedance snímaného objektu, Z_2 - akustická impedance přizpůsobovací vrstvy (matching layer), Z_3 - akustická impedance vlastního snímače, c_2 je akustická rychlost v mezivrstvě a f_0 je rezonanční frekvence snímače.

6. PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vlastní umístění převodníků bylo pro případ prvního zkušebního prototypu konstrukčně realizováno na vnější zadní stranu tělesa soustružnického nože (viz obr. 2), která byla pečlivě zbroušena a vylapována na drsnost $R_a = 0,062 \text{ } [\mu\text{m}]$. Zároveň bylo dbáno aby během broušení nedošlo k tepelnému ovlivnění obráběné plochy. Mezivrstvou snímače mezi vlastním foliovým převodníkem a ocelovým podkladem (ČSN 15 230) tvoří skleněná destička. Elektrody z folie byly připojeny stříbrnými drátky na kontaktní desku. Signál byl veden koaxiálními kabely k měřicí aparatuře. Propojení bylo realizováno standardními BNC konektory (viz obr. 2).

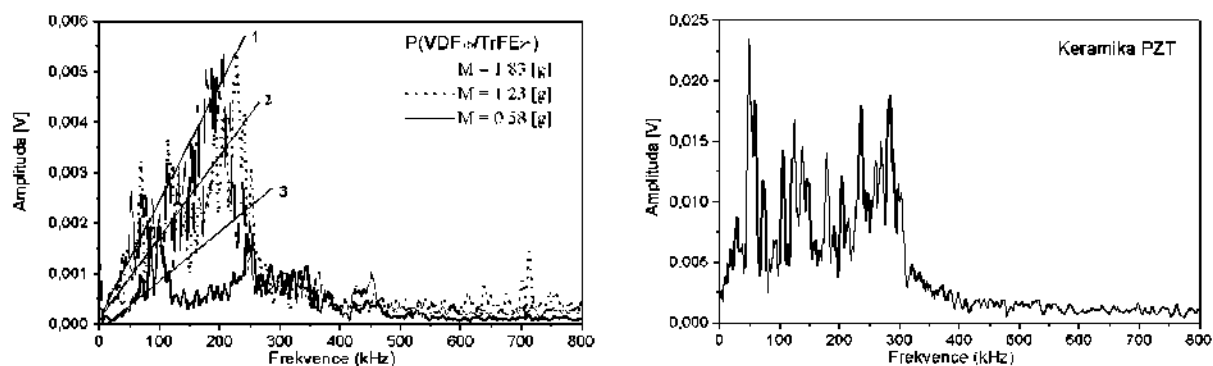
Použité převodníky se vyznačují poměrně výrazným a širokým rozsahem registrovaných frekvenčních pásem do 500 kHz, což ilustruje obr. 3, přičemž větší odezvu lze pozorovat do frekvence 250 kHz. Podle očekávání s rostoucí zatěžovací hmotností klesá dolní frekvence získaného frekvenčního pásma. Toto chování plyne i z teoretického vztahu (6). Při vyšších použitých hmotnostech vzrostla citlivost i ve středních frekvencích akustické emise - oblast kolem 450 kHz. Je pozorován nárůst amplitudy v oblasti 700 [kHz] zejména pro střední zatěžovací hmotnost. Tato úzká frekvenční oblast je pravděpodobně rezonanční a je způsobena rozměrovou shodou vlnové délky povrchové vlny a velikostí vlastního piezoelektrického elementu převodníku.



Obr. 2. Pohled na těleso soustružnického nástroje s převodníky akustické emise a kabeláží

Fig. 2. View of turning tool body with the acoustic emission transducers and cabling

V případě převodníku zhotoveného z PZT keramiky bylo získáno obdobné frekvenční spektrum. Vzhledem k výrazně větší velikosti hodnoty piezoelektrického koeficientu d_{33} piezokeramiky je i citlivost daného převodníku vyšší. Relativně nižší citlivost folie z kopolymeru $P(\text{VDF}_{75}/\text{TrFE}_{25})$ není závažná a lze v současnosti řešit buď konstrukčně nebo elektronicky.



Obr. 3. Srovnání snímačů s různou zatěžovací hmotností M s měničem keramickým
 Fig. 3. The comparison foil sensors with various damping mass and a ceramic one

7. ZÁVĚR

Z výsledků provedených experimentálních sledování na realizovaných převodnících je zřejmé, že naměřená frekvenční spektra vynikají širokým frekvenčním rozsahem. Tato vlastnost předurčuje využití převodníků z folie na bázi kopolymerního P(VDF₇₅/TrFE₂₅) zejména pro snímače akustické emise, které pracují v širokém pásmu frekvencí. Pozorovali jsme také vliv zatěžovací hmotnosti na frekvenční charakteristiku snímače v nízkofrekvenční oblasti. Pokles citlivosti snímače s nejnižší zatěžovací hmotností ve středofrekvenční oblasti je zřejmě způsoben nedokonalostmi při výrobě převodníku.

Použití polymerních folií pro konstrukci snímače nebo převodníku, který by byl součástí tzv. inteligentního řezného nástroje se jeví jako perspektivní. Realizace vlastního snímače jako integrální součásti homogenního tělesa řezného nástroje si však vyžádá další hledání vhodného uspořádání a umístění. Daný příspěvek svými relativně optimistickými výsledky ukazuje, že započatá cesta vývoje převodníku AE, jako jednoho ze snímačů inteligentního řezného nástroje, se ubírá pravděpodobně správným směrem.

Poznámka: Tento příspěvek souvisí s řešením výzkumného projektu MSM 4674788501, který je finančně podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a grantu GACR 202/03/0569.

Literatura

- [1] ANSI / IEEE 176-1987. *IEEE Standard on Piezoelectricity*. 1988.
- [2] DORNFELD, D.: *Monitoring Technologies for Intelligent Machining*. VDI Berichte. Nr. 1179, 1995, p. 71-90.
- [3] <http://www.ultrasonic.com>.
- [4] KEPLER R. G. and ANDERSON R. A.: *Ferroelectric polymers. Advances in Physics*, 1992, Vol. 41, No. 1, 1-57
- [5] MACRONE, M.: *Od Aristotela k virtuální realitě*. 1. vyd. Praha, BRÁNA – Knižní klub 1999, 224 s. ISBN 80-7243-055-6
- [6] MORIWAKI, T.: *Intelligent Machine Tool: Perspective and Themes for Future Development*. In: *Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 2, PED-Vol. 68-2, New York. ASME 1994, p. 841-849.

- [7] POPPEOVÁ, V.: *Cutting Tool Condition Monitoring*. In: 25th European Conference on Acoustic Emission Testing – EWGAE 2002. ČNDT, Prague, 11-13 September 2002. p. II/69-II/76. ISBN 80-214-2174-6
- [8] SHIRAIISHI, M.: *On-Line Measurement and Control in Production Engineering and Mechatronics* – Lecture Note 1993-1994, Ibaraki University, Hitachi 1993. 251 p.
- [9] TANDEL. *Amatérské radio*, XIII, 1964, č. 2, str. 35-38.
- [10] ZELENKA J.: *Piezoelektrické rezonátory a jejich použití*. Praha, Academia 1983, 256 s.
- [11] ŽÍŽKA, J.: *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. 1. vyd. Liberec, TU Liberec - FS 2003. 106 s. ISBN 80-7083-687-1

New Generation Design of Acoustic Emission Sensors for Cutting Process Monitoring

Prof. Jan Žížka, MSc., PhD., Zdeněk Motyčka, RNDr. Petr Hána*, PhD., Lenka Hamplová

Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering, Technical University of Liberec

* Department of Physics, Pedagogical Faculty, Technical University of Liberec
Hálkova 6, 461 17 Liberec, Czech Republic
Jan.Zizka@vslib.cz Petr.Hana@vslib.cz

Key words: monitoring, intelligent cutting tool, acoustic emission sensor, transducer, copolymer foil

Abstract

Development of modern industrial consumer **society is aimed at** replacement of people in production by machines. It is fundamental for production without present human operators to equip machinery by artificial receptors that would conduct data acquisition for evaluation and determination feedback reaction using suitable decision unit. One of the possible sensing quantities might be a signal of the acoustic emission. This conception so-called intelligent cutting tool presumes using miniature high sensitive sensors built in body edge tools. Contribution deals with possibility of practical use and utilizes piezoelectric properties of copolymer foil for sensor of acoustic emission as a converter of mechanical surface wave to electric signal.

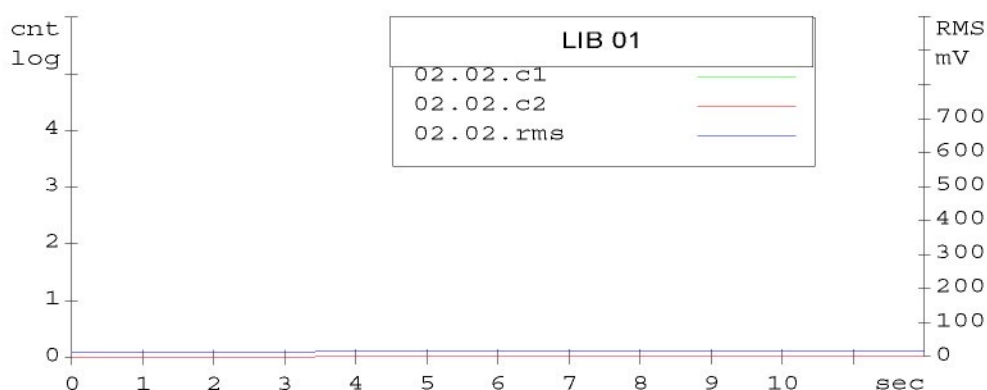
Commercial copolymer vinylidene fluoride (VDF) and trifluoroethylene (TrFE) at composition $P(VDF_{75}/TrFE_{25})$ polarized corona discharge has excellent characteristics. Copolymer foil thanks his nonresonance character excels by large widths of working frequency band in comparison to piezoceramic material, eventually single crystals. We realized in this work comparison of piezoceramic converter AE based on ceramics composed from lead zinc titanate $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PZT) with foil converter made from $P(VDF_{75}/TrFE_{25})$ copolymer.

Realization of piezoelectric sensors of the acoustic emission is based on principle of accelerometer and it is schematically plot on Fig. 1. Own placing of the converters was in the case of the first test prototype realized on outer back of the body tool (see Fig. 2). Self-made converters are characterized by relatively flat and wide frequency range of working frequencies up to 500 kHz, which illustrates Fig. 3.

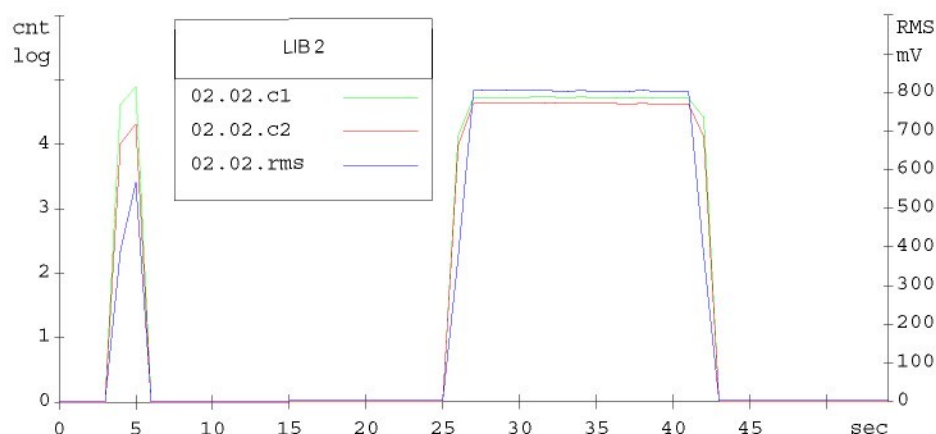
From results performed experimental observations on realized converters is clear, that measured frequency spectrums excel by broad frequency bandwidth. These properties designate utilizing foil converter based on copolymer $P(VDF_{75}/TrFE_{25})$ especially for scanners acoustic emission working in a wide frequency range. We also observed the influence loading weight on frequency characteristic of converter in low frequency range. A drop in sensitivity of sensor with the lowest load mass in middle frequency range was due to imperfection during **manufacturing of** the converter.

Applications of polymeric foils for construction sensors or converters that would be a component of so-called intelligent cutting tools show to be perspective. Realization of the chip (itself) sensor like an integral part of the massive body cutting tool however claims the further search for suitable configuration and placing. The presented contribution shows by its relatively optimistic results, that started way of development AE converter, like one from the sensor set of the intelligent cutting tool, follows one of the right directions in process monitoring.

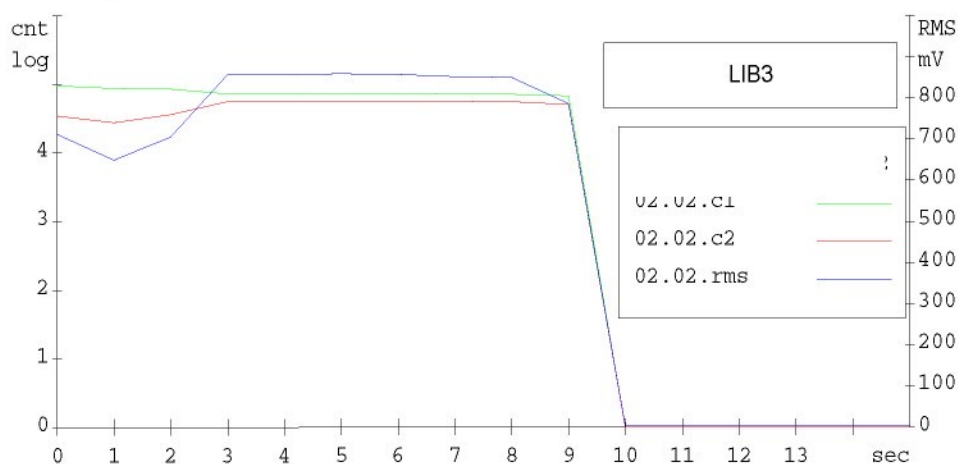
Přehled provedených měření



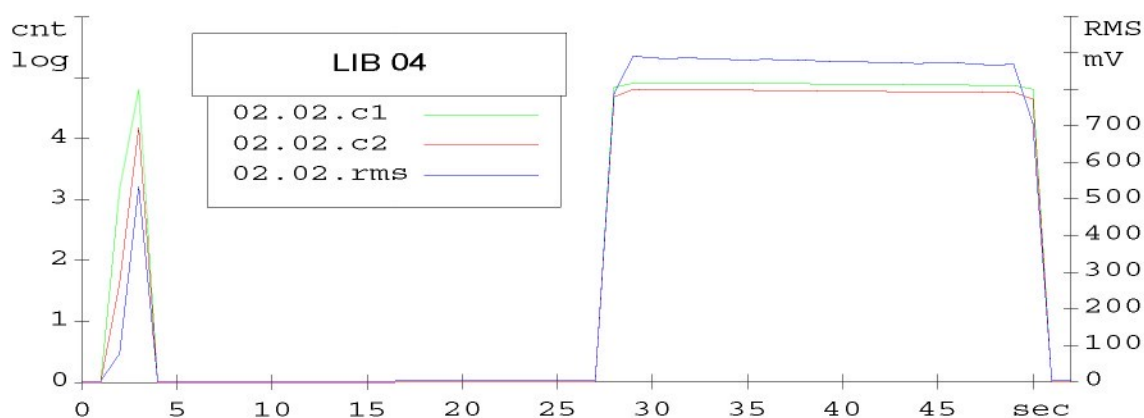
Obr. 1 Grafický výsledek měření označeného LIB 01. Měření šumu. Podmínky měření: $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm]



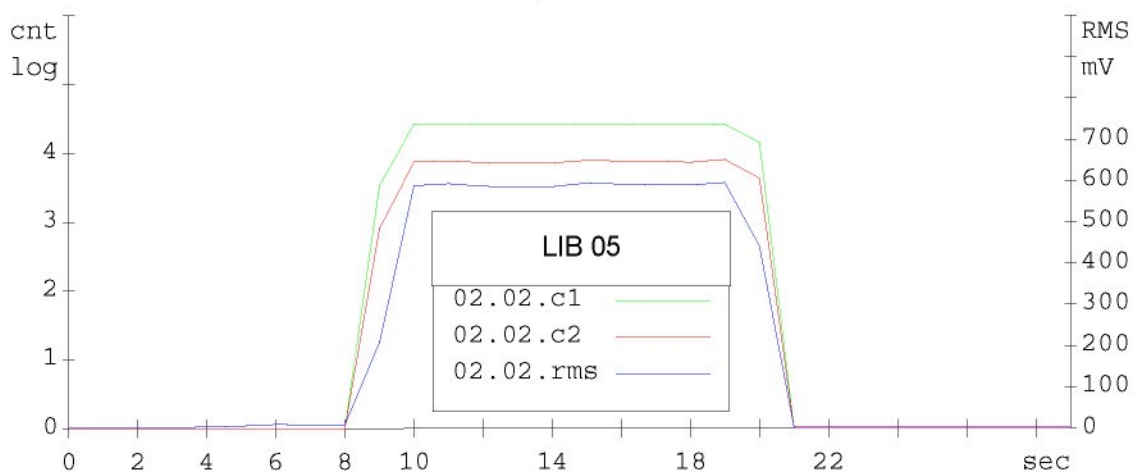
Obr. 2 Grafický výsledek měření označeného LIB 02. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **litina** 42 2306



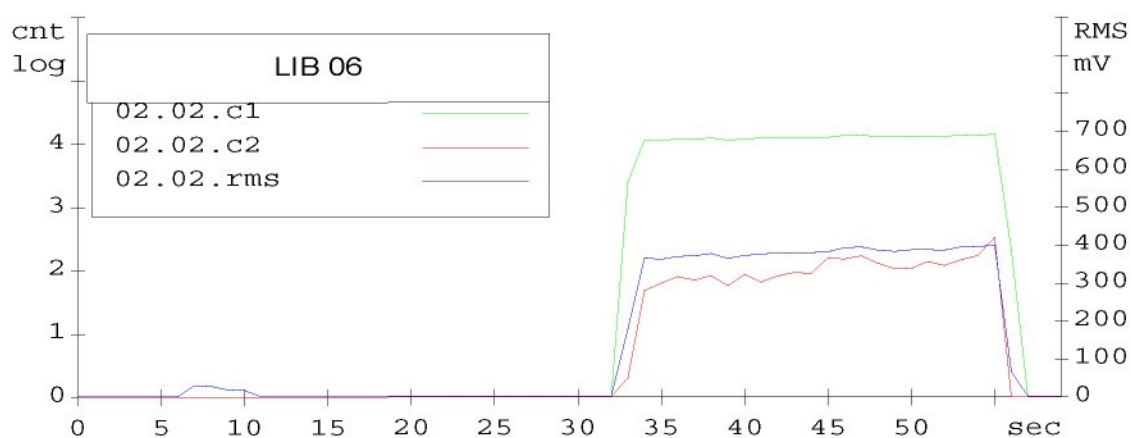
Obr. 3 Grafický výsledek měření označeného LIB 03. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **litina** 42 2306



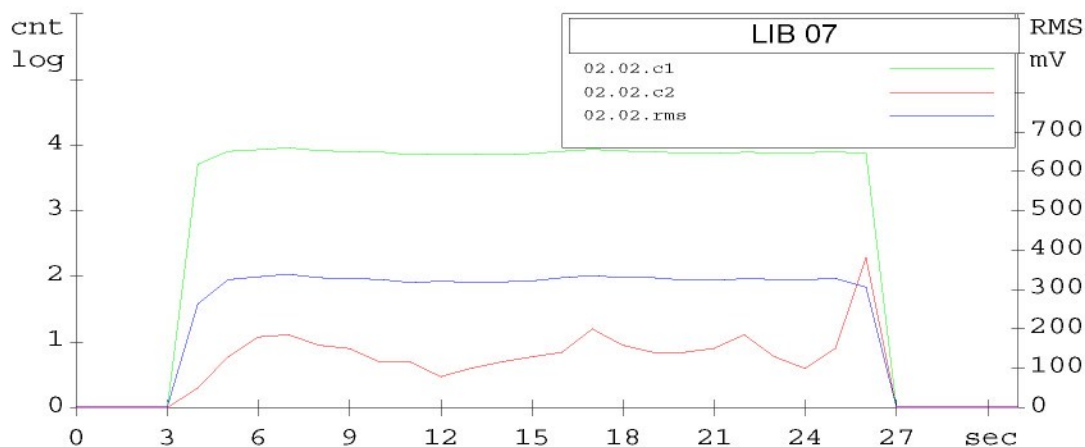
Obr. 4 Grafický výsledek měření označeného LIB 03. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **litina 42 2306**



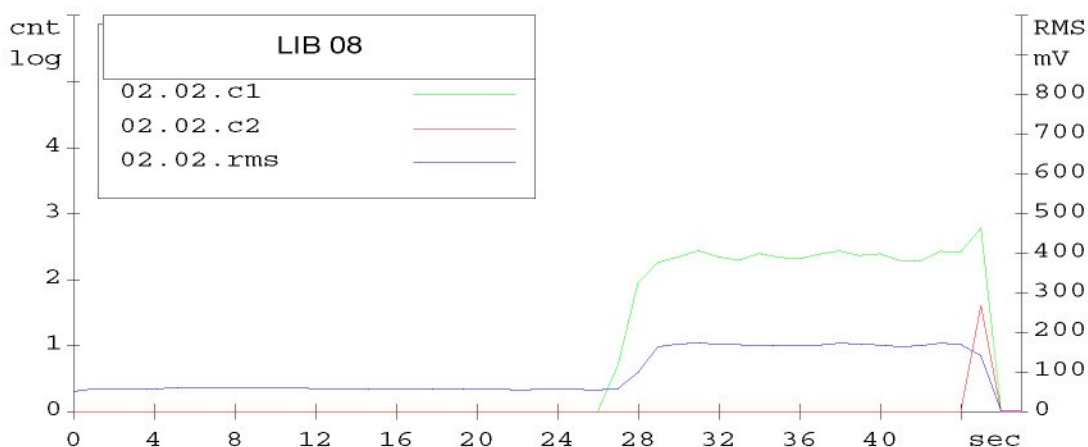
Obr. 5 Grafický výsledek měření označeného LIB 05. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **litina 42 2306**



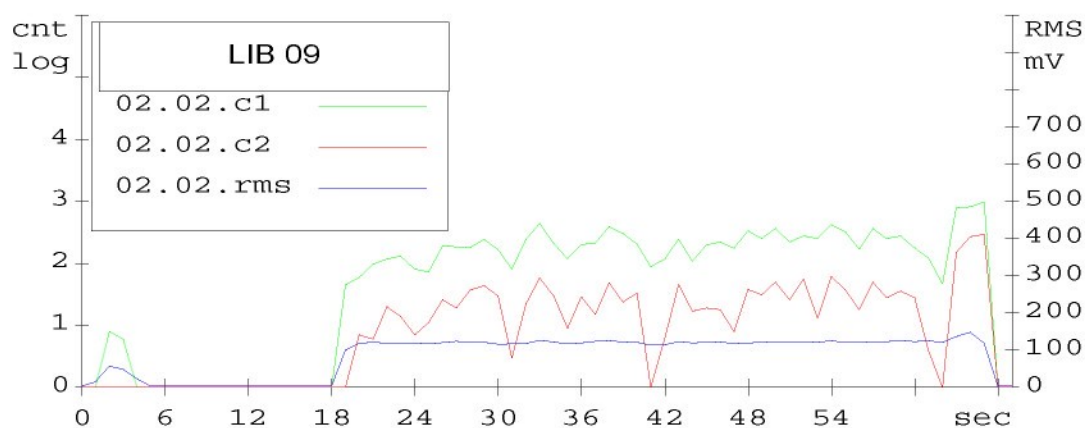
Obr. 3 Grafický výsledek měření označeného LIB 03. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **litina 42 2306**



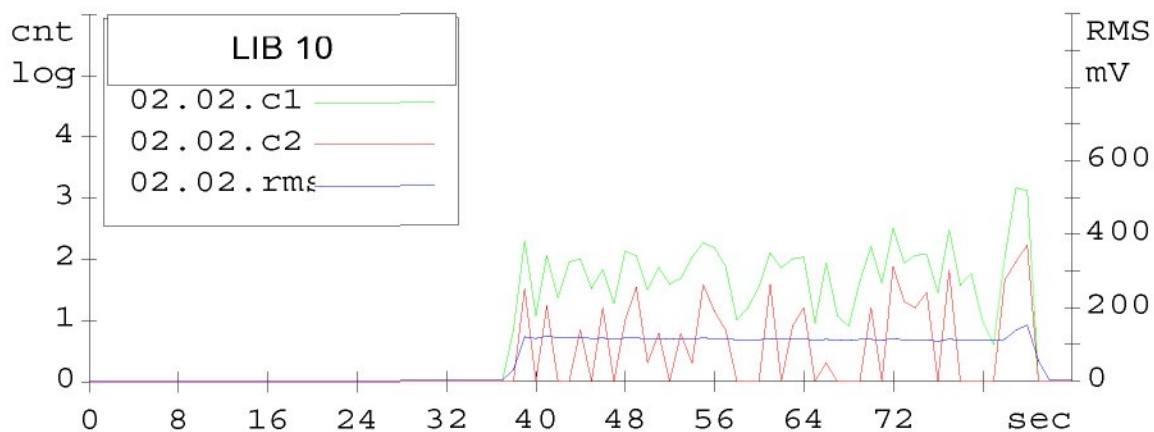
Obr. 7 Grafický výsledek měření označeného LIB 03. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **litina 42 2306**



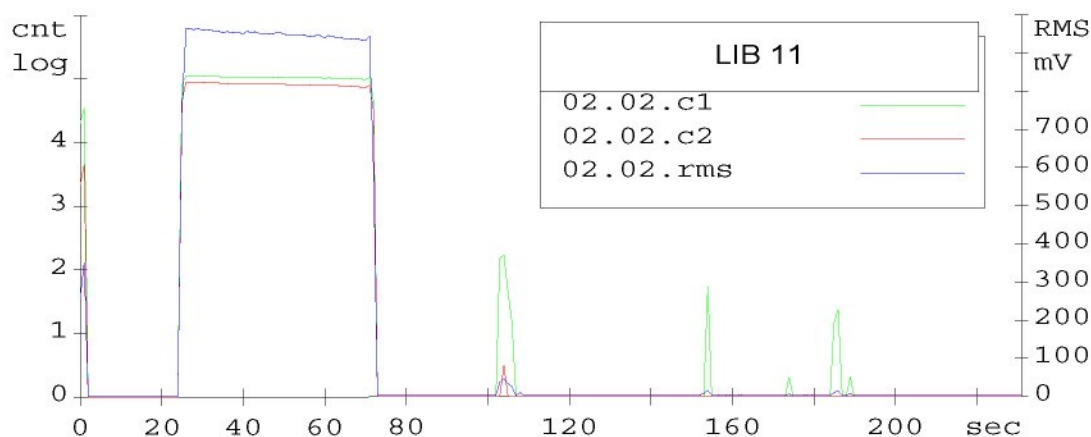
Obr. 8 Grafický výsledek měření označeného LIB 08. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 0$ a 10 [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel 12 050.1**



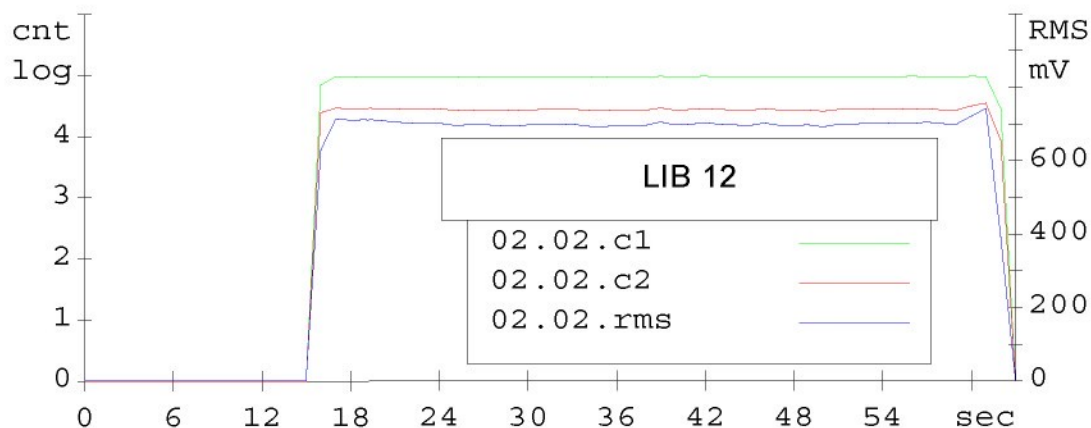
Obr. 9 Grafický výsledek měření označeného LIB 09. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 1120$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **litina 42 2306**



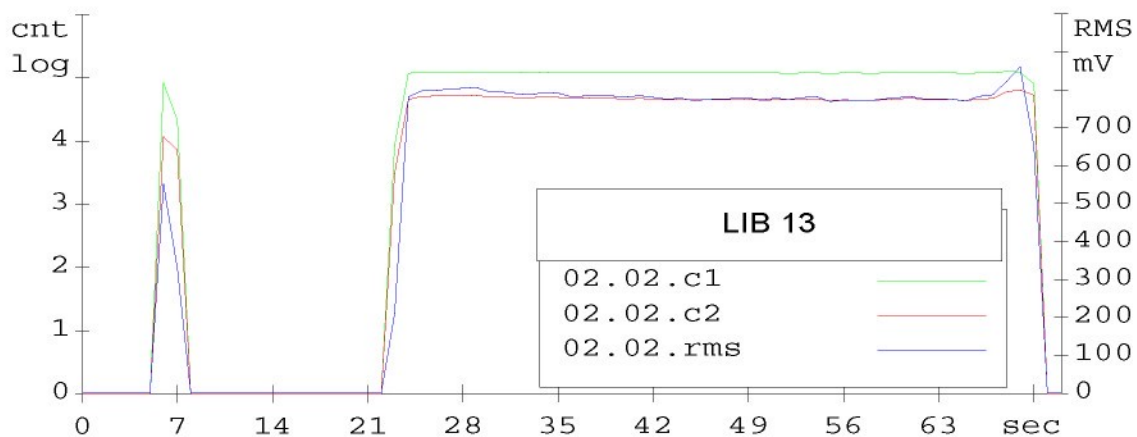
Obr. 10 Grafický výsledek měření označeného LIB 10. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **ocel** 12 050.1



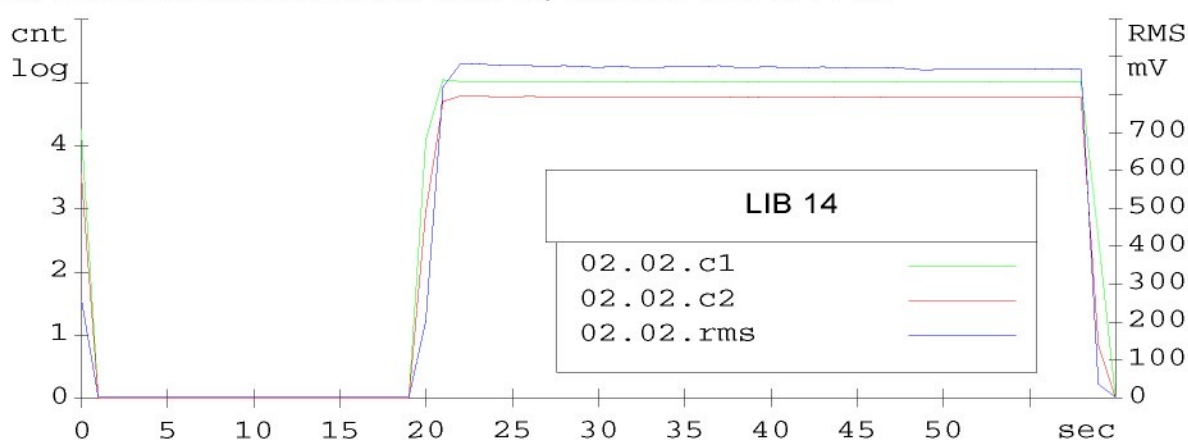
Obr. 11 Grafický výsledek měření označeného LIB 11. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** 12 050.1



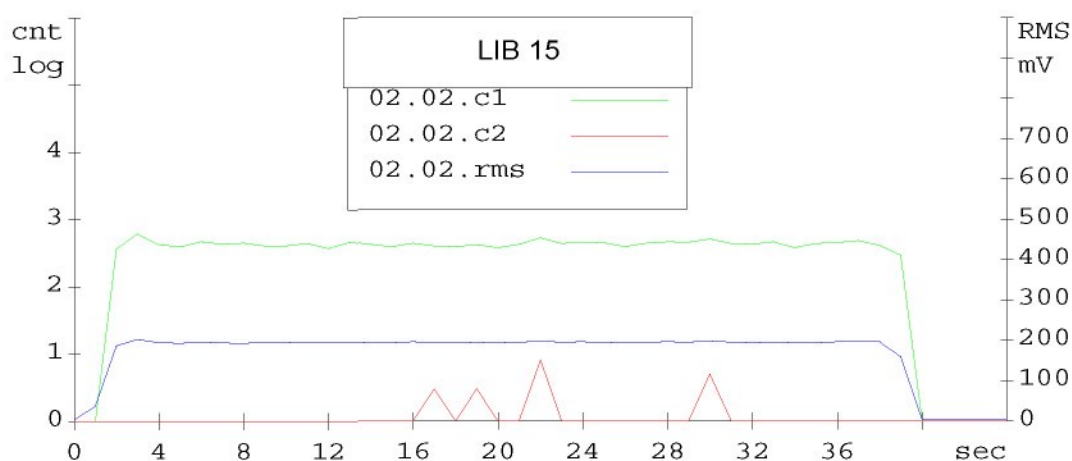
Obr. 12 Grafický výsledek měření označeného LIB 12. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **ocel** 12 050.1



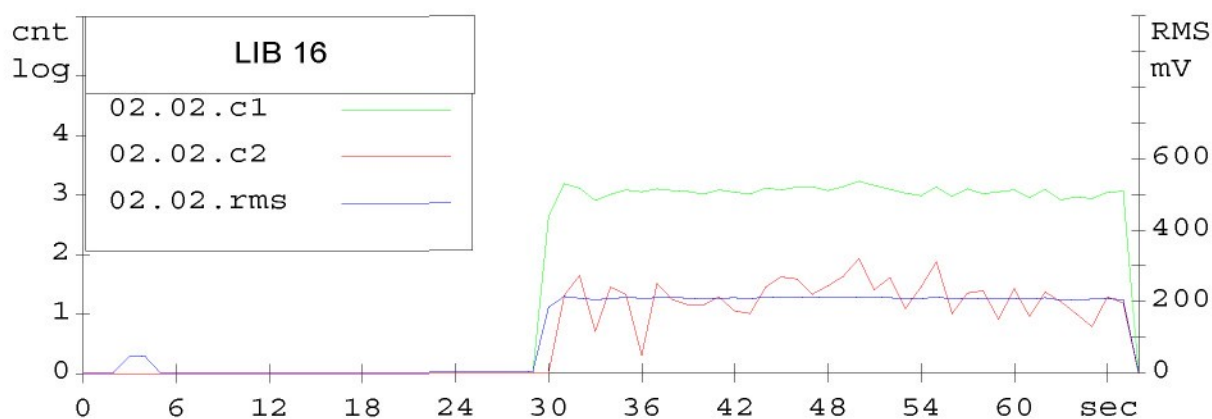
Obr. 13 Grafický výsledek měření označeného LIB 13. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel 12 050.1**



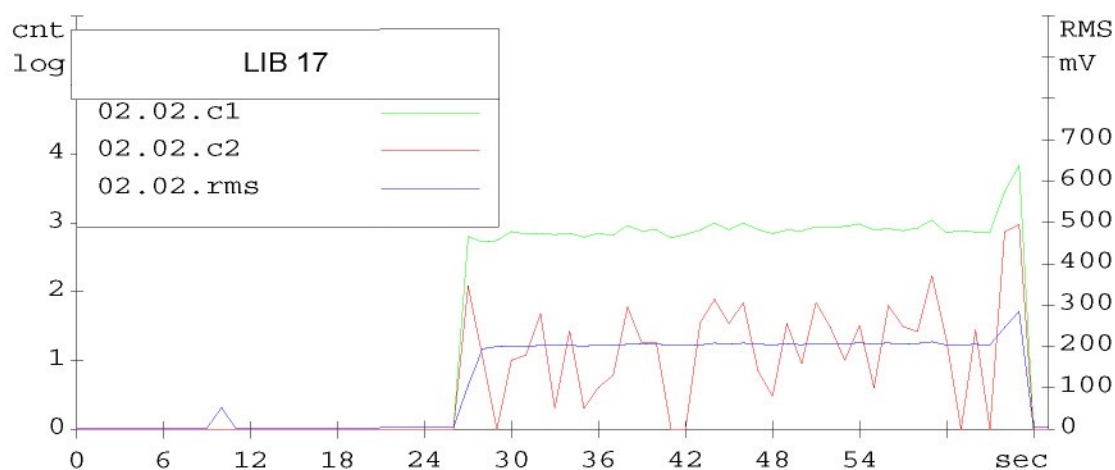
Obr. 14 Grafický výsledek měření označeného LIB 14. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel 12 050.1**



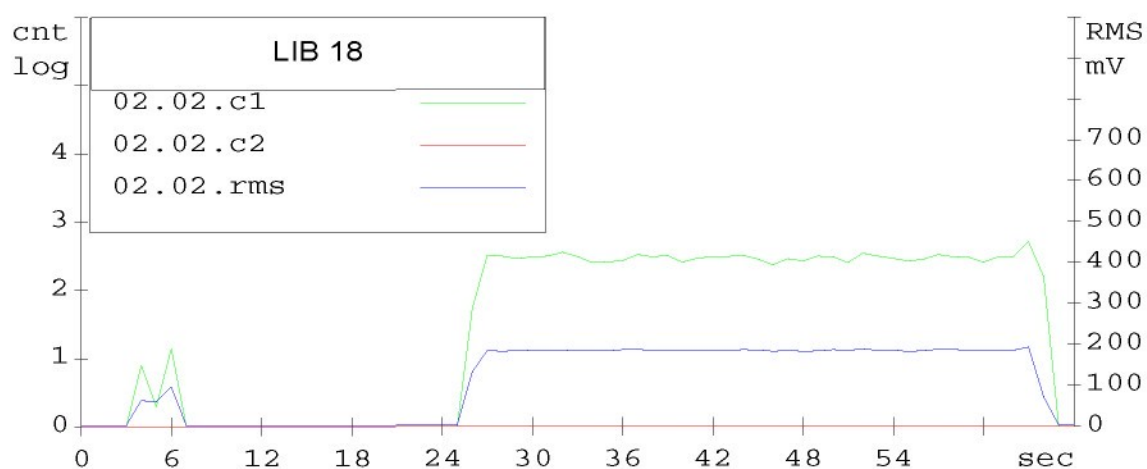
Obr. 15 Grafický výsledek měření označeného LIB 15. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **ocel ČSN 12 050.1**



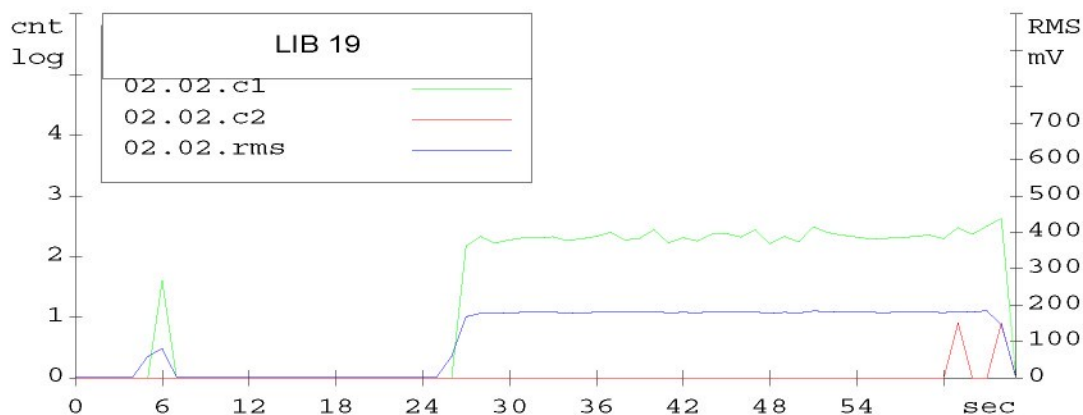
Obr. 16 Grafický výsledek měření označeného LIB 16. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



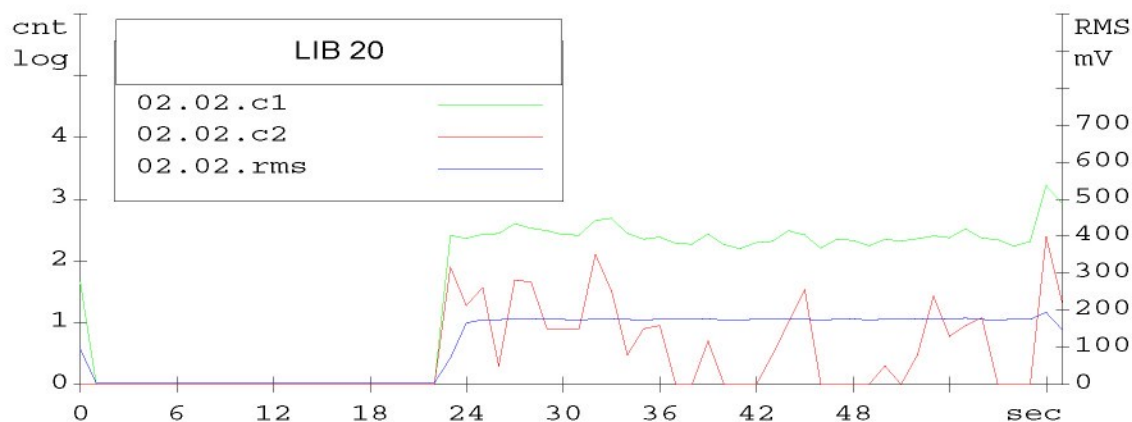
Obr. 17 Grafický výsledek měření označeného LIB 17. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



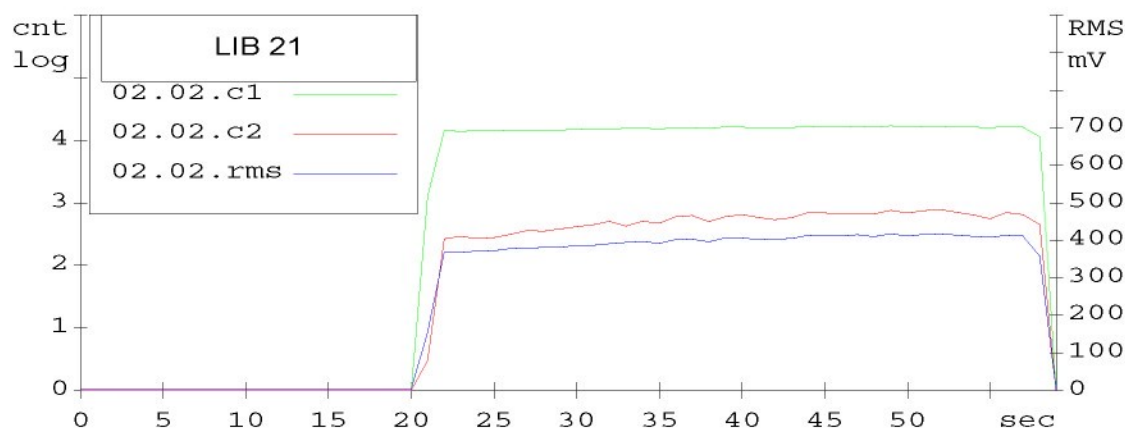
Obr. 18 Grafický výsledek měření označeného LIB 18. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



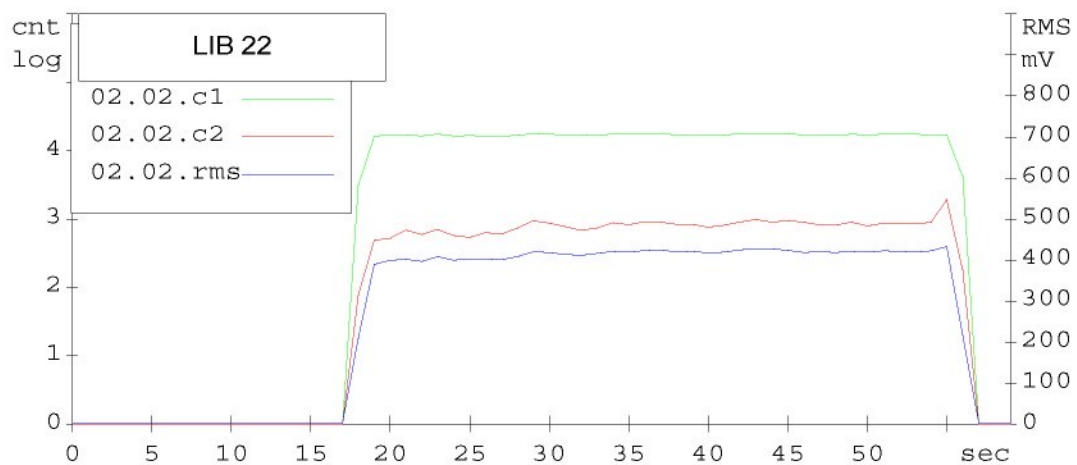
Obr. 19 Grafický výsledek měření označeného LIB 19. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



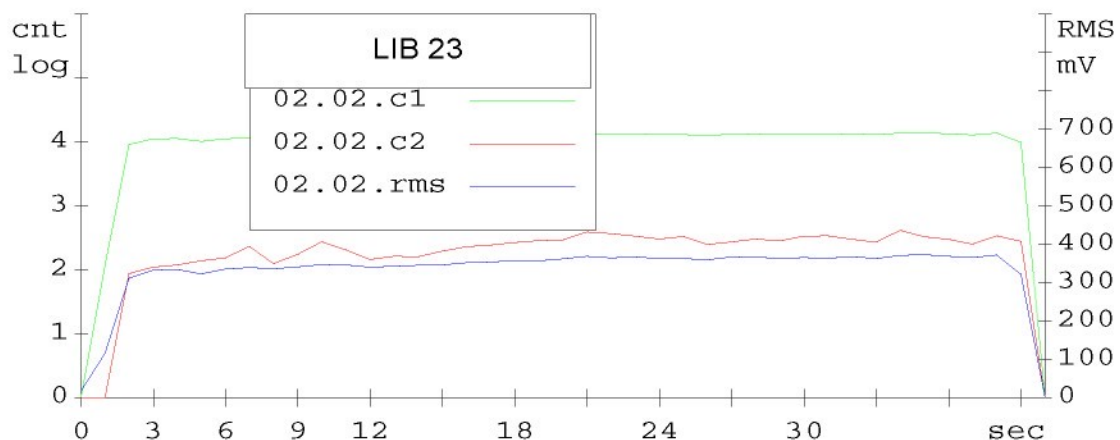
Obr. 20 Grafický výsledek měření označeného LIB 20. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



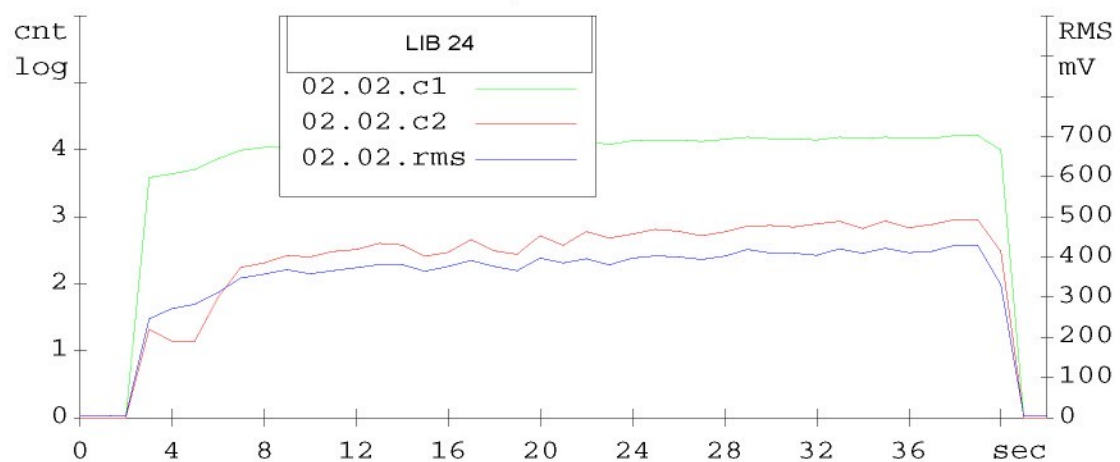
Obr. 21 Grafický výsledek měření označeného LIB 21. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



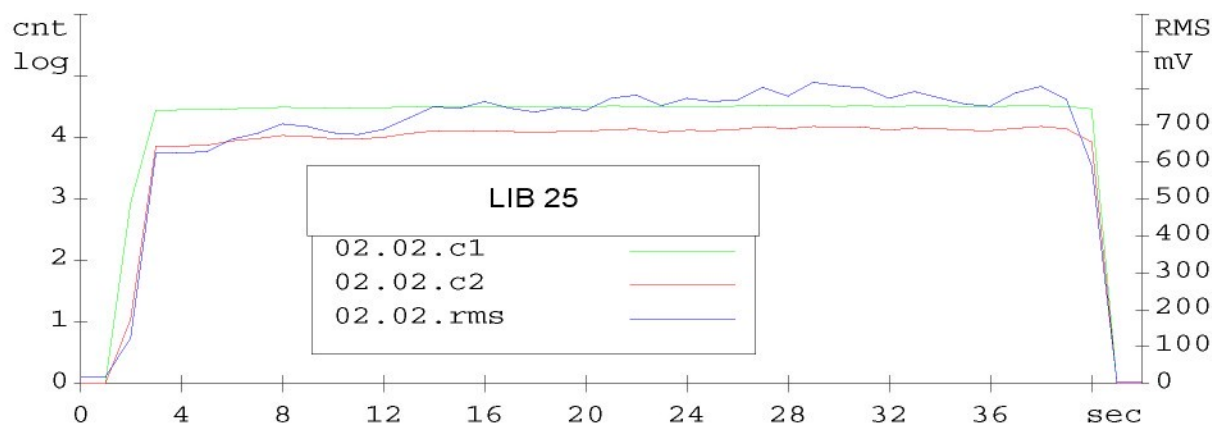
Obr. 22 Grafický výsledek měření označeného LIB 22. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



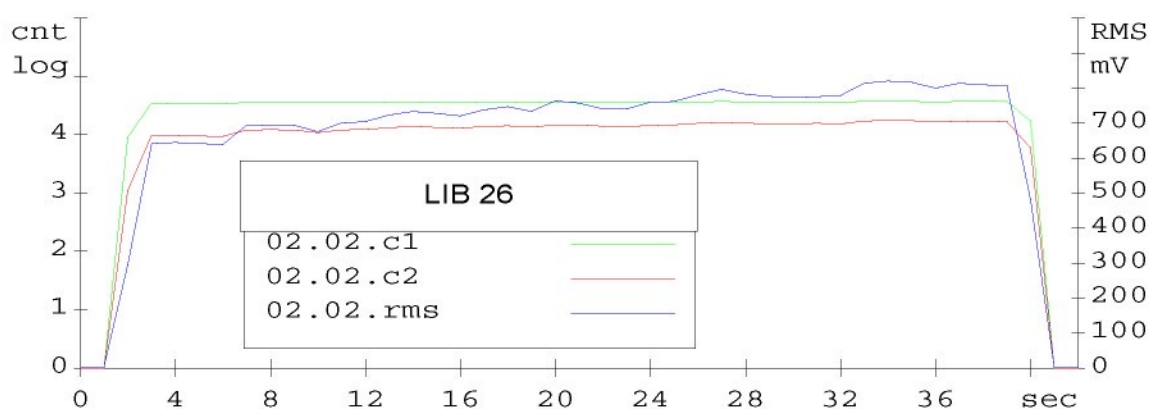
Obr. 23 Grafický výsledek měření označeného LIB 23. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



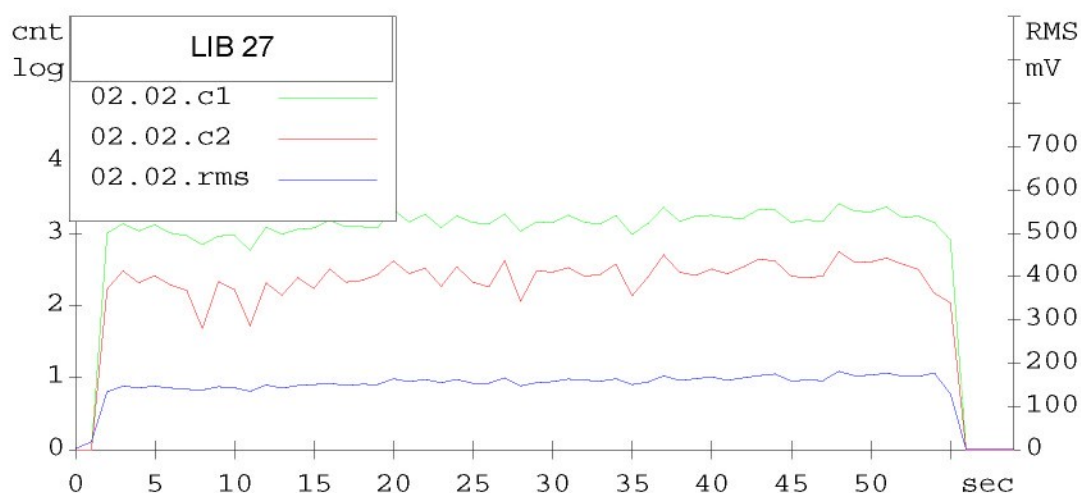
Obr. 24 Grafický výsledek měření označeného LIB 24. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,1$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



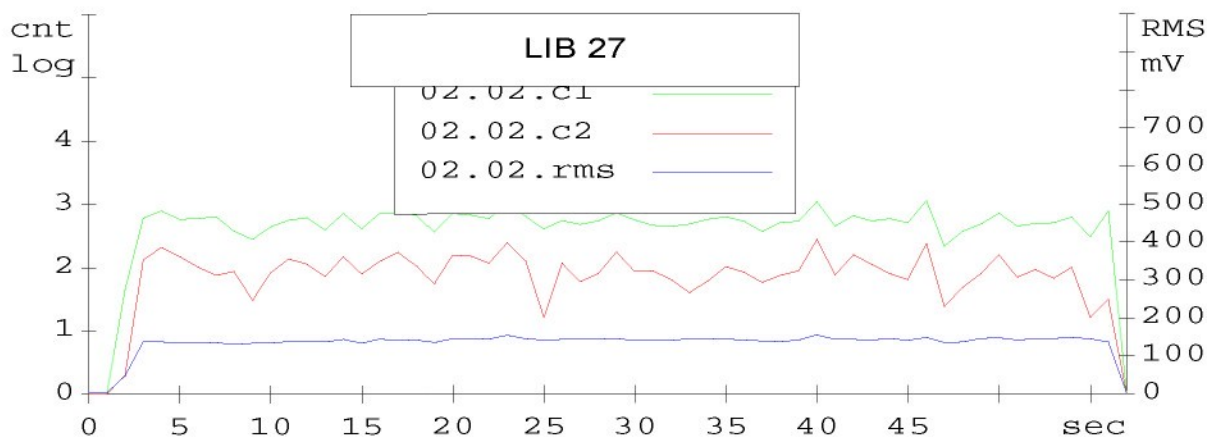
Obr. 25 Grafický výsledek měření označeného LIB 25. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,2$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



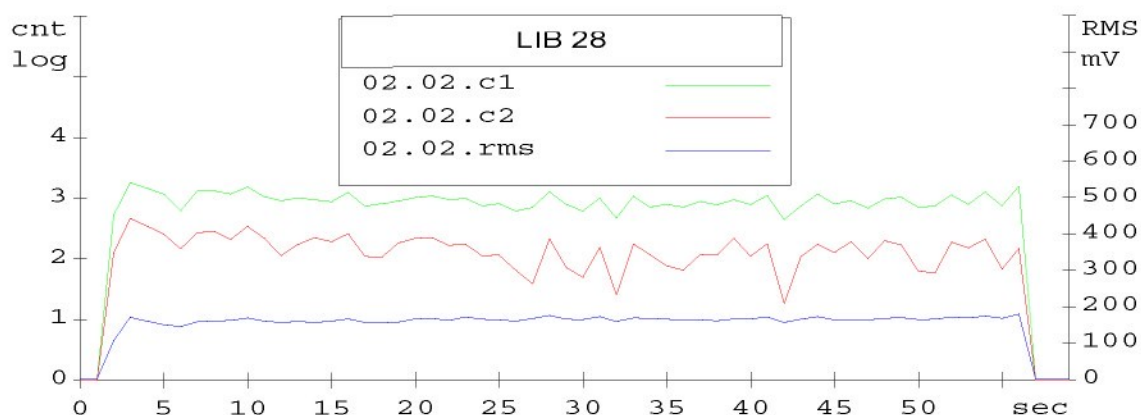
Obr. 26 Grafický výsledek měření označeného LIB 26. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **ocel** ČSN 12 050.1



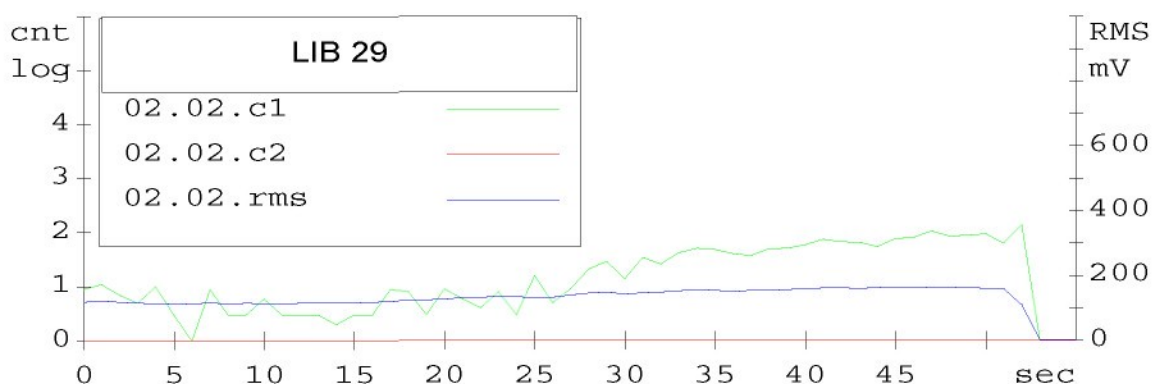
Obr. 27 Grafický výsledek měření označeného LIB 27. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 15$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



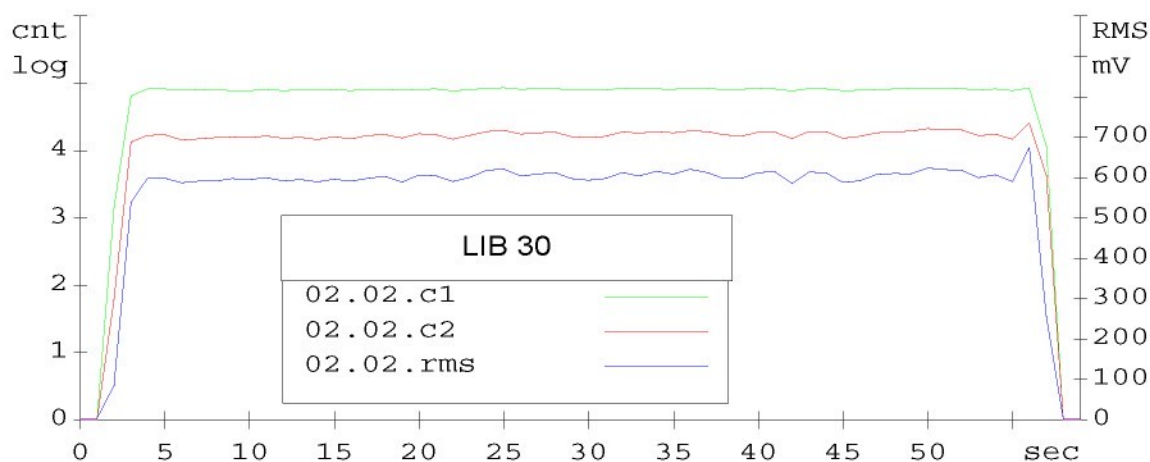
Obr. 28 Grafický výsledek měření označeného LIB 28. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



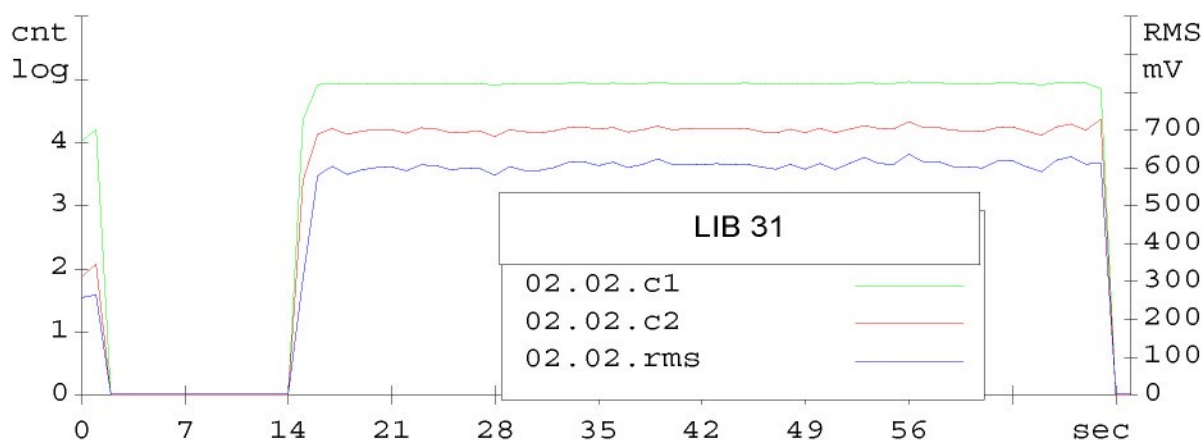
Obr. 29 Grafický výsledek měření označeného LIB 29. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 10$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



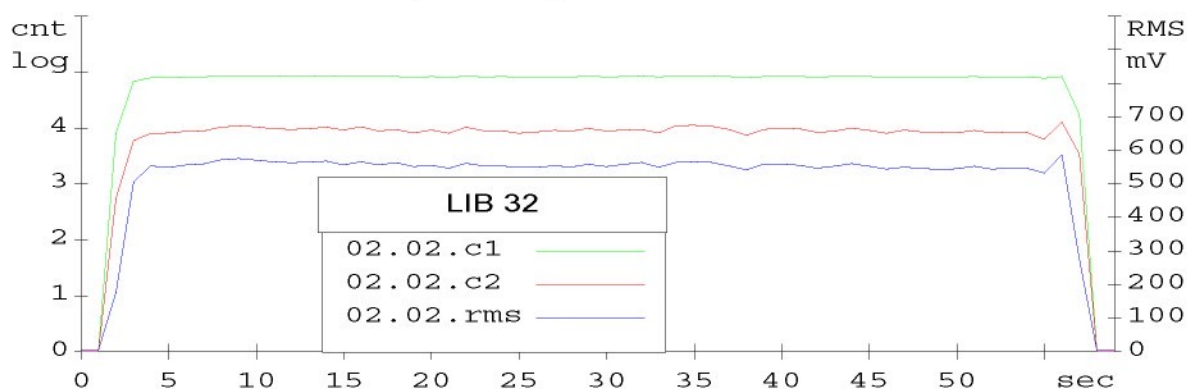
Obr. 30 Grafický výsledek měření označeného LIB 30. Podmínky měření: **PVDF** fóliový převodník, $A_u = 15$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



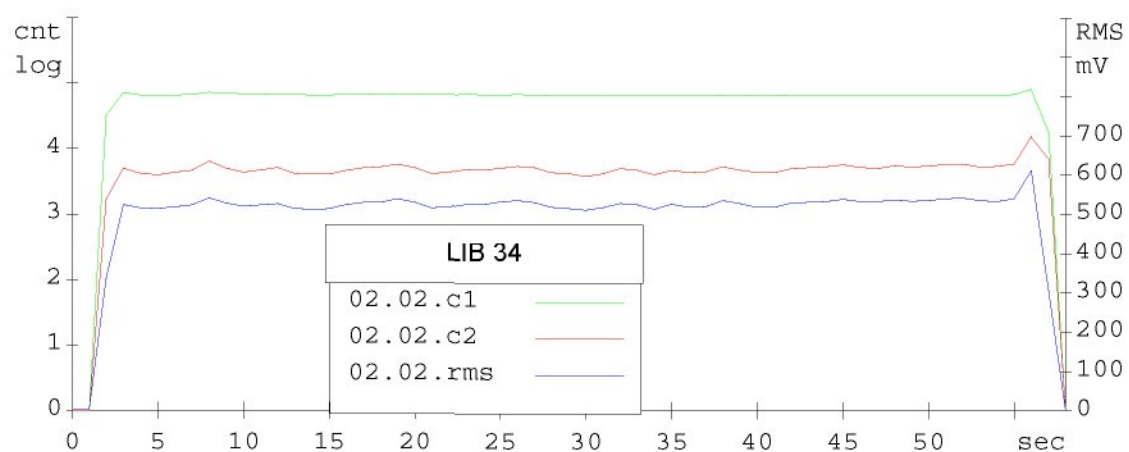
Obr. 31 Grafický výsledek měření označeného LIB 31. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **nová** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



Obr. 32 Grafický výsledek měření označeného LIB 32. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **mírně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



Obr. 33 Grafický výsledek měření označeného LIB 33. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **středně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**



Obr. 34 Grafický výsledek měření označeného LIB 34. Podmínky měření: **piezokeramický** převodník, $A_u = 0$ [dB], $f = 0,42$ [ot/min], $n = 560$ [ot/min], $a_p = 0,4$ [mm], **silně opotřebovaná** břitová destička, obráběný materiál **mosaz**

Tabulka 1 Datový průběh měření LIB 01 v časové posloupnosti.

JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOSTI		
caunt 1	caunt 2	RMS
0	0	15,303
0	0	15,232
0	0	15,203
0	0	15,272
0	0	15,346
0	0	15,26
0	0	15,21
0	0	15,241
0	0	15,303
0	0	15,3
0	0	15,306
0	0	15,382
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
0	0	15

JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOSTI		
caunt 1	caunt 2	RMS
0	0	3,27
0	0	3,27
0	0	3,272
0	0	3,325
41459	10299	391,286
78149	20636	568,002
0	0	3,27
0	0	3,269
0	0	3,267
0	0	3,266
0	0	3,266
0	0	3,265
0	0	3,266
0	0	3,267
0	0	3,265
0	0	3,264
0	0	3,265
0	0	3,266
0	0	3,266
0	0	3,267
0	0	3,265

0	0	3,267
0	0	3,265
0	0	3,265
0	0	3,266
0	0	3,268
13455	9370	371,764
52925	43194	804,877
52756	43152	806,835
52966	42960	806,477
52793	43013	804,453
53351	43220	805,236
53579	43293	804,667
53024	42957	801,969
53444	43119	805,112
52688	42701	801,734
52608	42561	801,41
51683	42119	801,818
52637	42575	806,462
51466	41928	802,16
51683	42166	801,954
51133	41704	800,914
26415	13165	382,13
0	0	3,278
0	0	3,274
0	0	3,272
0	0	3,269
0	0	3,267
0	0	3,267
0	0	3,267
0	0	3,266
0	0	3,266
0	0	3,266
0	0	3,268
0	0	3,265
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
17240	12621	252
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY PRŮBĚHU OBRÁBĚNÍ		
48742	39012	754

JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOSTI		
caunt 1	caunt 2	RMS
95743	35094	712,93
88295	27896	649,898
85977	36564	706,122
73619	56942	857,893
73243	56746	857,167
73167	56847	858,368
73211	56532	856,635
72151	55958	851,68
71323	55511	849,648
67472	50626	785,778
0	0	3,285
0	0	3,268
0	0	3,268
0	0	3,261
0	0	3,266
0	0	3,26
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
48388	30545	500
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY PRŮBĚHU OBRÁBĚNÍ		
77420	48872	799

JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOSTI		
caunt 1	caunt 2	RMS
0	0	3,246
0	0	3,249
1469	42	77,645
65328	15294	536,075
0	0	3,254
0	0	3,251
0	0	3,254
0	0	3,253
0	0	3,252
0	0	3,251
0	0	3,252
0	0	3,253
0	0	3,254
0	0	3,253
0	0	3,253
0	0	3,25
0	0	3,252
0	0	3,253
0	0	3,254
0	0	3,253

0	0	3,253
0	0	3,253
0	0	3,252
0	0	3,251
0	0	3,254
0	0	3,253
0	0	3,256
0	0	3,255
67763	48053	788,941
80807	63261	892,218
80761	62448	885,813
80416	61930	885,072
81130	62516	887,166
81327	62338	883,561
80422	61605	882,17
80516	61504	880,42
80164	61308	883,143
79993	60893	880,065
79184	60733	881,05
78080	59729	877,645
77679	59480	876,407
77327	58992	875,884
77074	59033	874,974
76728	58582	873,946
75198	57572	871,087
75565	58024	873,654
75666	58192	873,374
74380	57222	869,345
74271	57021	866,466
74420	57245	869,676
64127	43893	707,872
0	0	3,274
0	0	3,257
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
34713	25791	390
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY PRŮBĚHU OBRÁBĚNÍ		
77087	58764	867

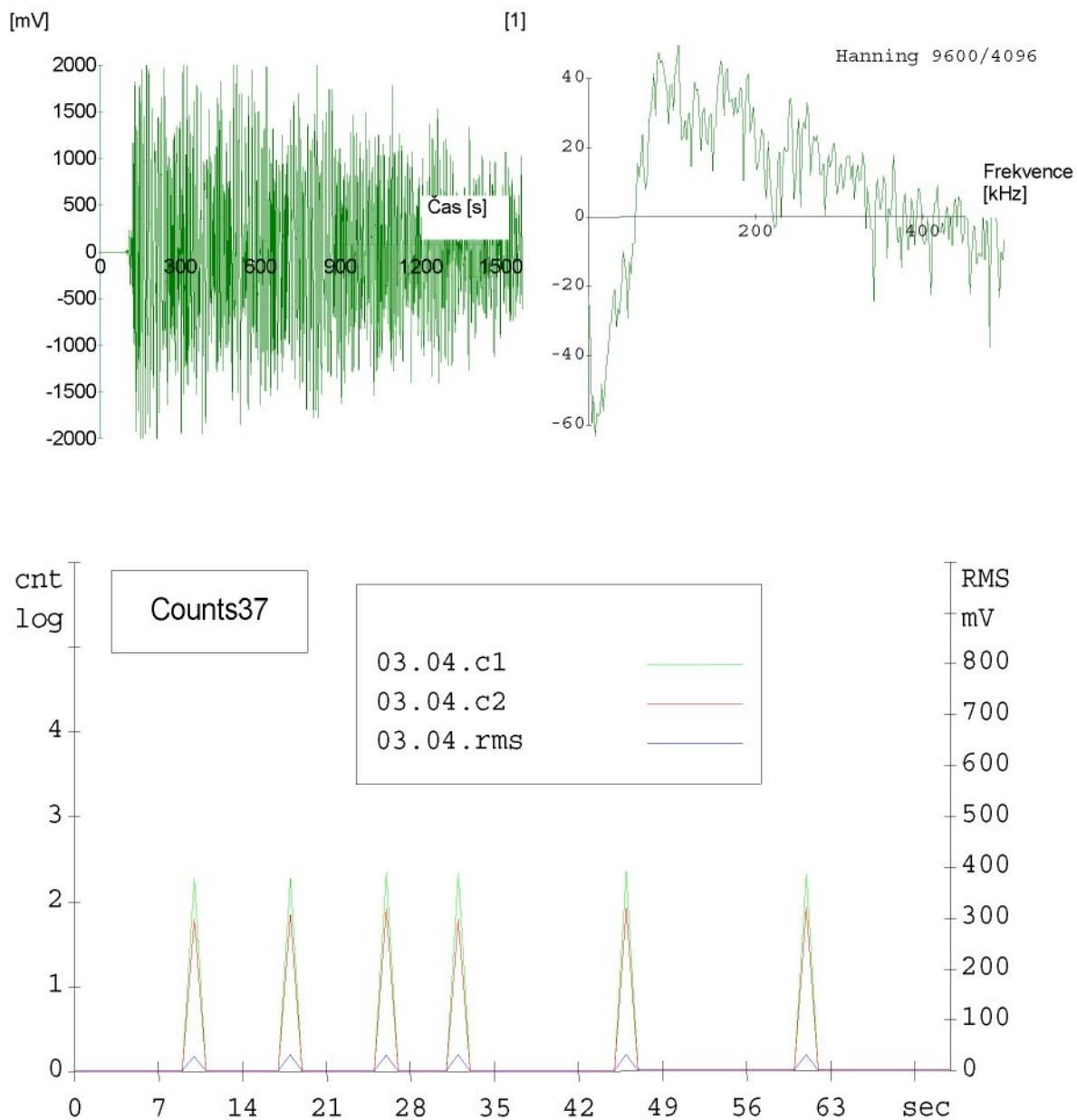
JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOSTI		
caunt 1	caunt 2	RMS
0	0	3,247
0	0	3,244
0	0	3,247
0	0	3,423
0	0	4,026
0	0	6,298
0	0	10,416
0	0	9,59
0	0	8,274

3376	805	209,224
26082	7397	587,562
26330	7648	592,019
26009	7236	585,899
25918	7099	584,763
25872	7133	585,154
26244	7820	593,56
26106	7630	591,272
25953	7601	589,401
25975	7362	588,608
26209	8085	595,403
14306	4323	441,347
0	0	3,254
0	0	3,244
0	0	3,244
0	0	3,241
0	0	3,246
0	0	3,247
0	0	3,249
0	0	3,246
0	0	3,248
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
9279	2671	221
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY PRŮBĚHU OBRÁBĚNÍ		
23198	6678	545

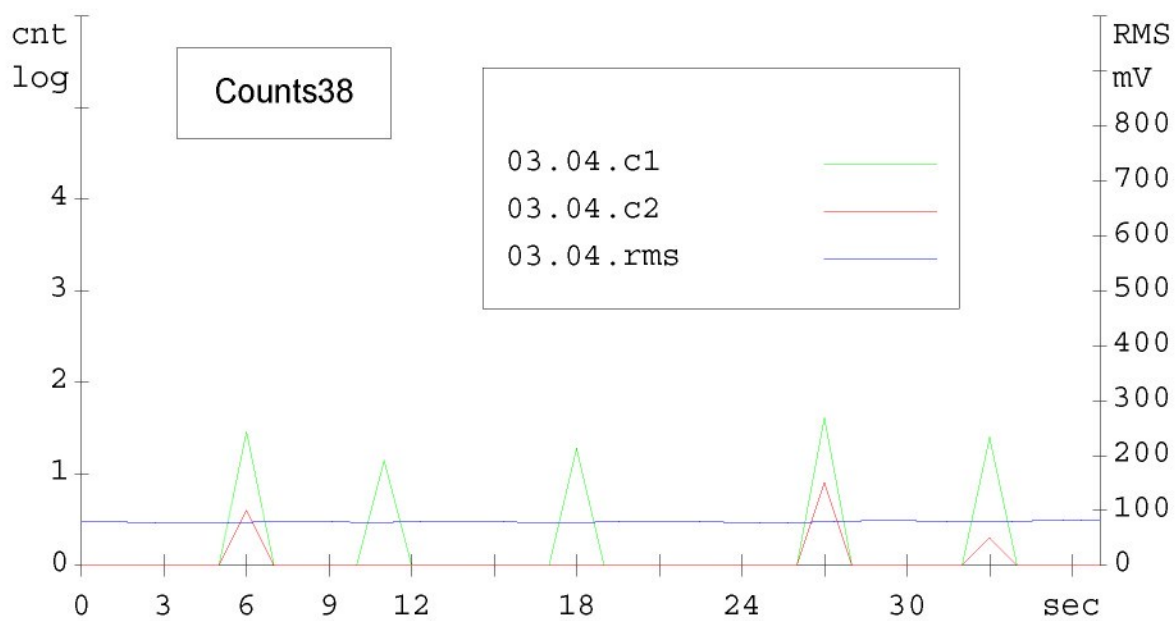
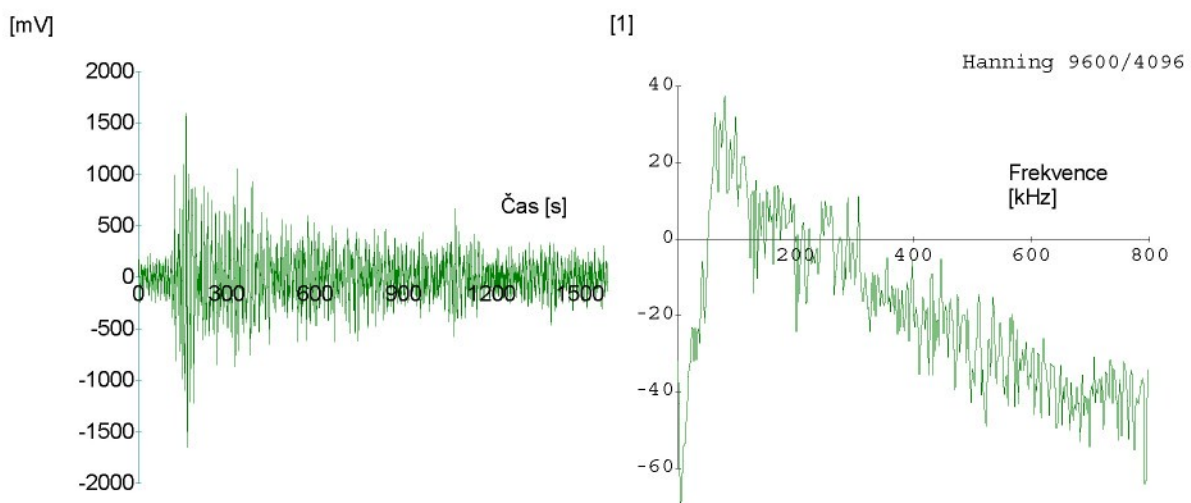
JEDNOTLIVÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY V ČASOVÉ POSLOUTNOST		
caunt 1	caunt 2	RMS
0	0	3,239
0	0	3,242
0	0	3,239
0	0	3,241
0	0	3,238
0	0	3,243
0	0	3,252
0	0	31,581
0	0	30,204
0	0	21,065
0	0	20,016
0	0	3,243
0	0	3,238
0	0	3,242
0	0	3,239
0	0	3,241
0	0	3,238
0	0	3,241
0	0	3,238
0	0	3,244
0	0	3,239
0	0	3,24

0	0	3,238
0	0	3,242
0	0	3,237
0	0	3,243
0	0	3,237
0	0	3,242
0	0	3,237
0	0	3,241
0	0	3,24
0	0	3,24
0	0	3,24
2500	2	179,167
11608	48	366,472
11438	63	362,736
11849	80	370,585
11879	71	371,837
12494	83	378,383
11494	58	365,447
12016	87	372,712
12375	66	377,101
12579	82	379,291
12609	93	380,264
12638	90	380,569
12723	158	383,371
13591	153	393,648
13845	171	395,786
13080	131	387,279
12808	108	384,413
13204	109	388,391
13169	138	388,475
13209	121	387,364
13767	149	395,507
13688	172	396,964
14307	330	400,438
210	0	67,672
0	0	3,251
0	0	3,252
0	0	3,248
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY VŠECH NAMĚŘENÝCH DAT		
4718	43	148
VÝSLEDNÉ STŘEDNÍ ARITMETICKÉ HODNOTY PRŮBĚHU OBRÁBĚN		
11795	107	361

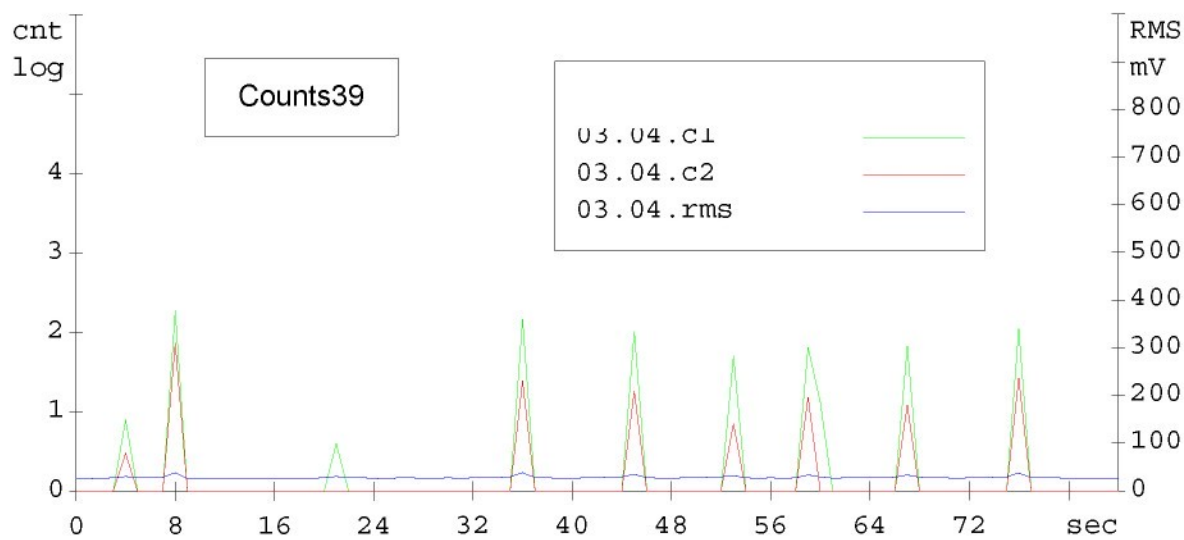
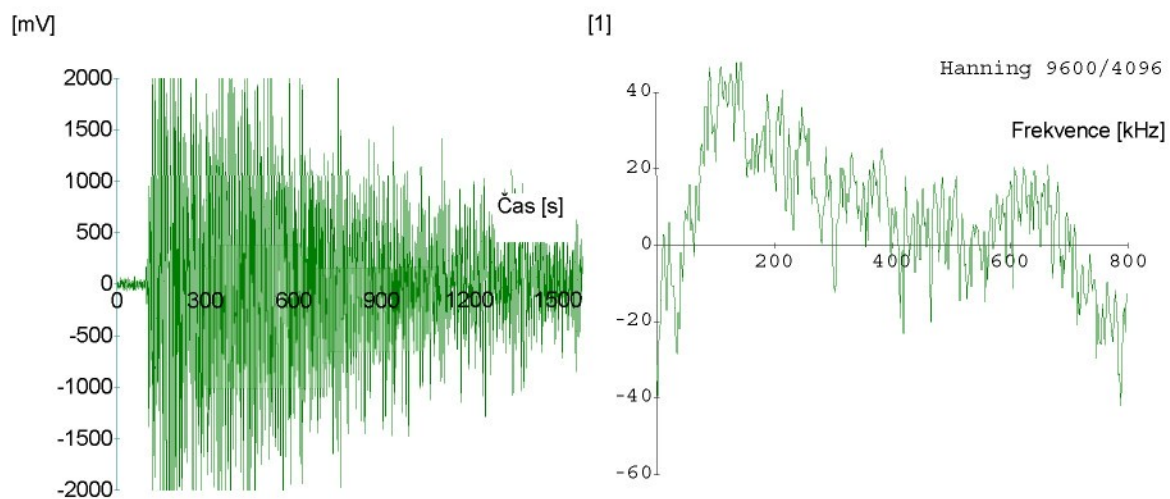
PŘEHLED MĚŘENÍ:



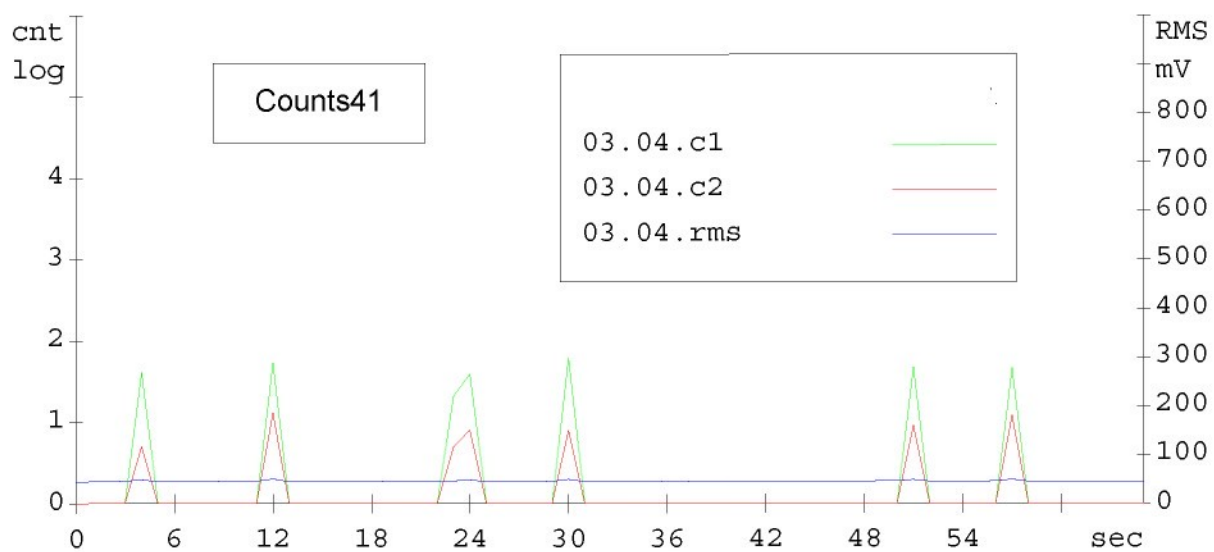
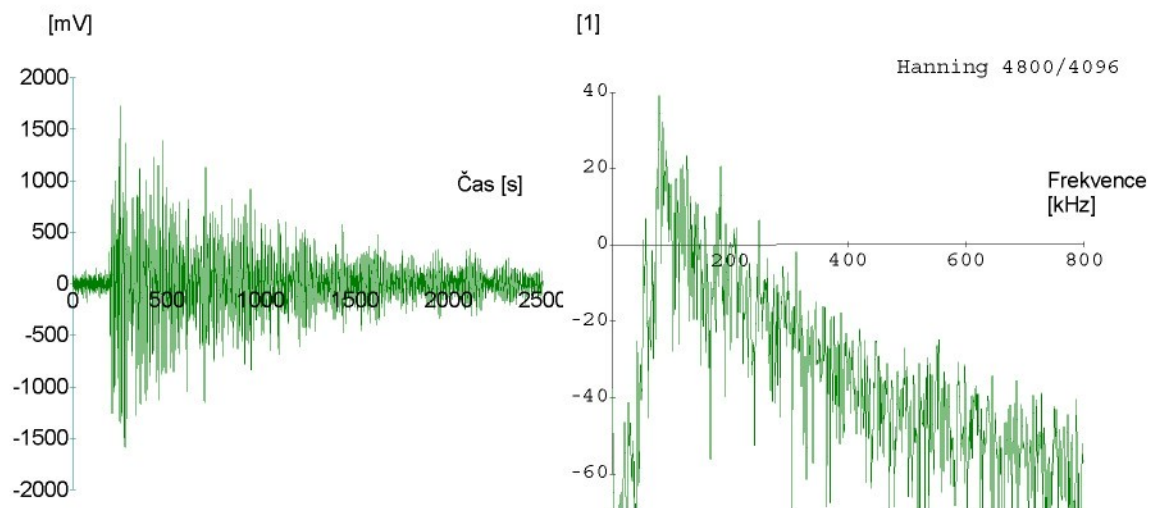
Obr. 1. Měření označené m 01 bylo měřeno pomocí snímače 4 (piezokeramika).



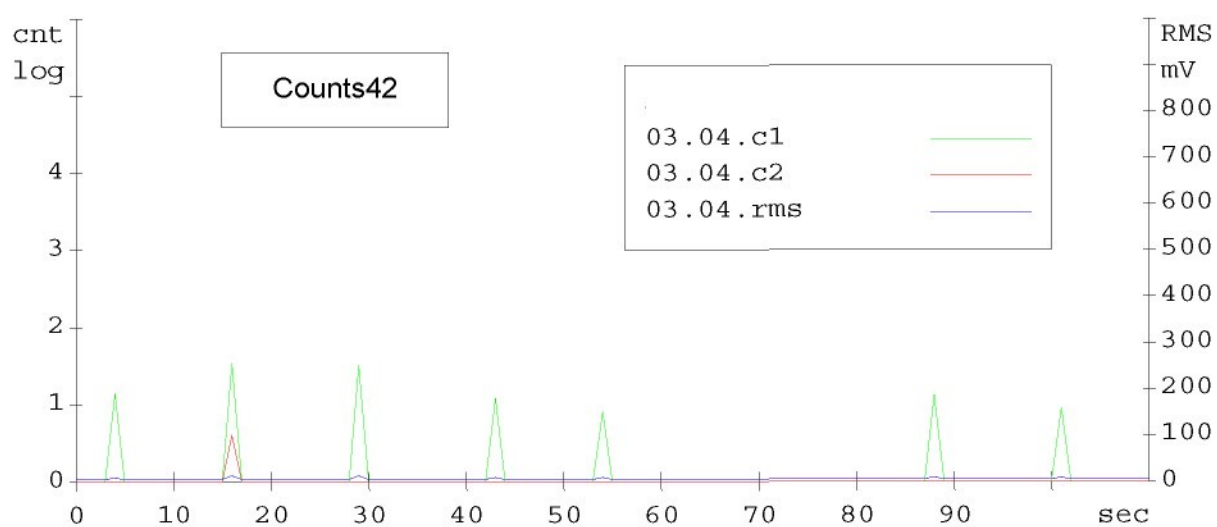
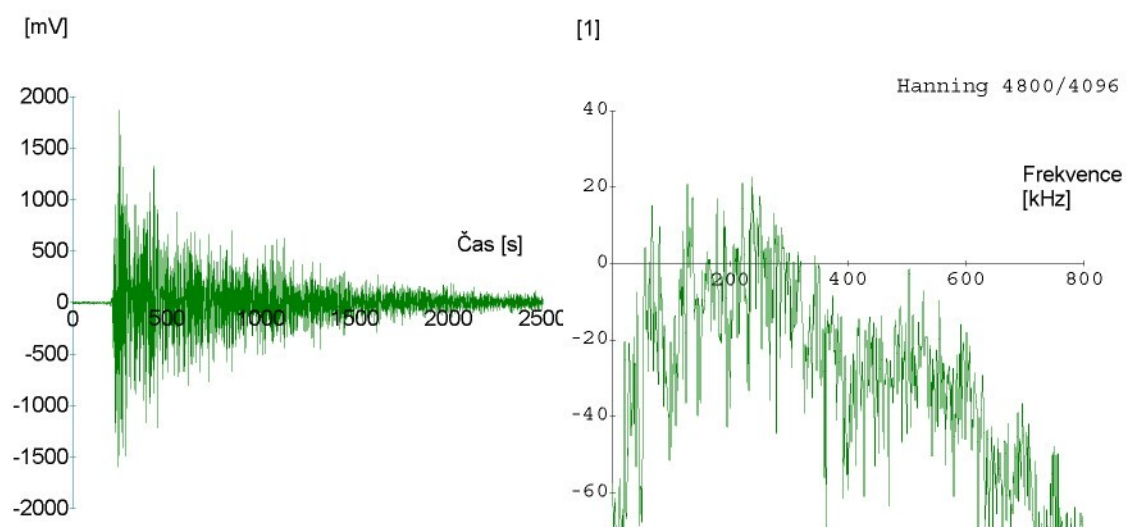
Obr. 2. Měření označené m 02 bylo měřeno pomocí snímače 3 (kompozit).



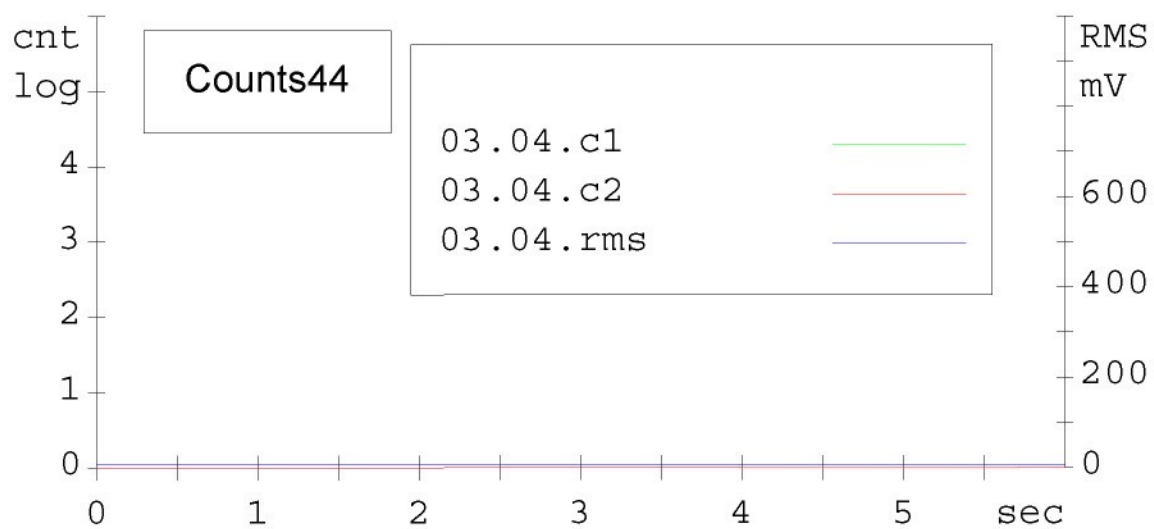
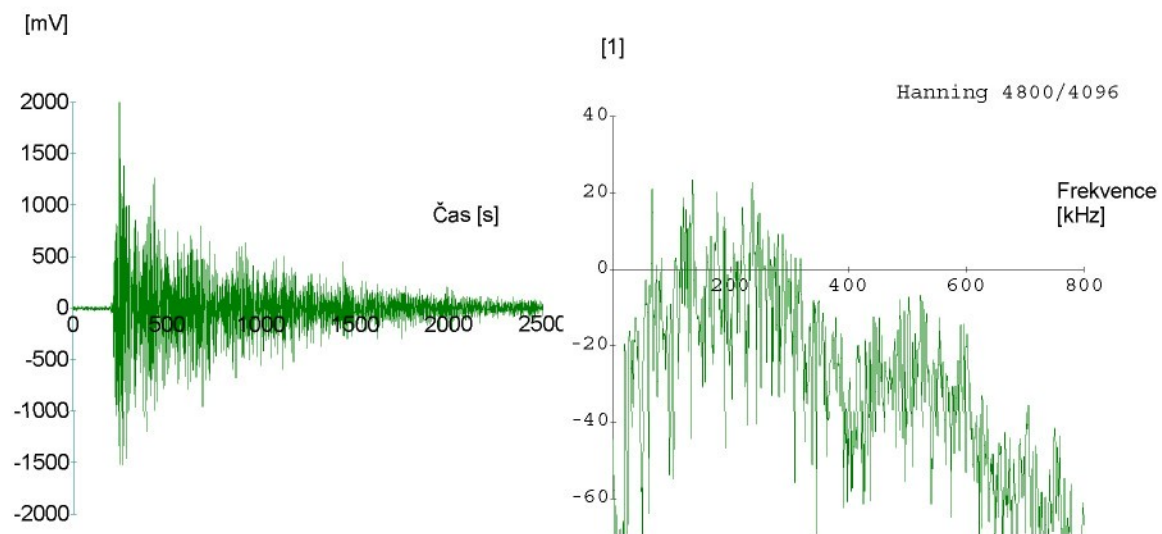
Obr. 3. Měření označené m 04 bylo měřeno pomocí snímače 5 (kompozit).



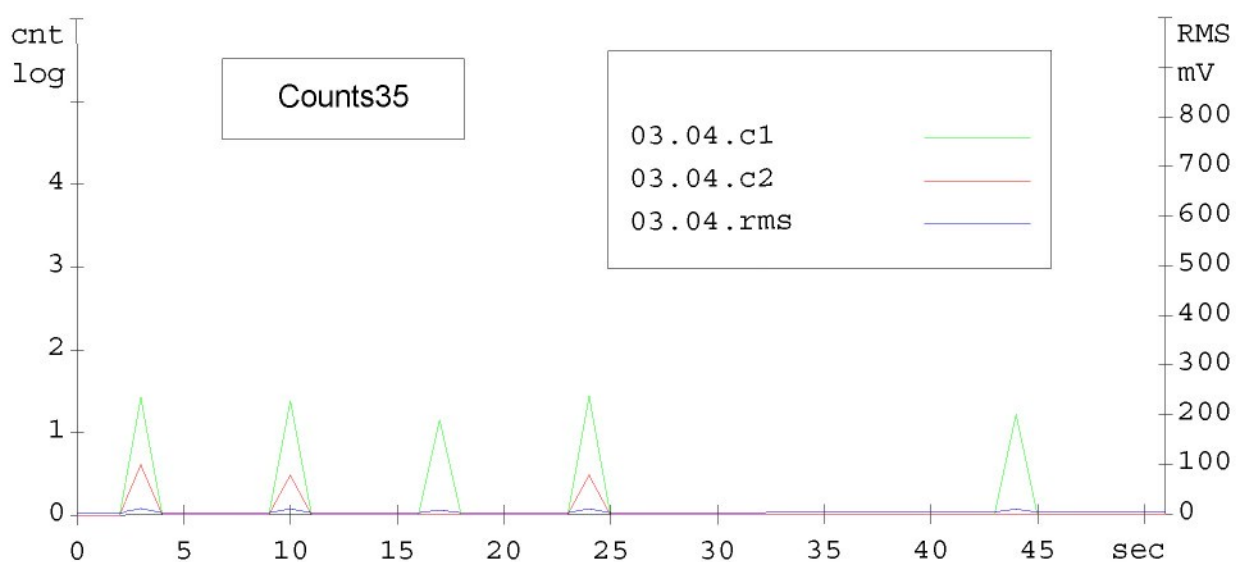
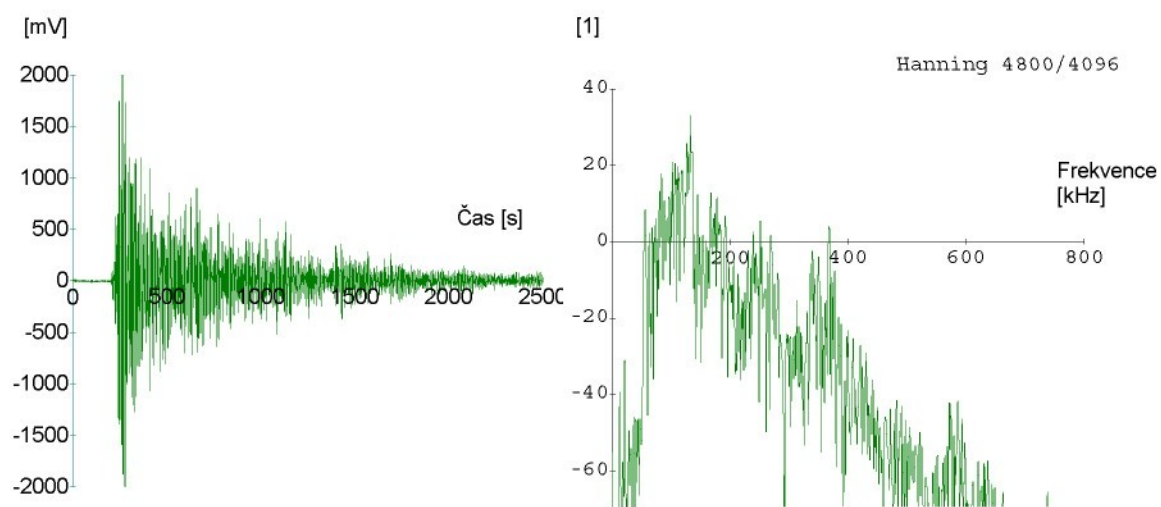
Obr. 4. Měření označené m 05 bylo měřeno pomocí snímače 2 (PVDF fólie).



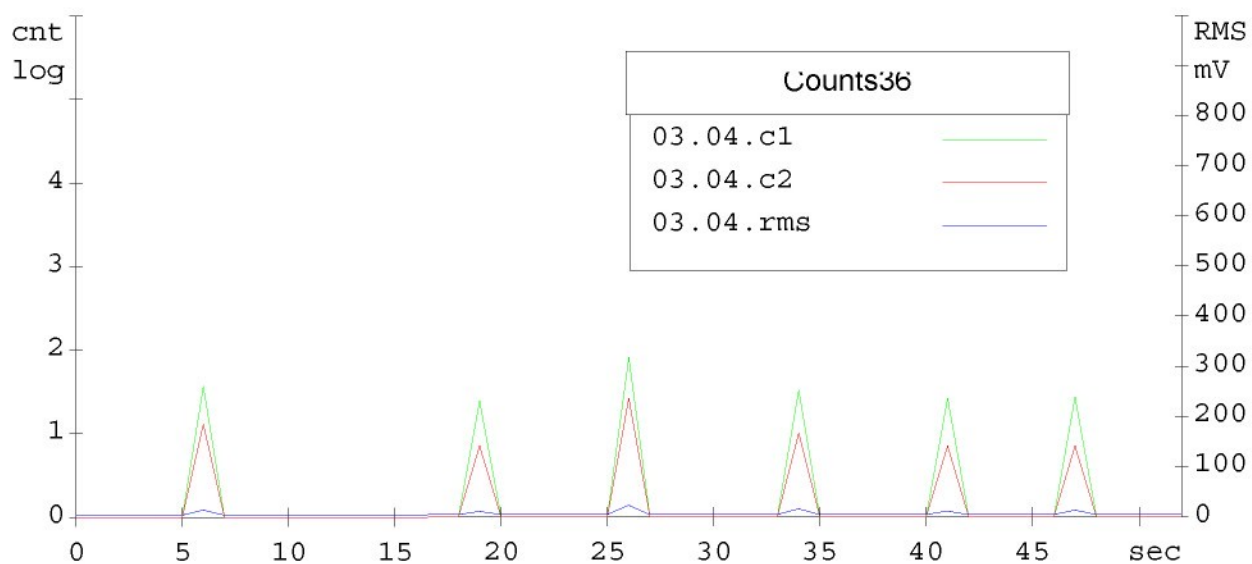
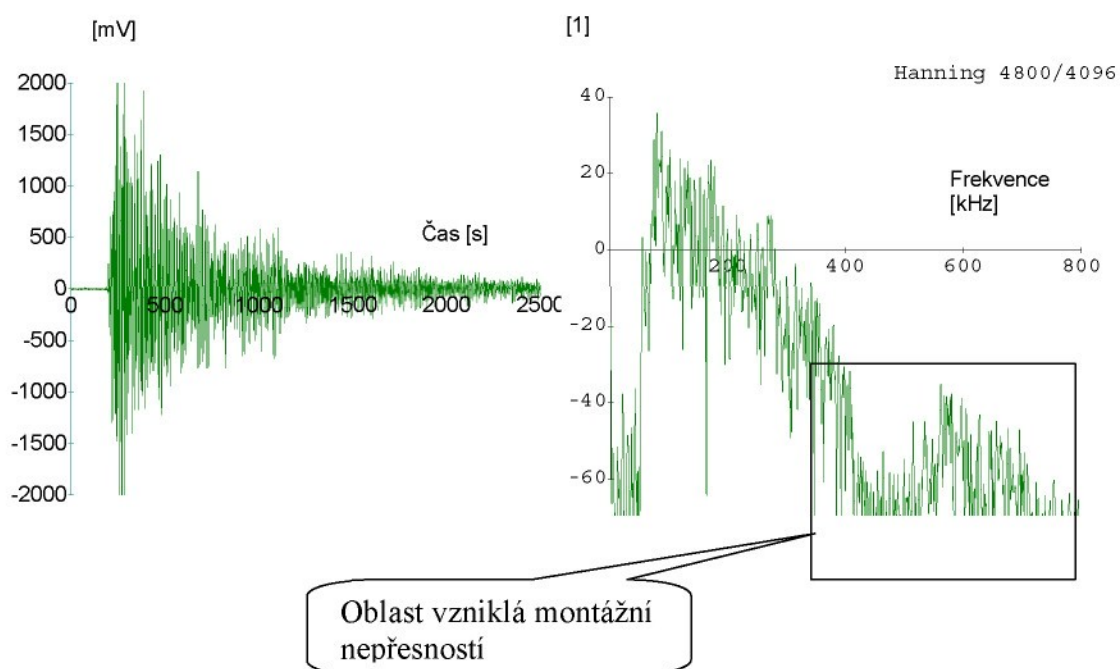
Obr. 5. Měření označené m 06 bylo měřeno pomocí snímače 57 (troj-sendvič PVDF fólie).



Obr. 6. Měření označené m 06b bylo měřeno pomocí snímače 57 (troj-sendvič PVDF fólie).

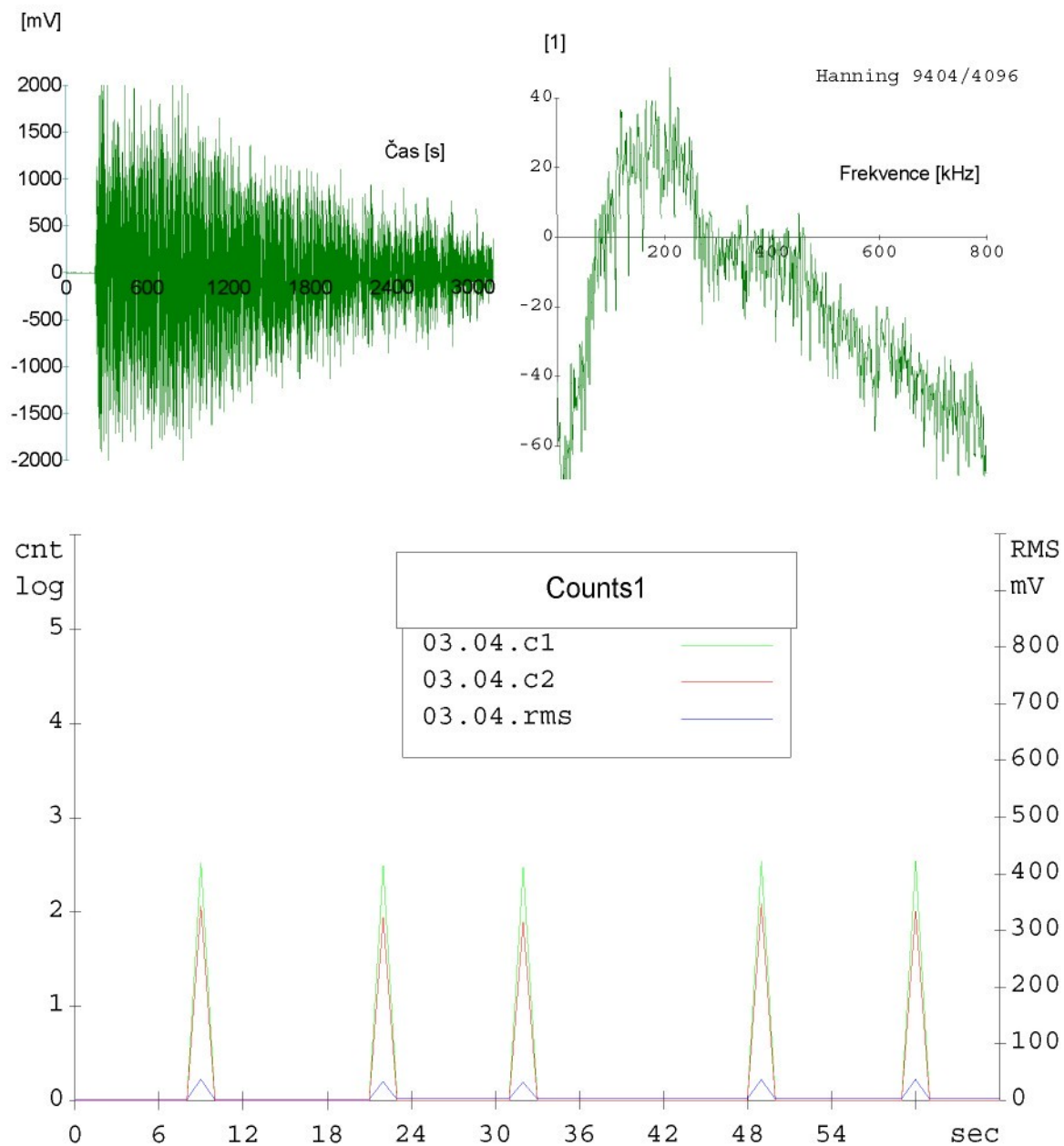


Obr. 7. Měření označené f 01 bylo měřeno pomocí snímače F01 (PZT fólie).

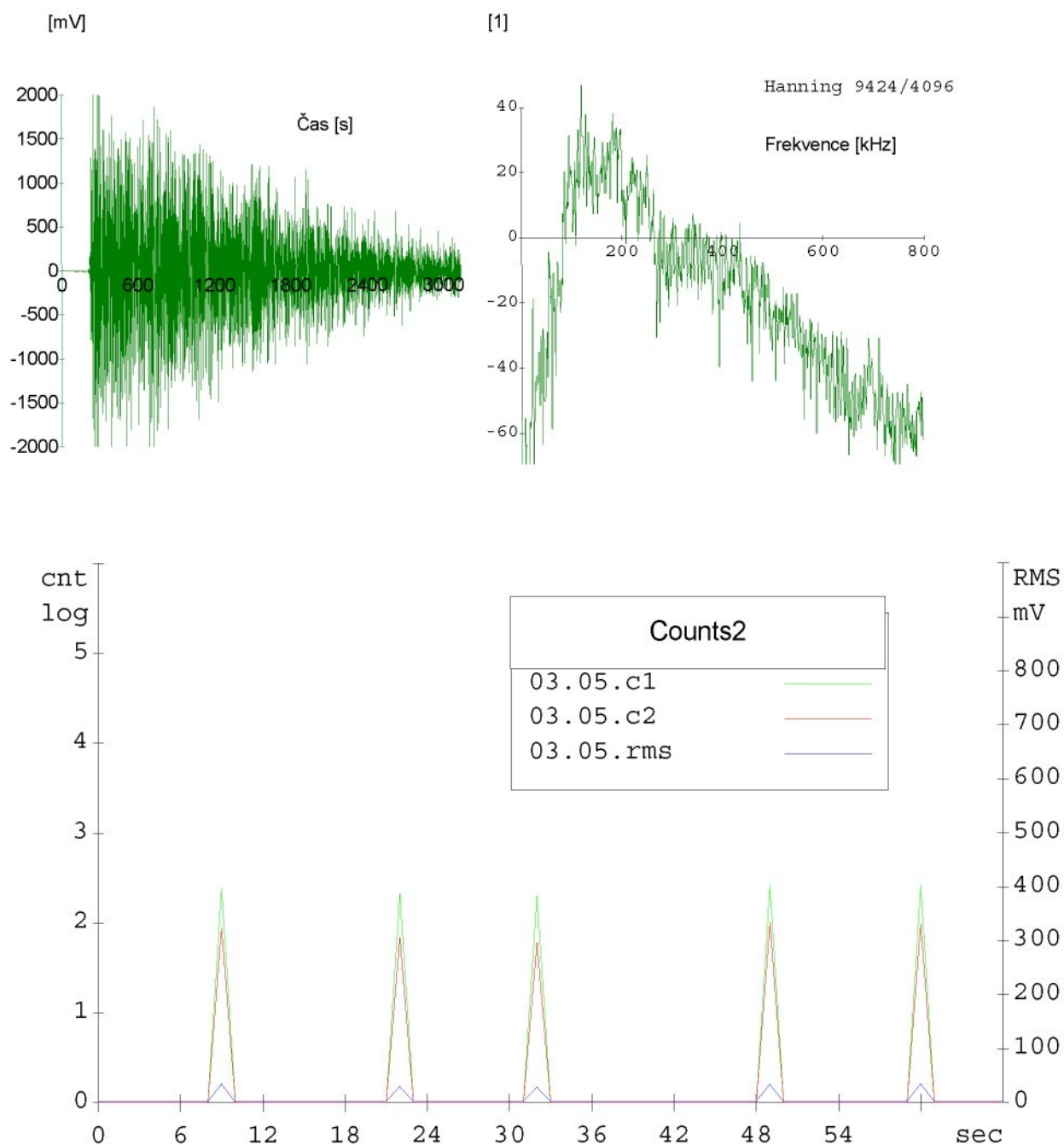


Obr. 8. Měření označené f 02 bylo měřeno pomocí snímače F02 (PZT fólie).

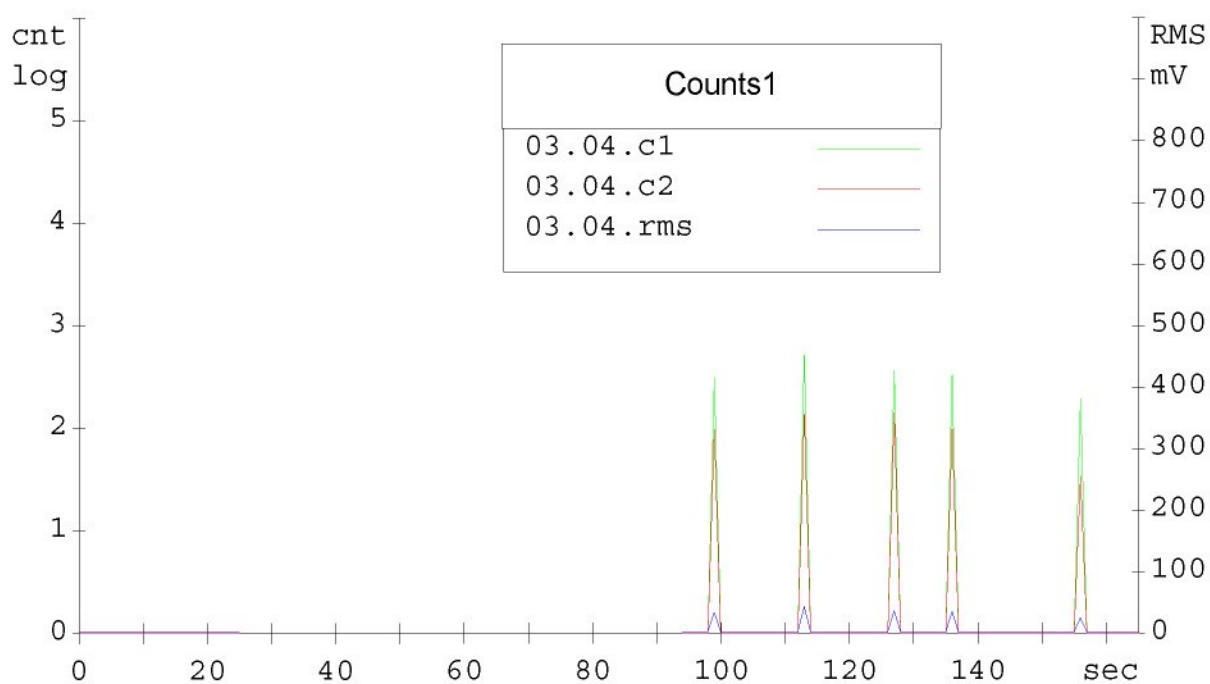
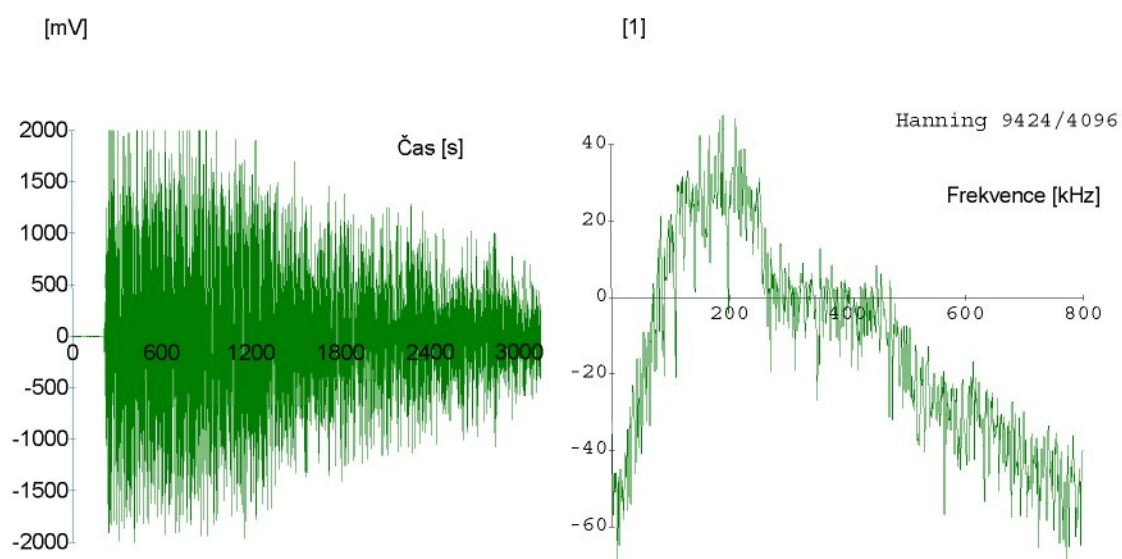
Přehled provedených měření



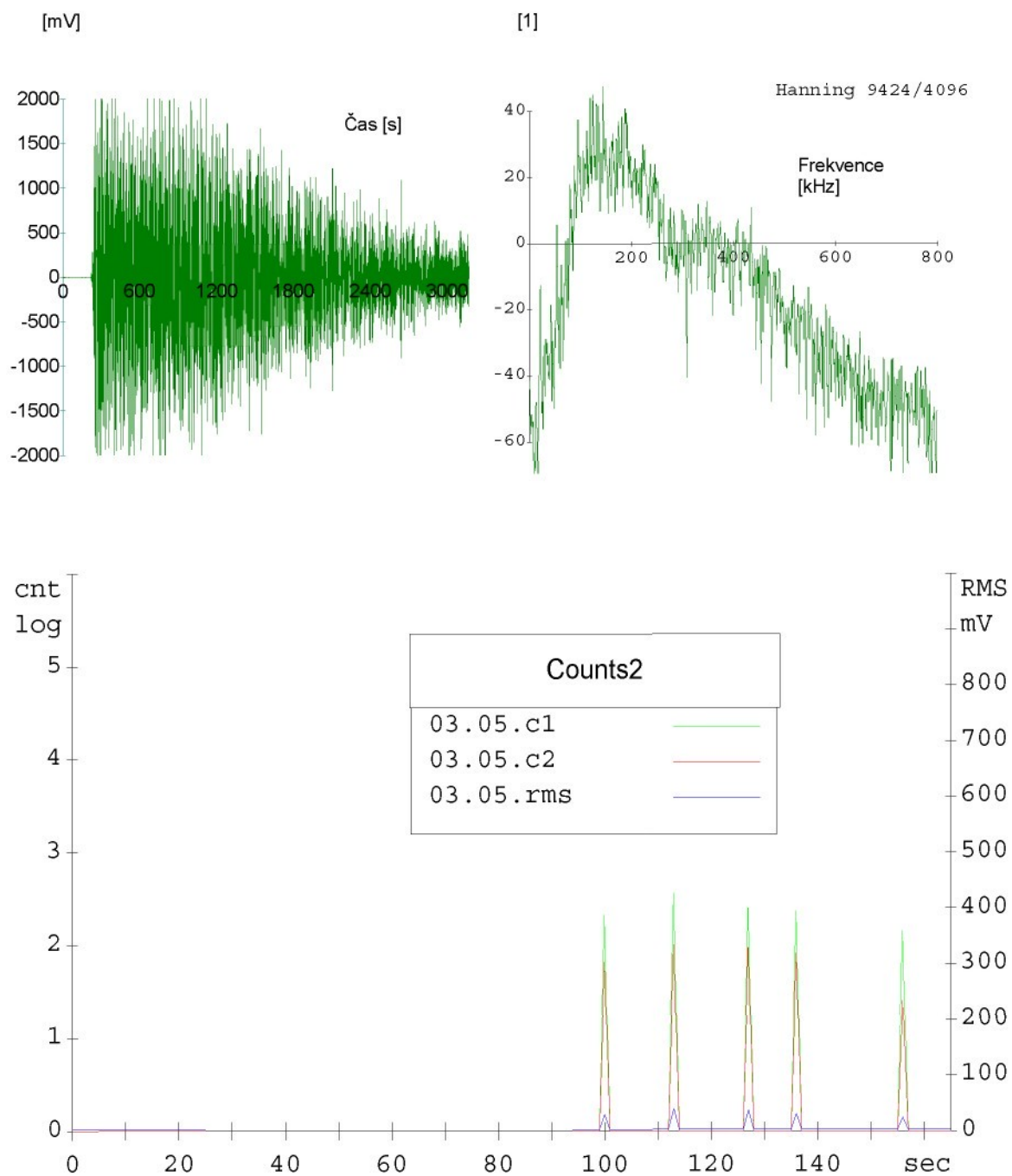
Obr. 1a Grafický výsledek měření označeného 01, signál z interního piezokeramického snímače



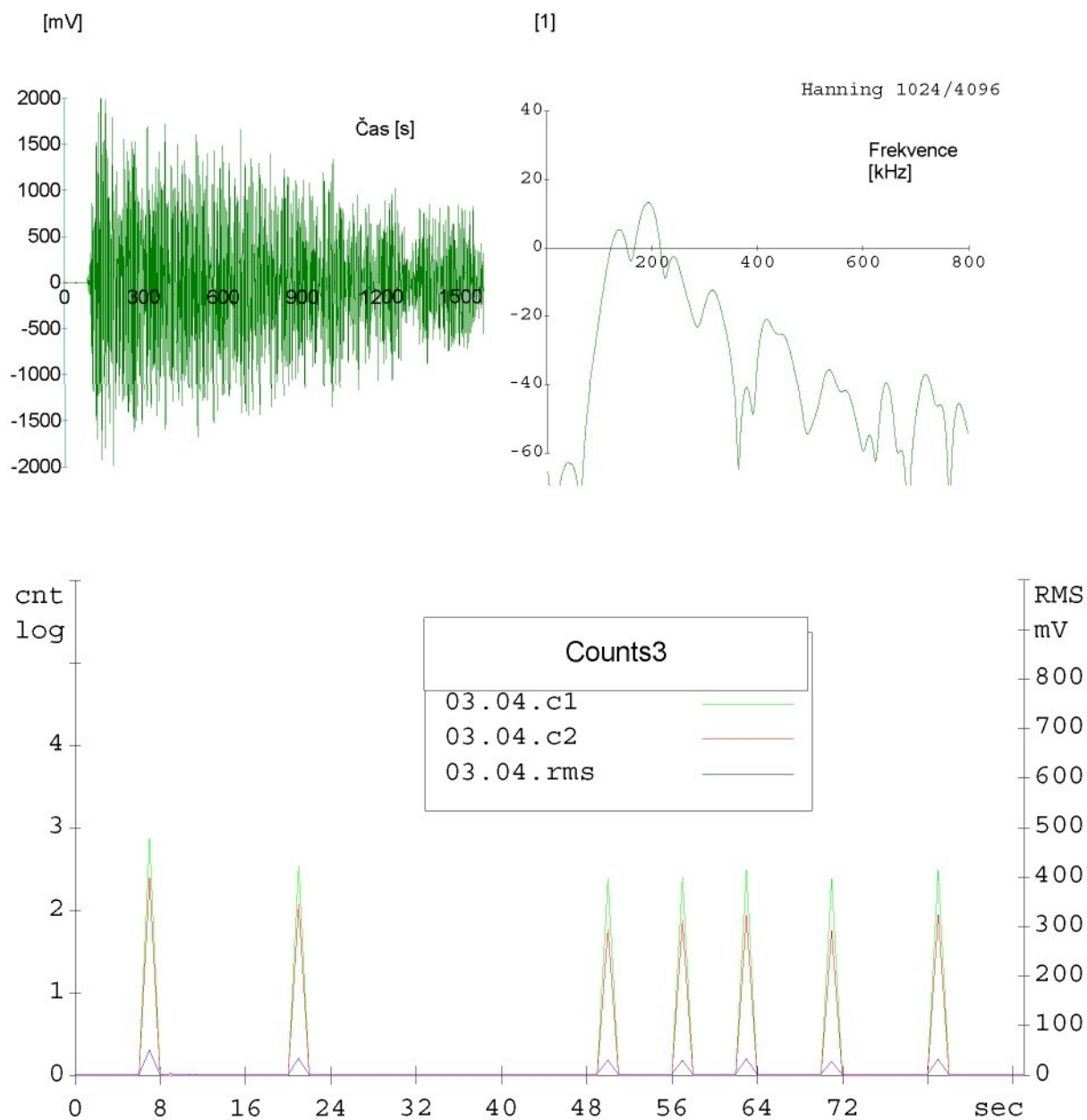
Obr. 1b Grafický výsledek měření označeného 01, signál z externího piezokeramického snímače



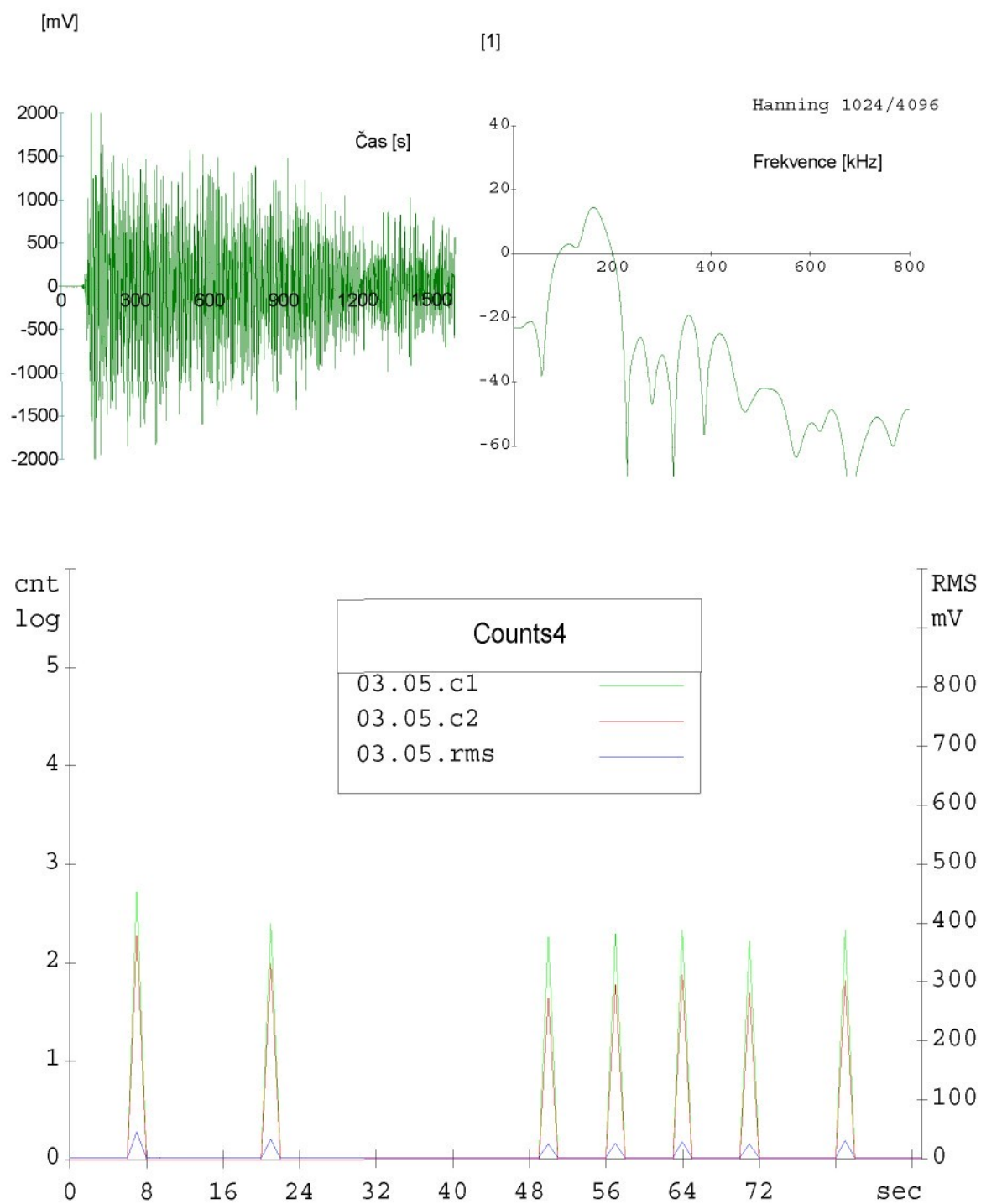
Obr. 2a Grafický výsledek měření označeného 02, signál z interního piezokeramického snímače



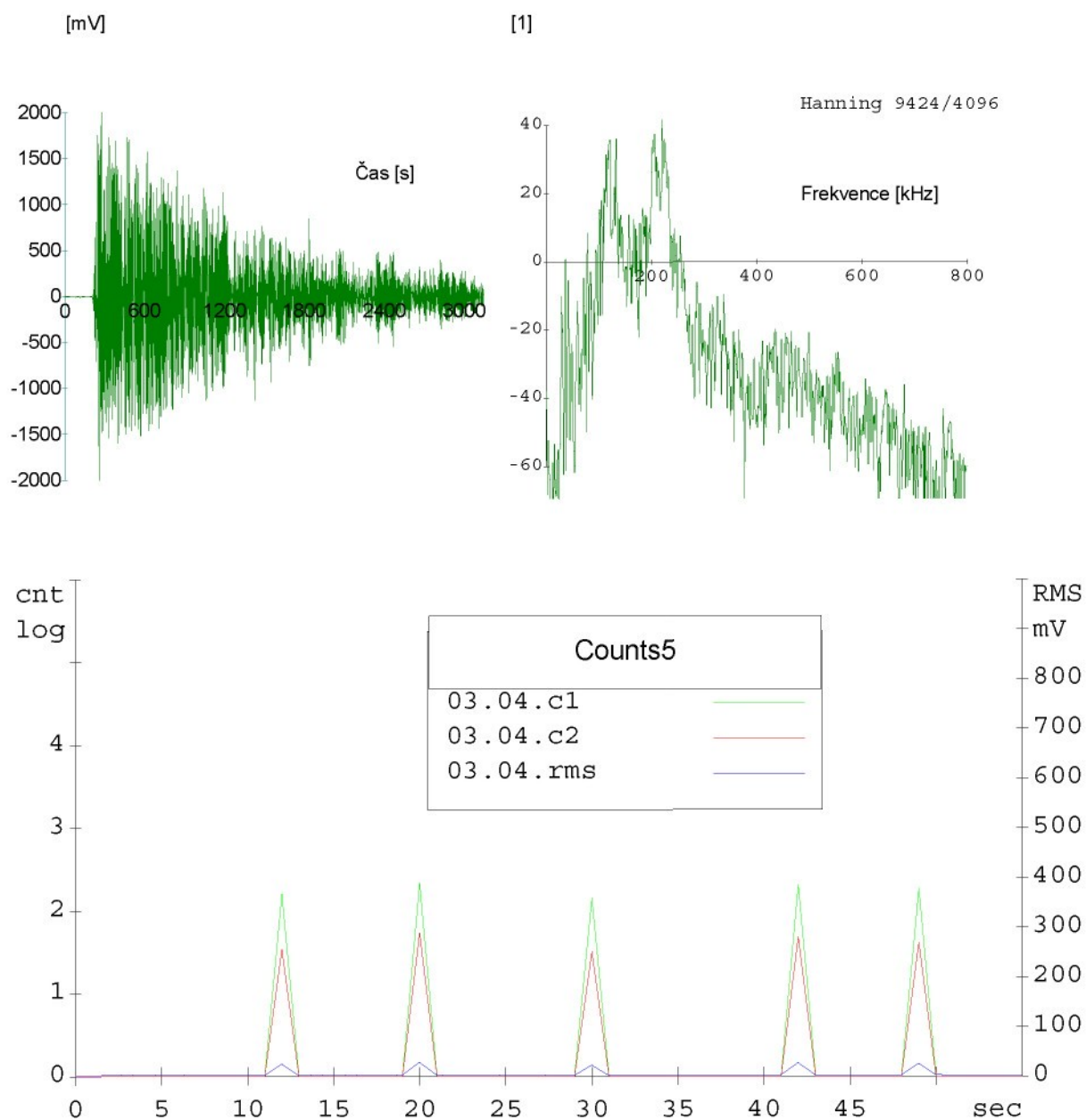
Obr. 2b Grafický výsledek měření označeného 02, signál z externího piezokeramického snímače



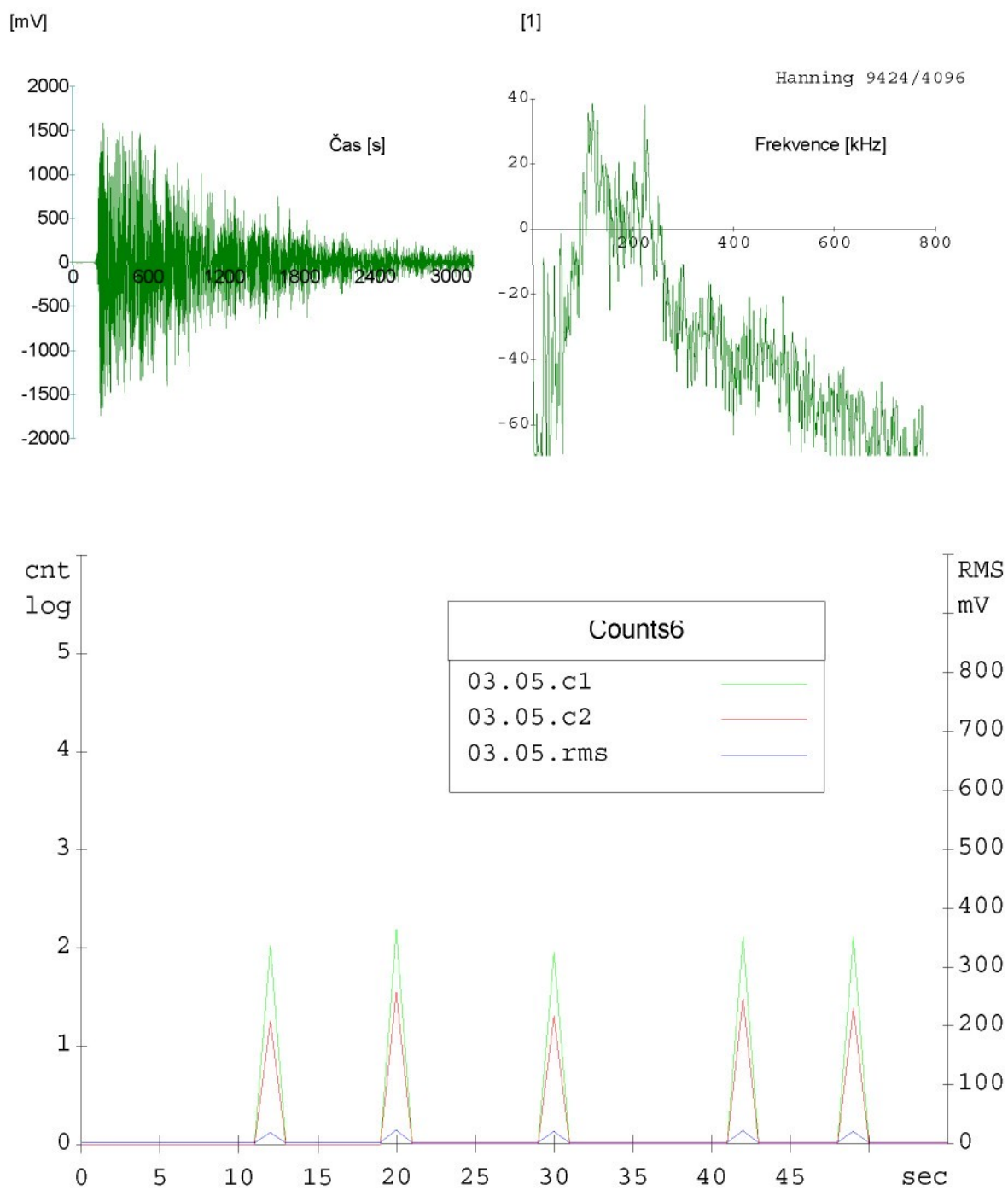
Obr. 3a Grafický výsledek měření označeného 03, signál z interního piezokeramického snímače



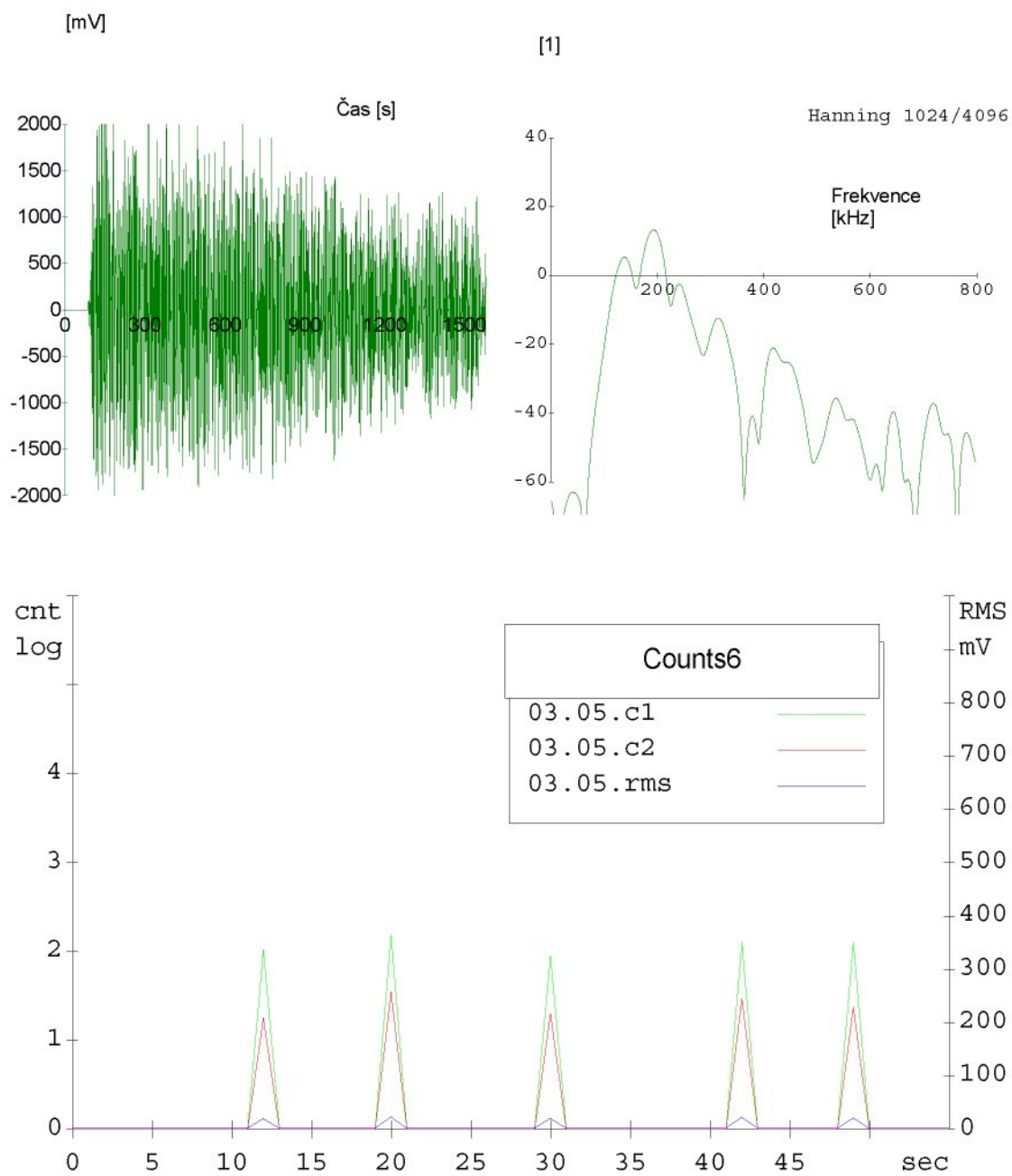
Obr. 3b Grafický výsledek měření označeného 03, signál z externího piezokeramického snímače



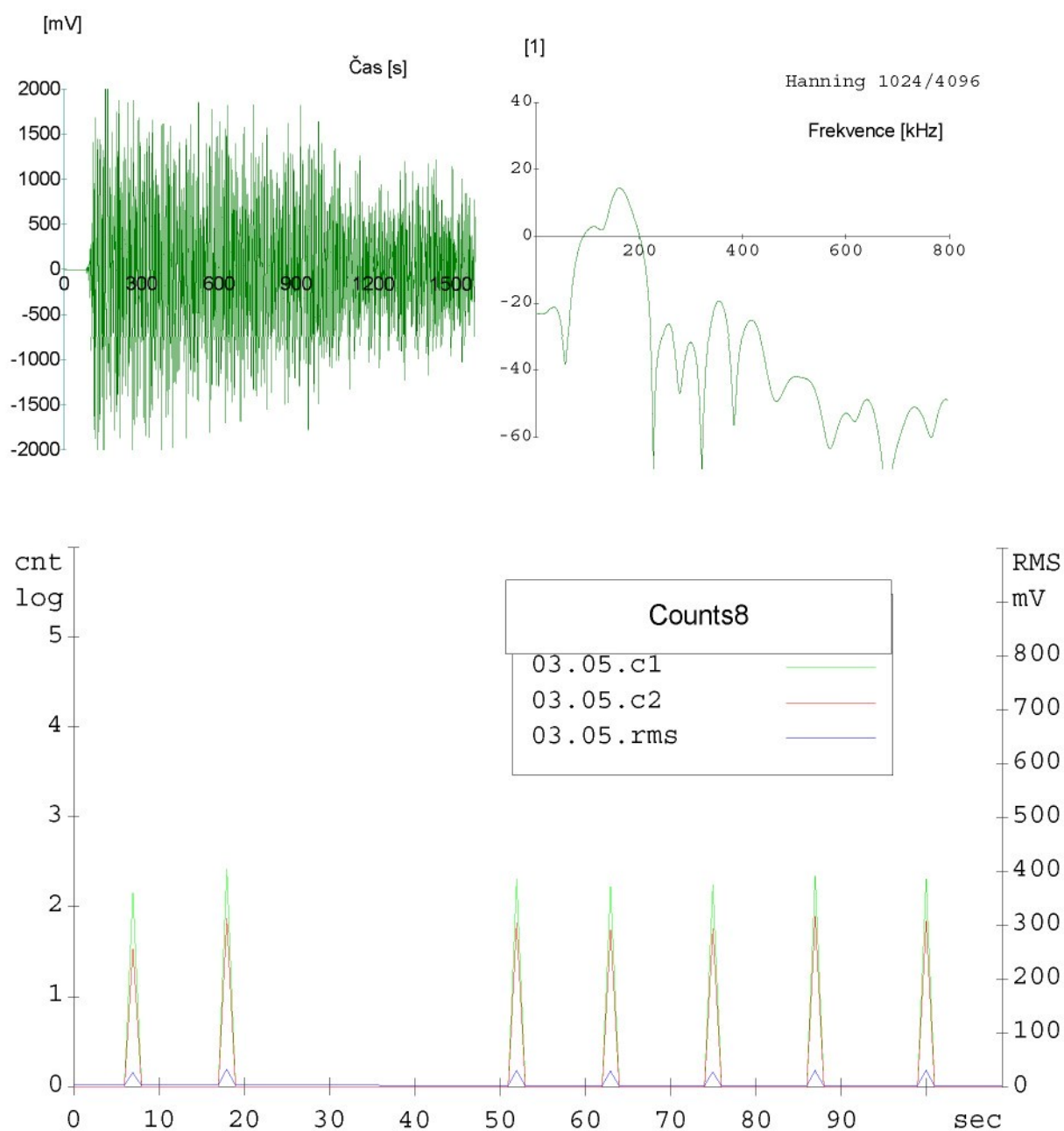
Obr. 4a Grafický výsledek měření označeného 04, signál z interního piezokeramického snímače



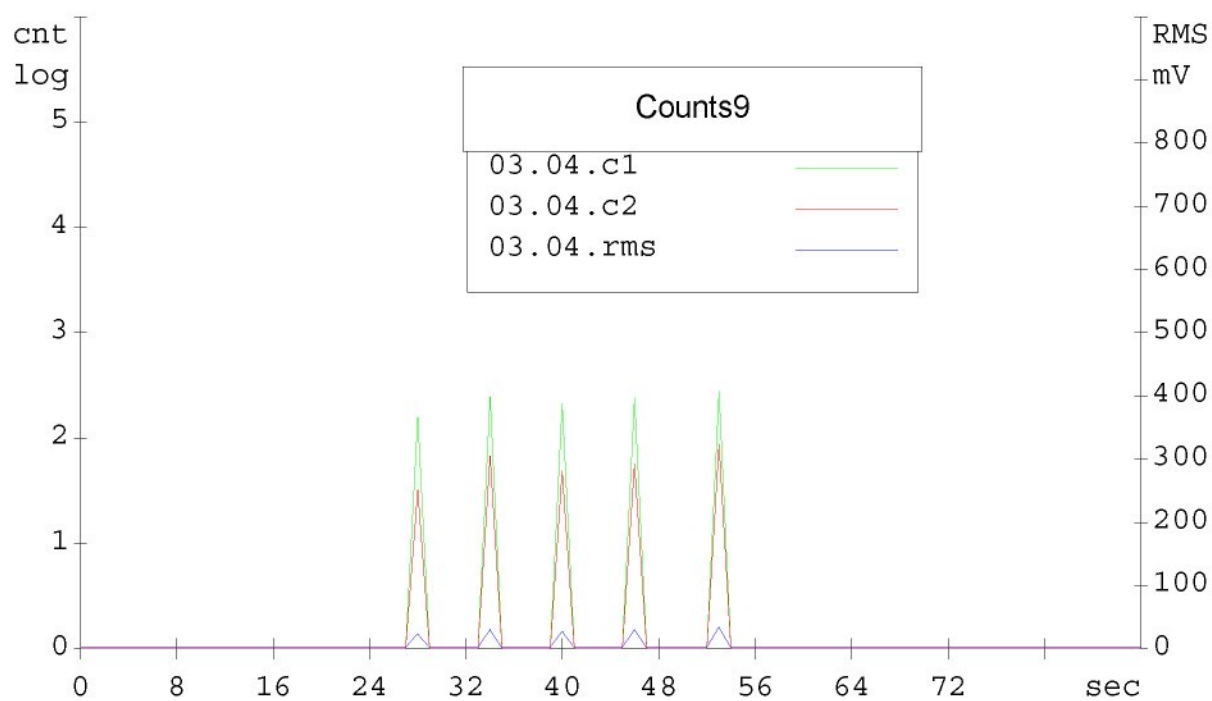
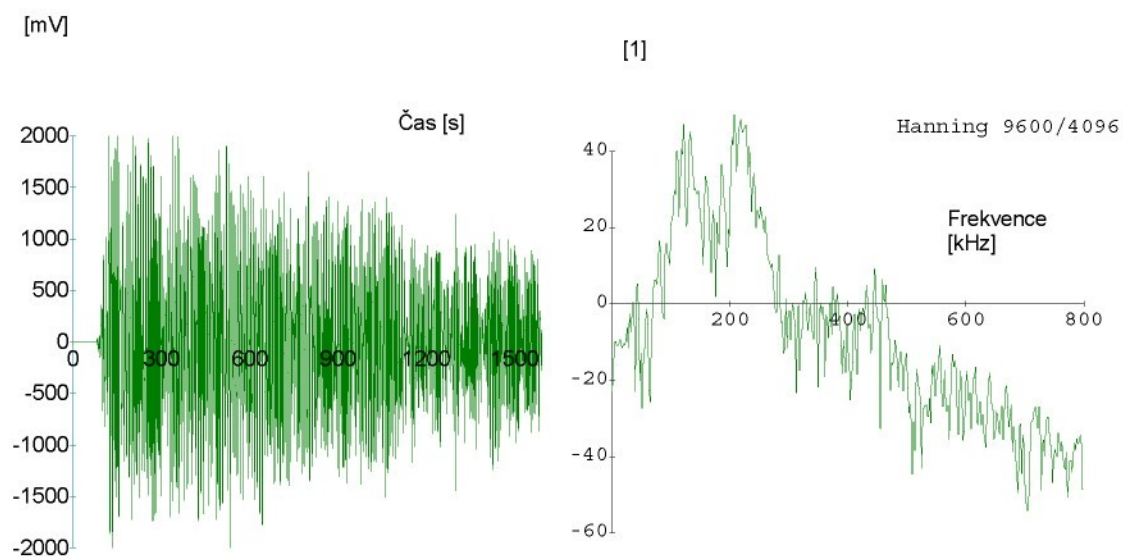
Obr. 4b Grafický výsledek měření označeného 04, signál z externího piezokeramického snímače



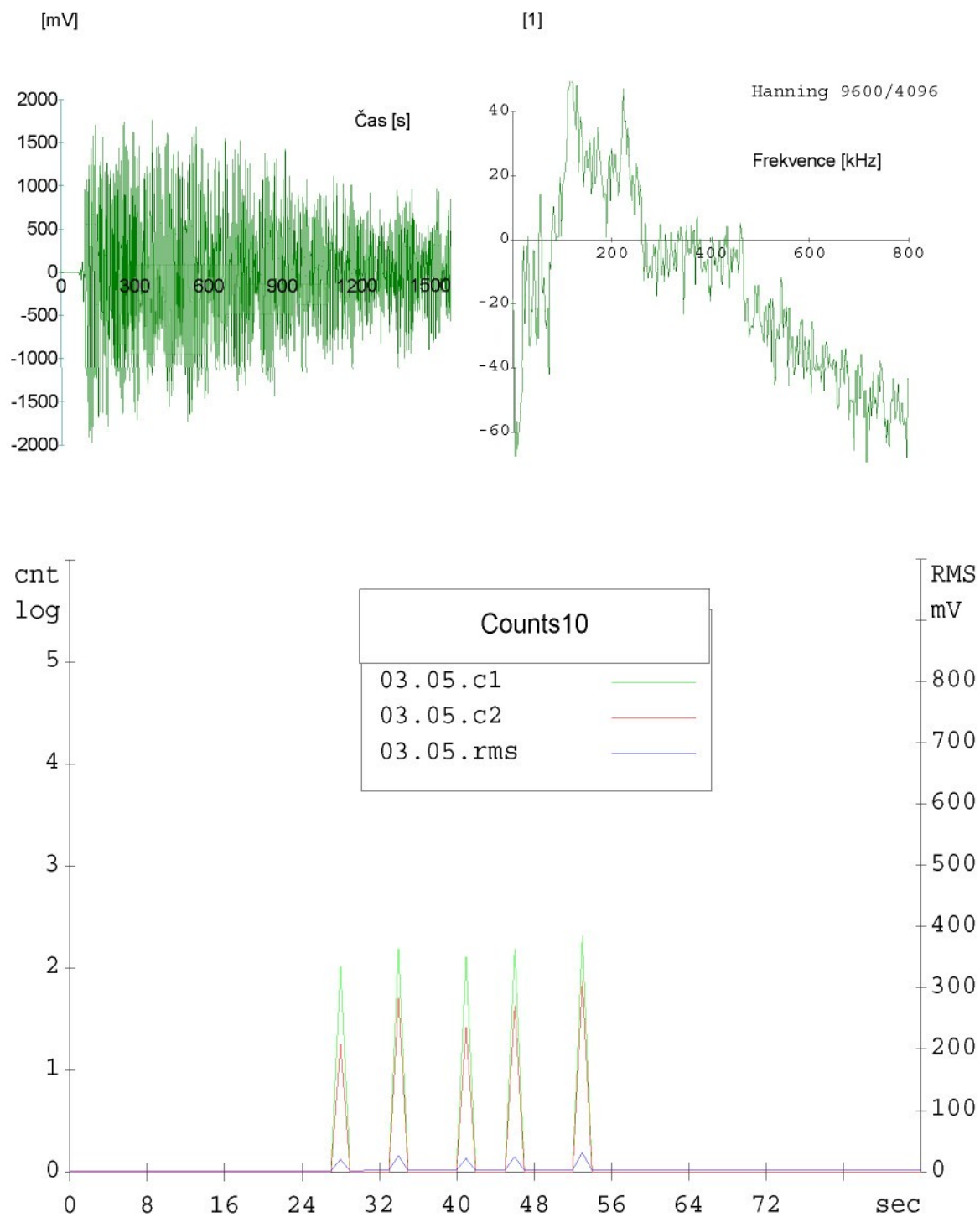
Obr. 5a Grafický výsledek měření označeného 04, signál z interního piezokeramického snímače



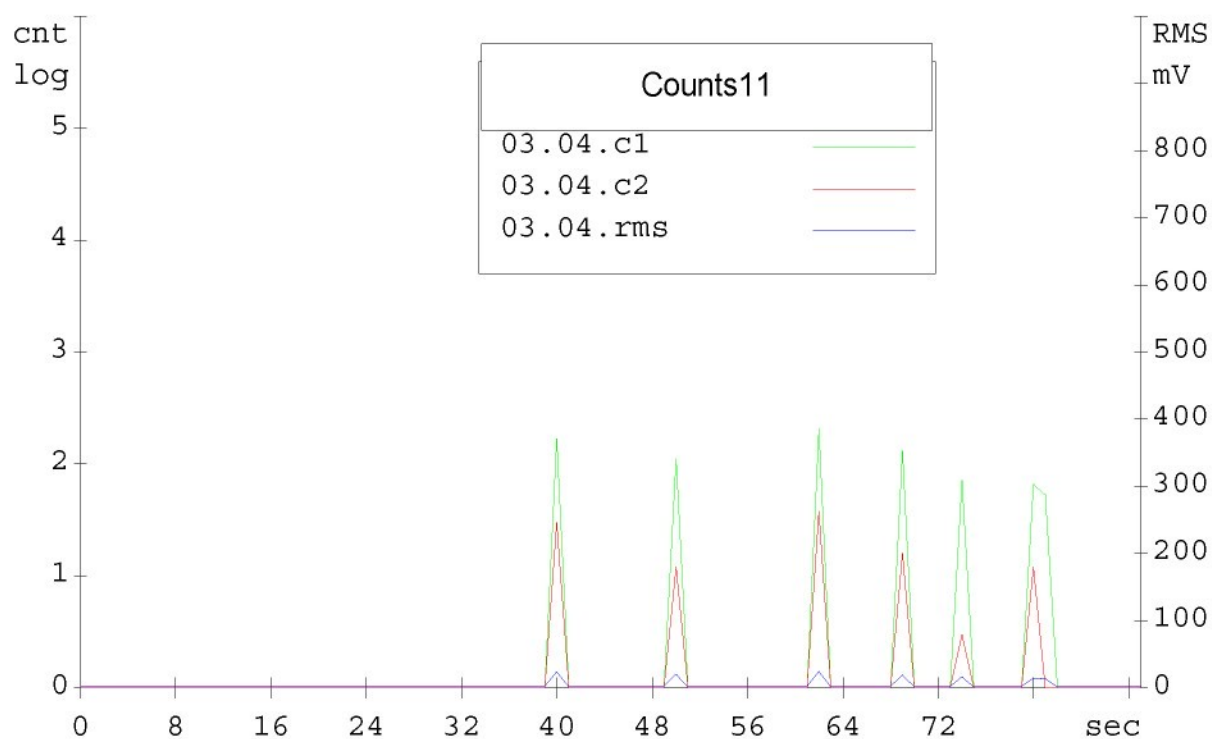
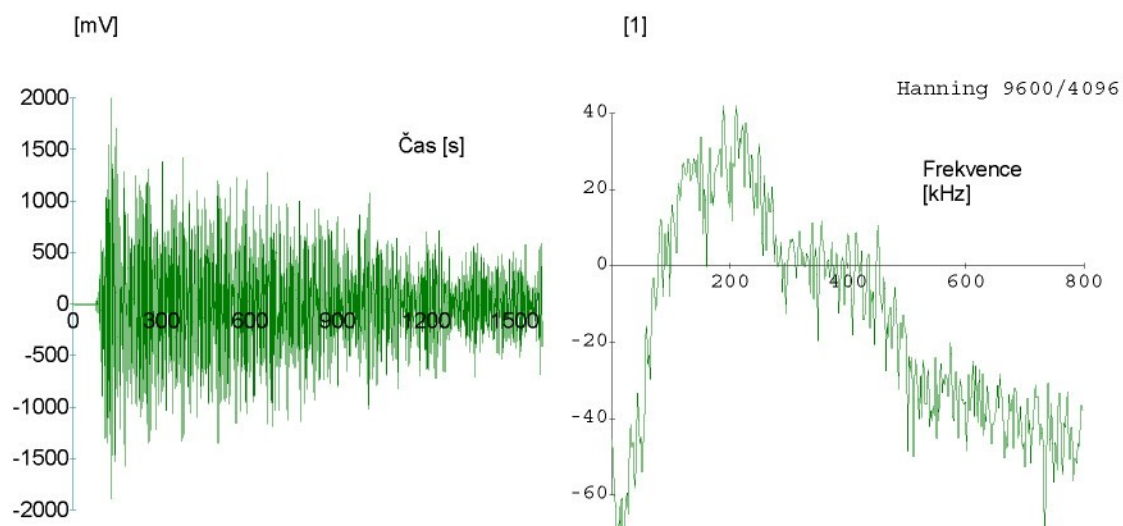
Obr. 5b Grafický výsledek měření označeného 05, signál z externího piezokeramického snímače



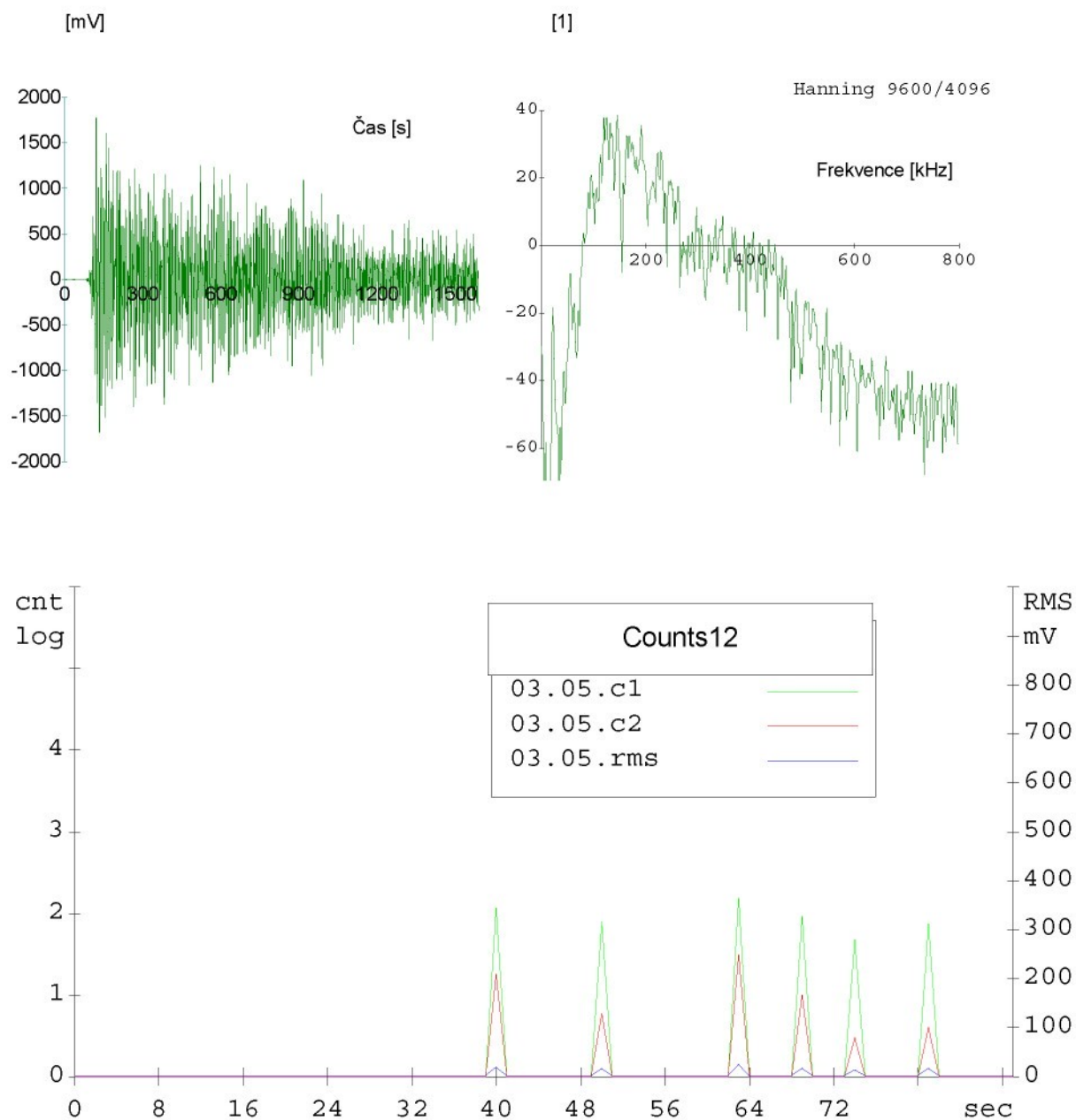
Obr. 6a Grafický výsledek měření označeného 06, signál z interního piezokeramického snímače



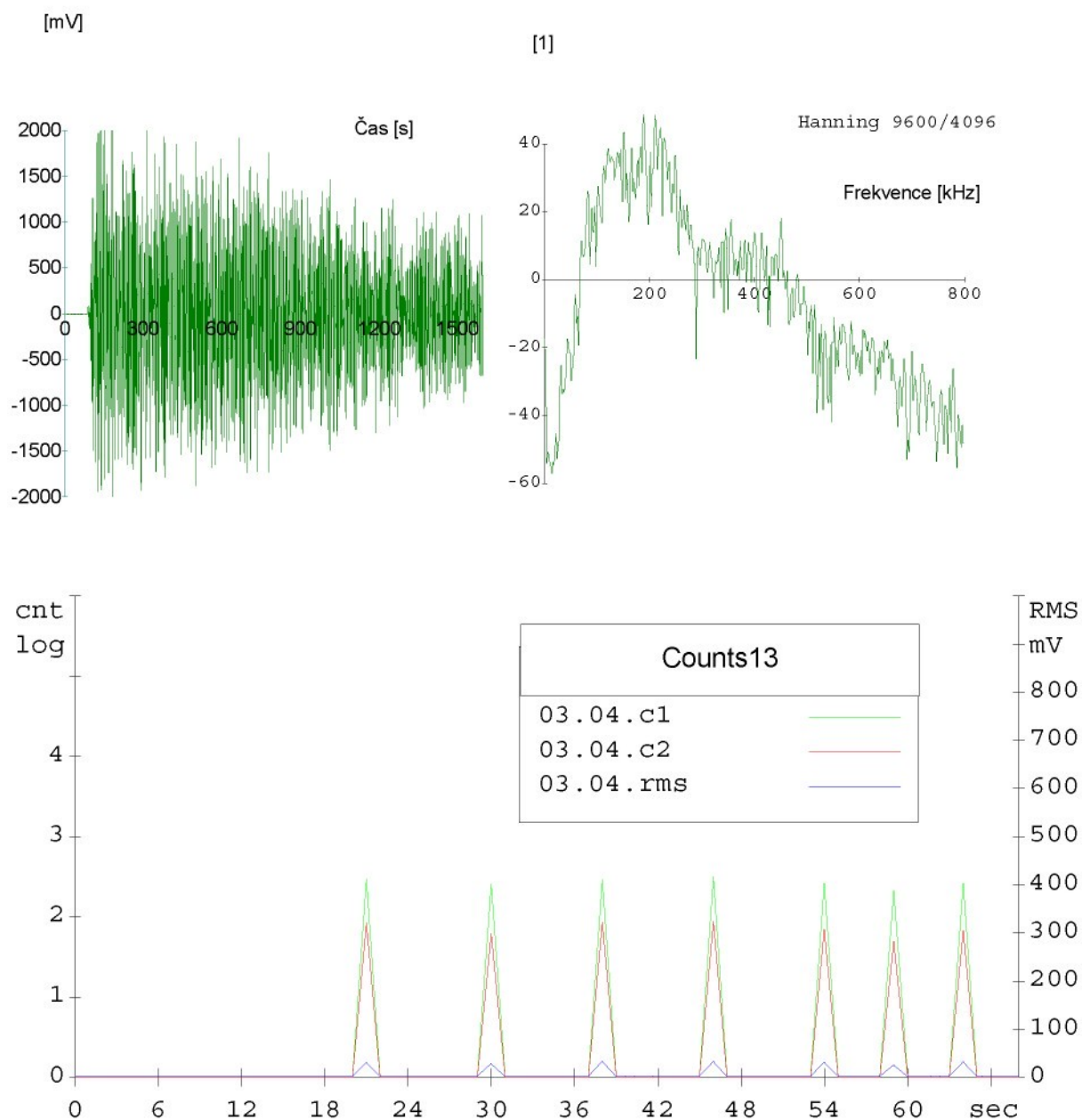
Obr. 6b Grafický výsledek měření označeného 06, signál z externího piezokeramického snímače



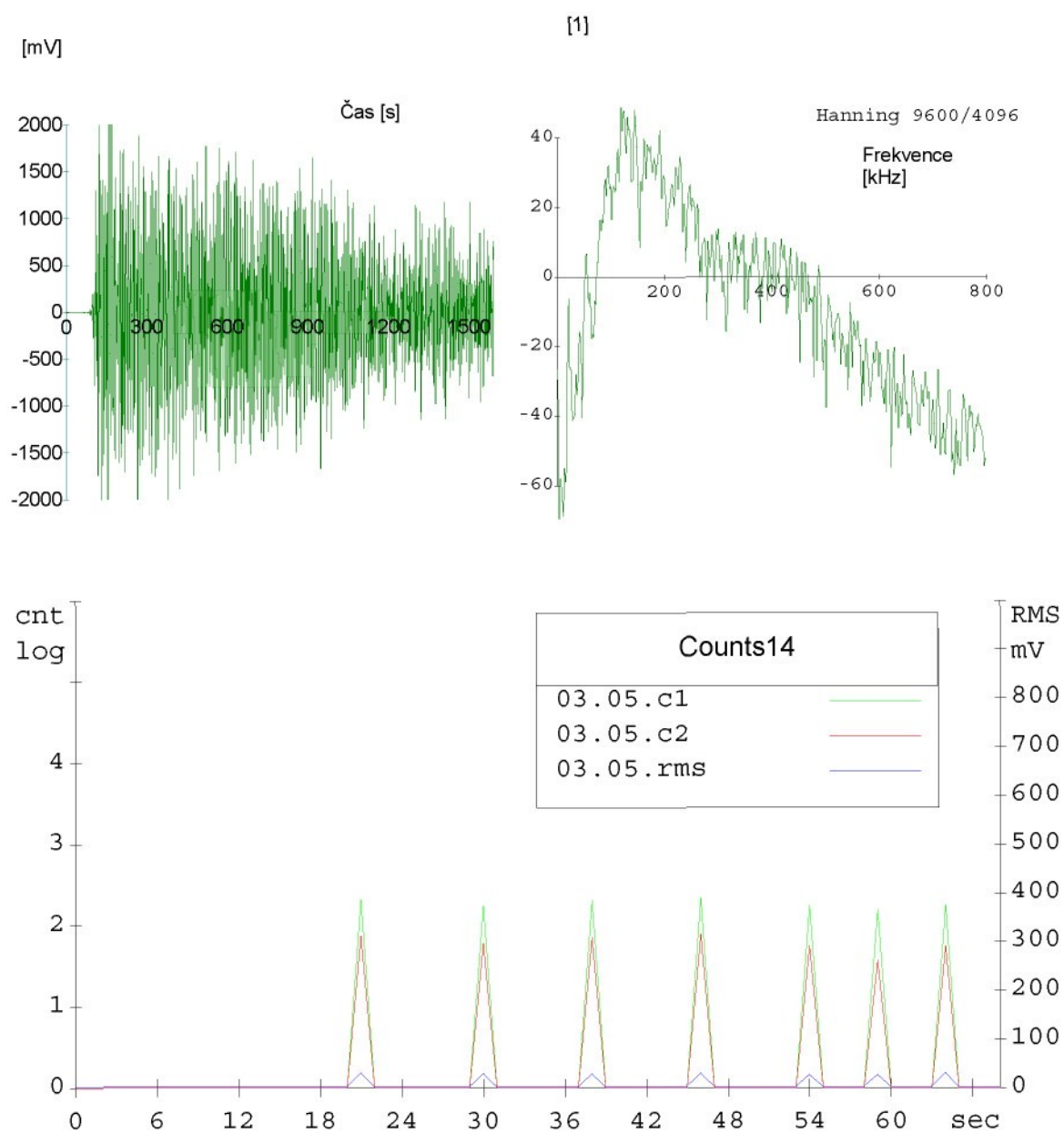
Obr. 7a Grafický výsledek měření označeného 07, signál z interního piezokeramického snímače



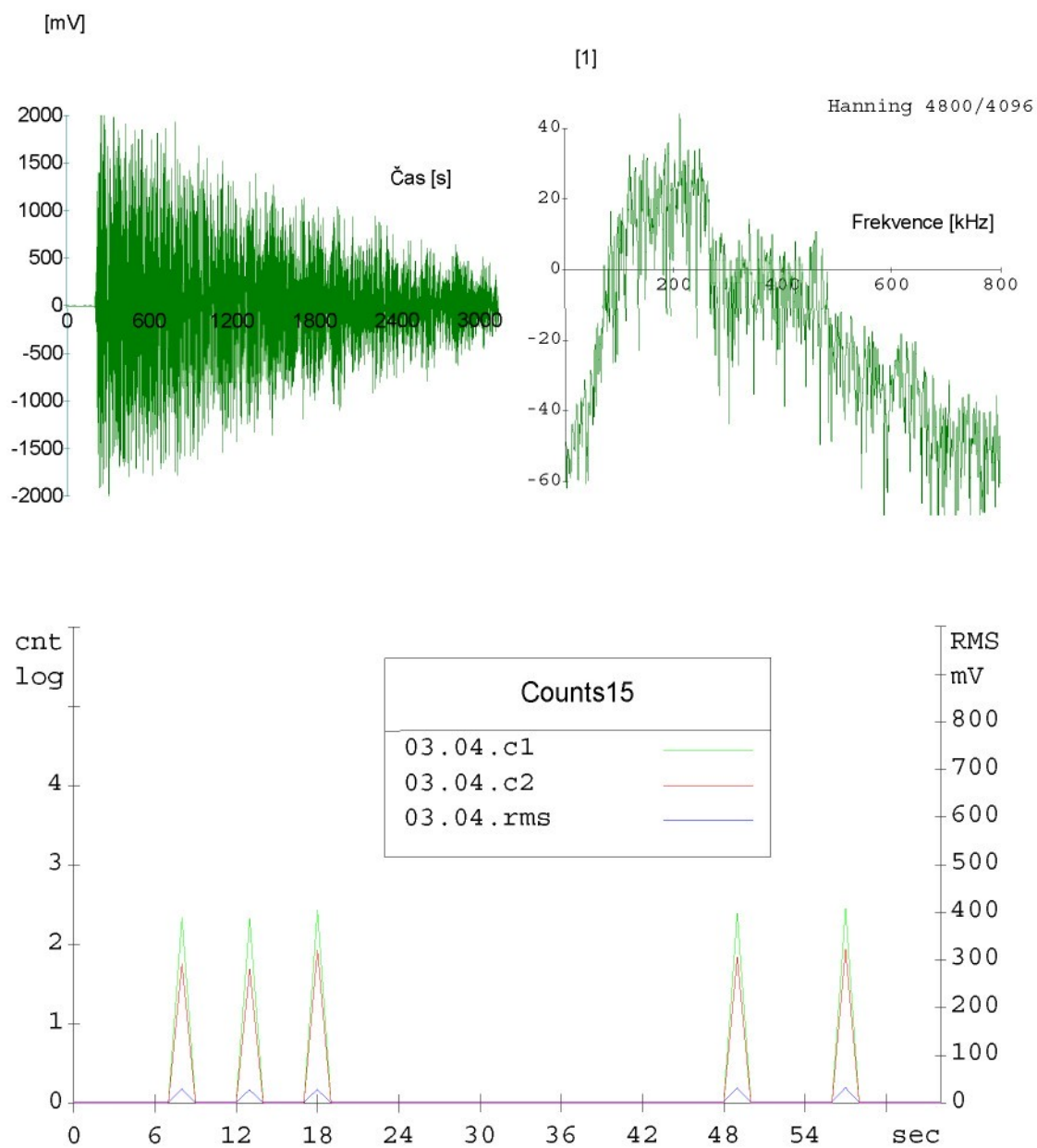
Obr. 7b Grafický výsledek měření označeného 07, signál z externího piezokeramického snímače



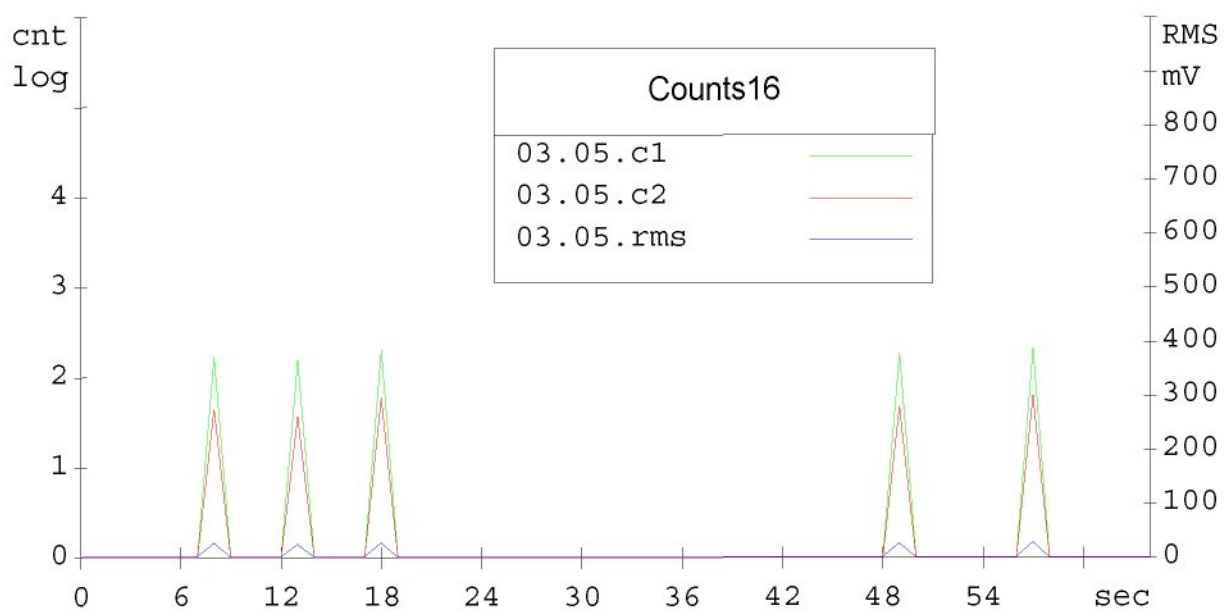
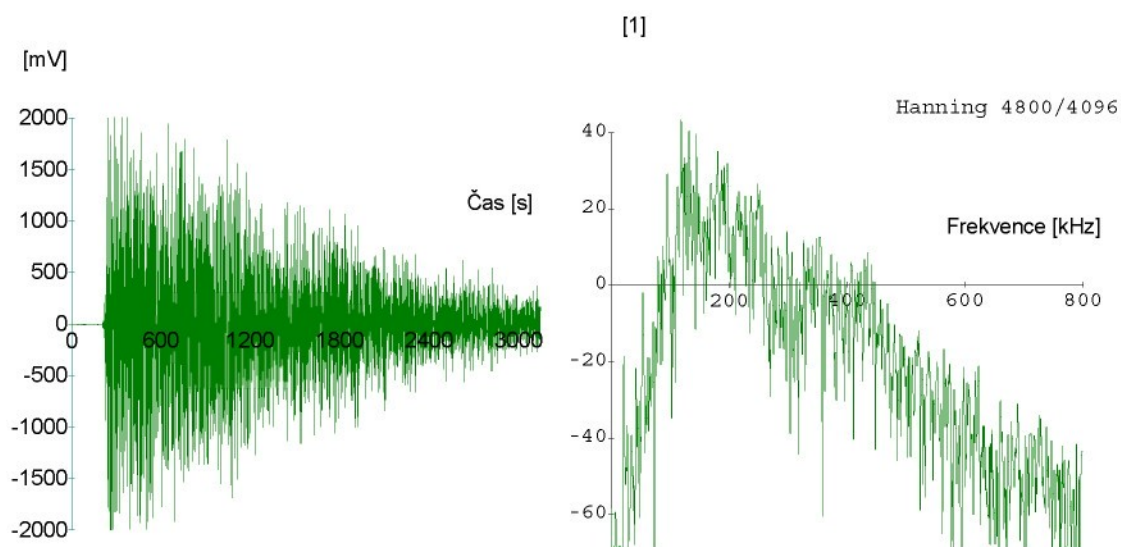
Obr. 8a Grafický výsledek měření označeného 08, signál z interního piezokeramického snímače



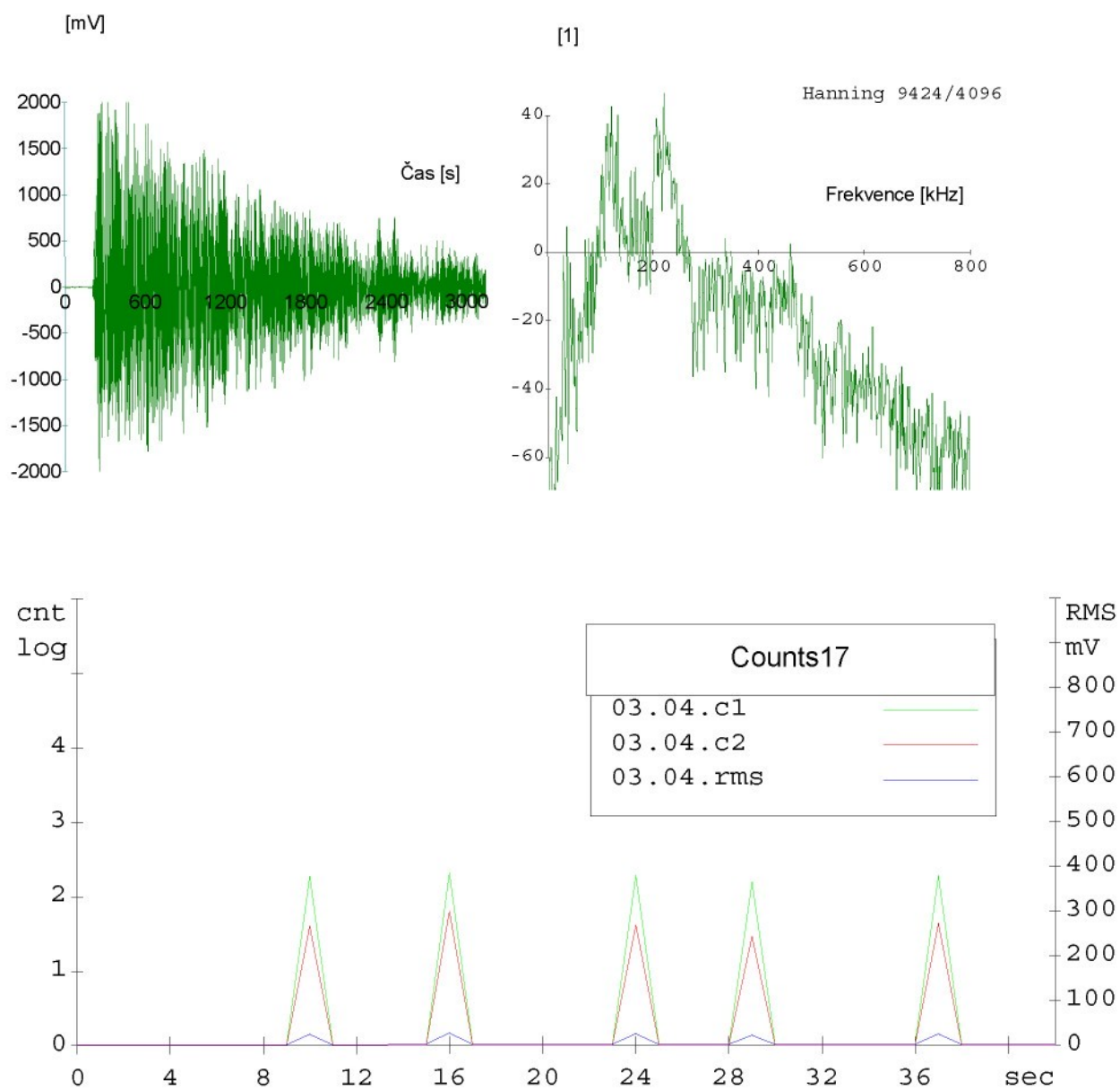
Obr. 8b Grafický výsledek měření označeného 08, signál z externího piezokeramického snímače



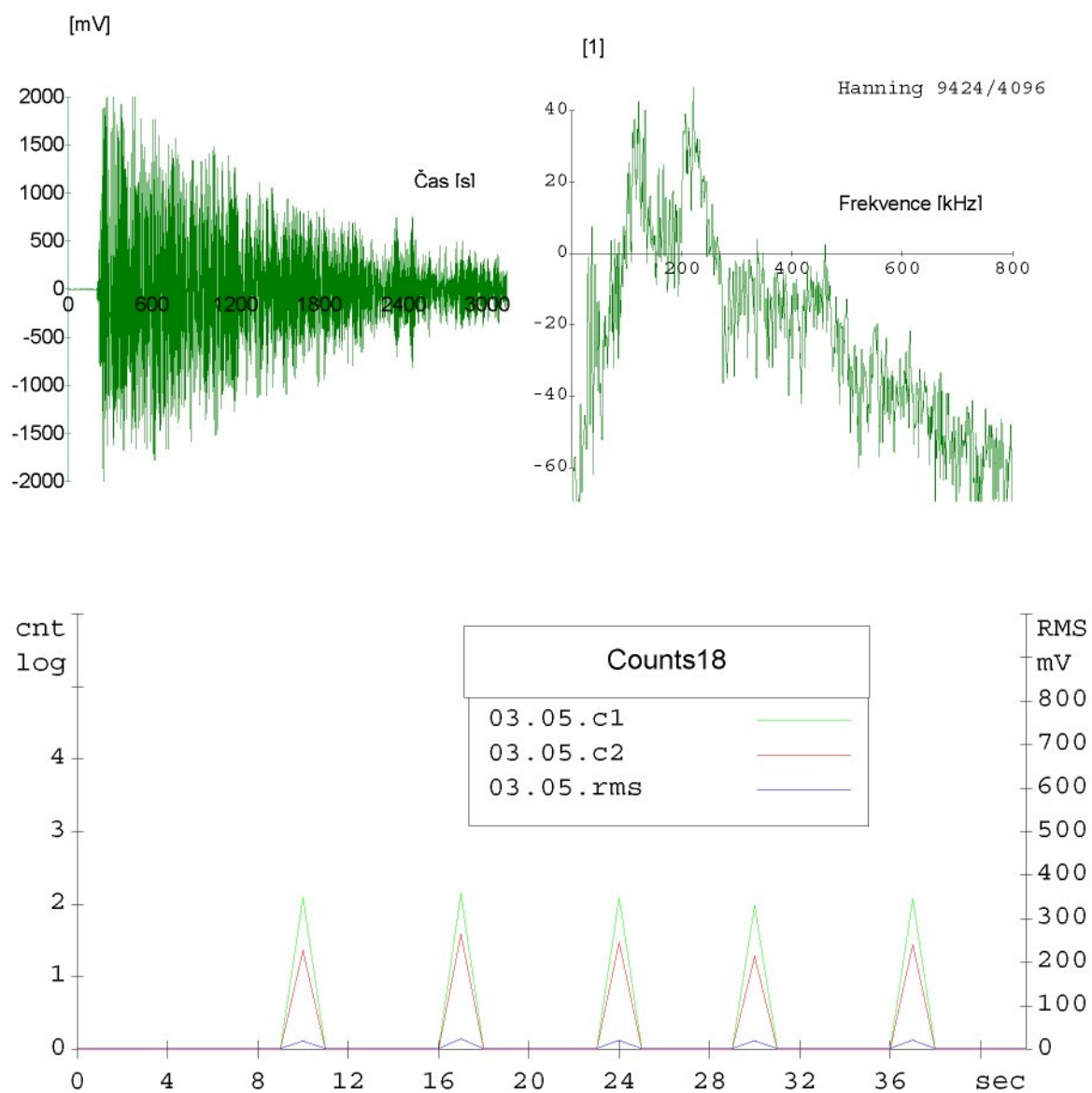
Obr. 9a Grafický výsledek měření označeného 09, signál z interního piezokeramického snímače



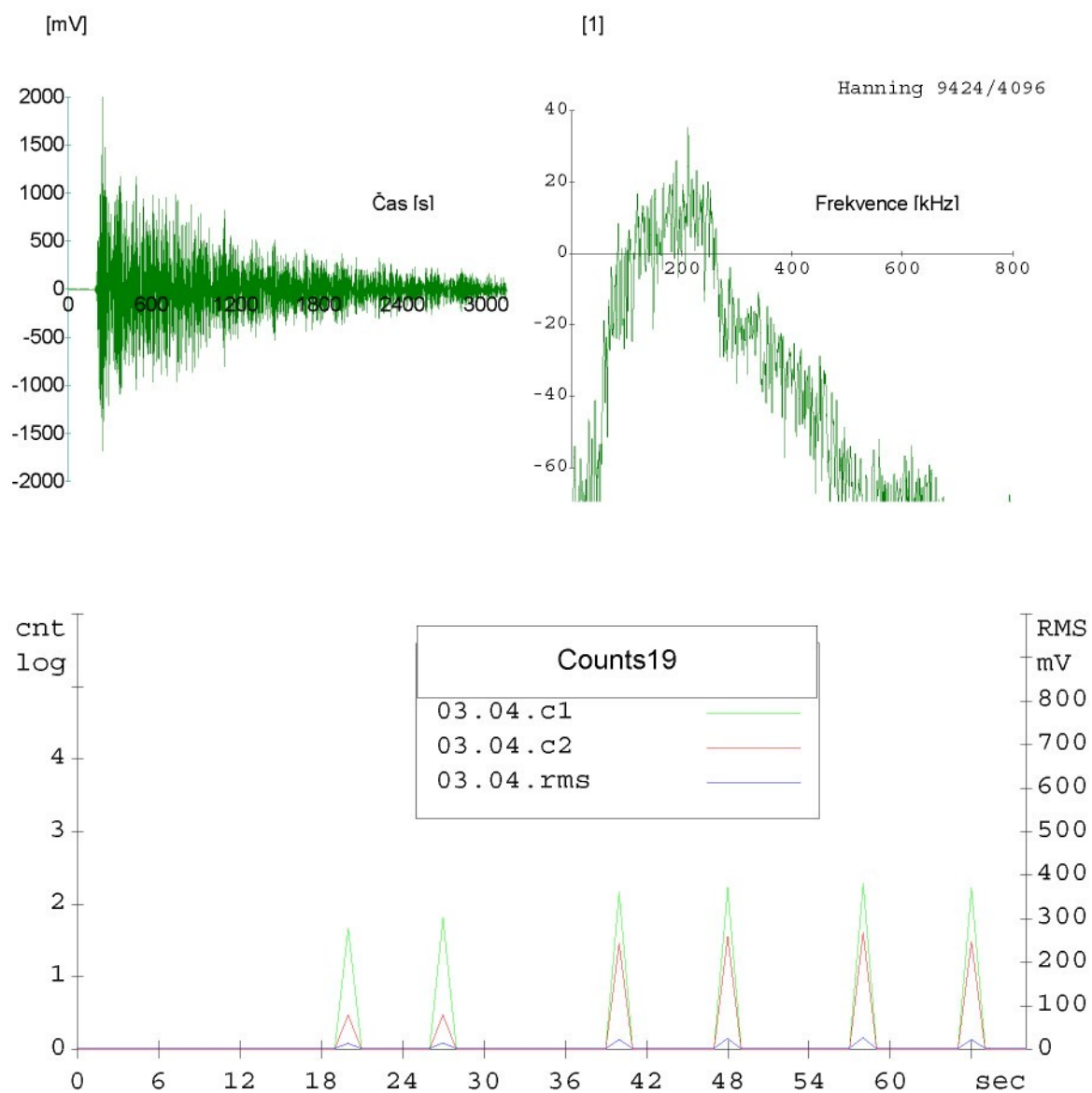
Obr. 9b Grafický výsledek měření označeného 09, signál z externího piezokeramického snímače



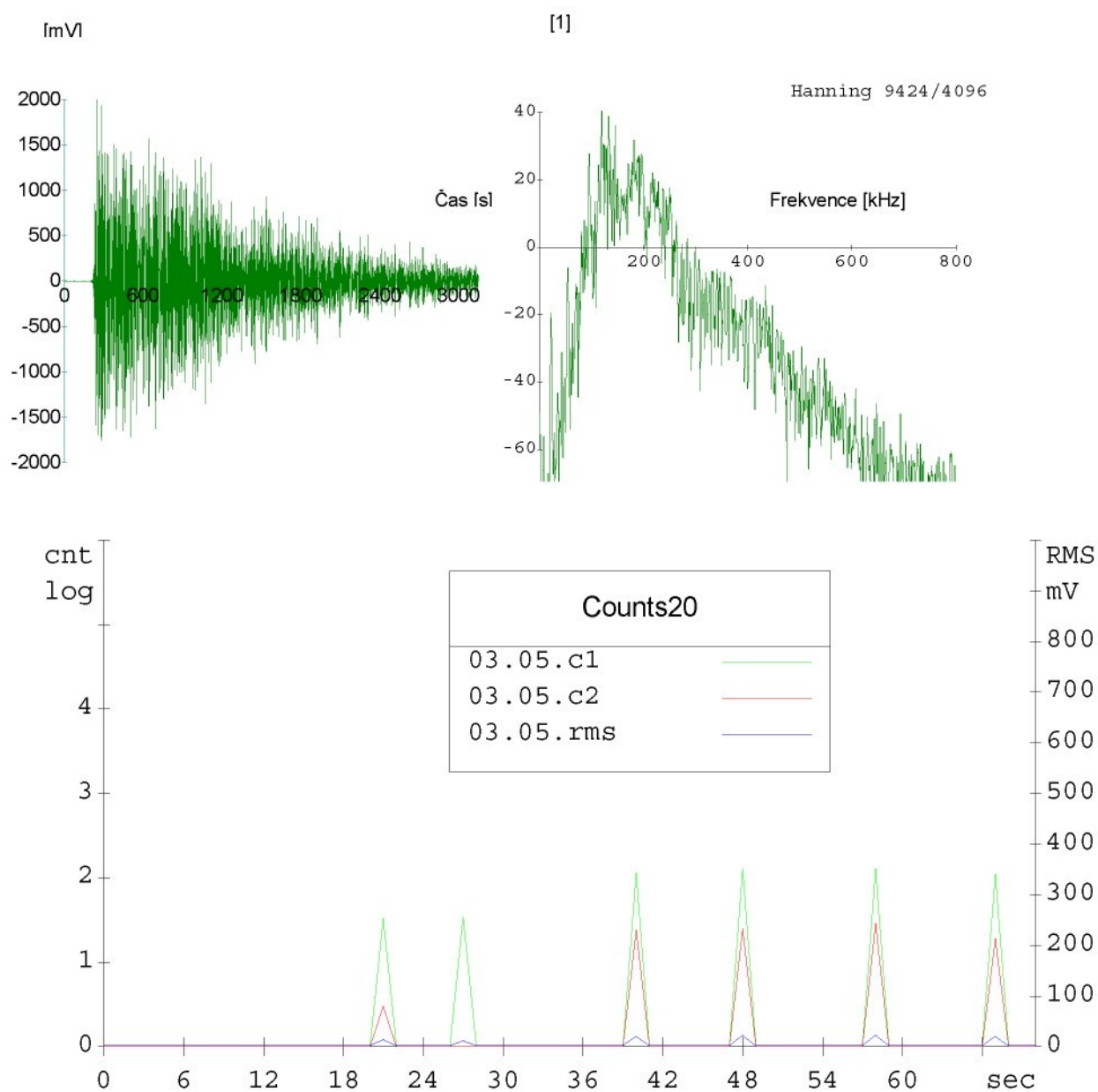
Obr. 10a Grafický výsledek měření označeného 10, signál z interního piezokeramického snímače



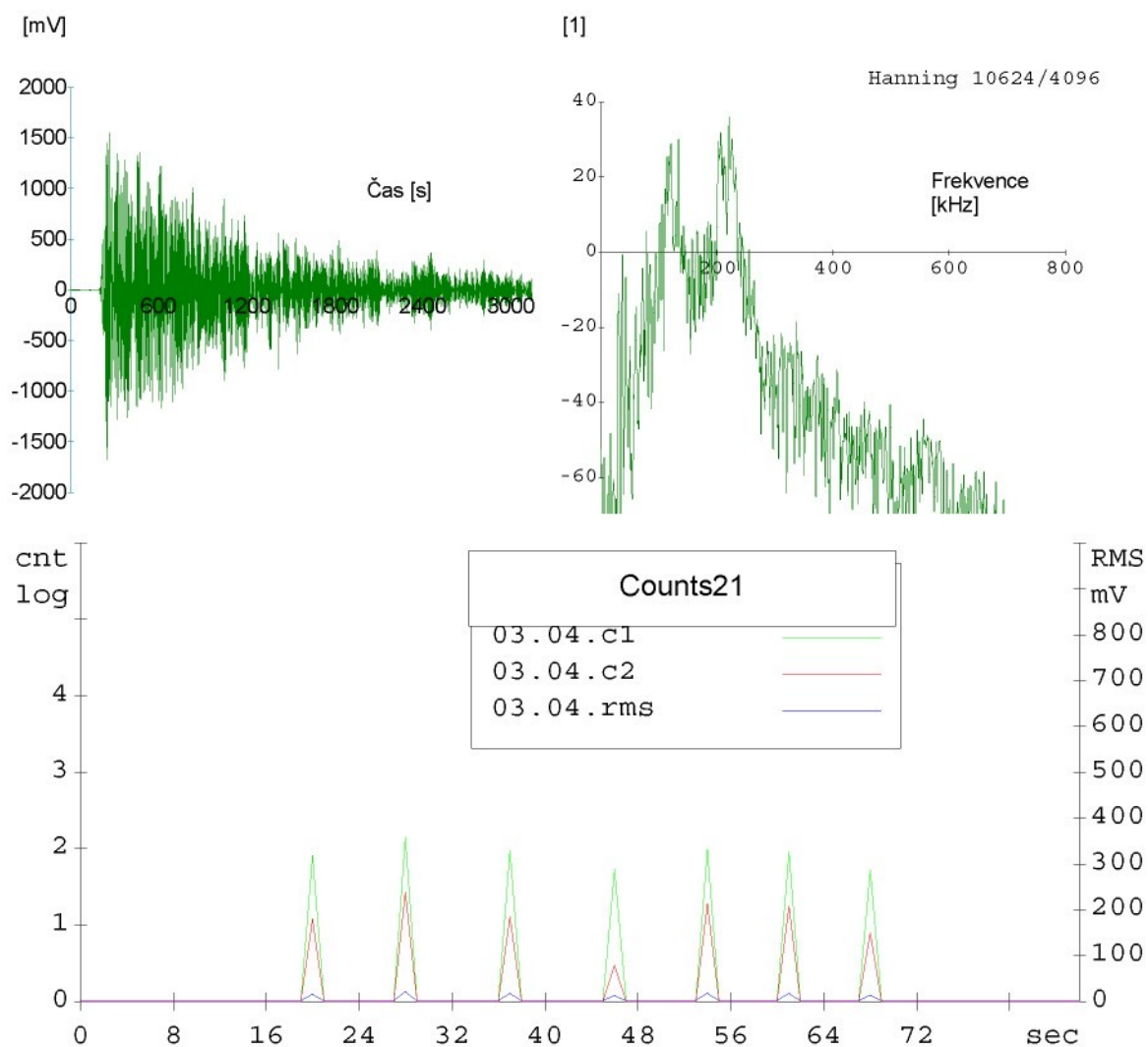
Obr. 10b Grafický výsledek měření označeného 10, signál z externího piezokeramického snímače



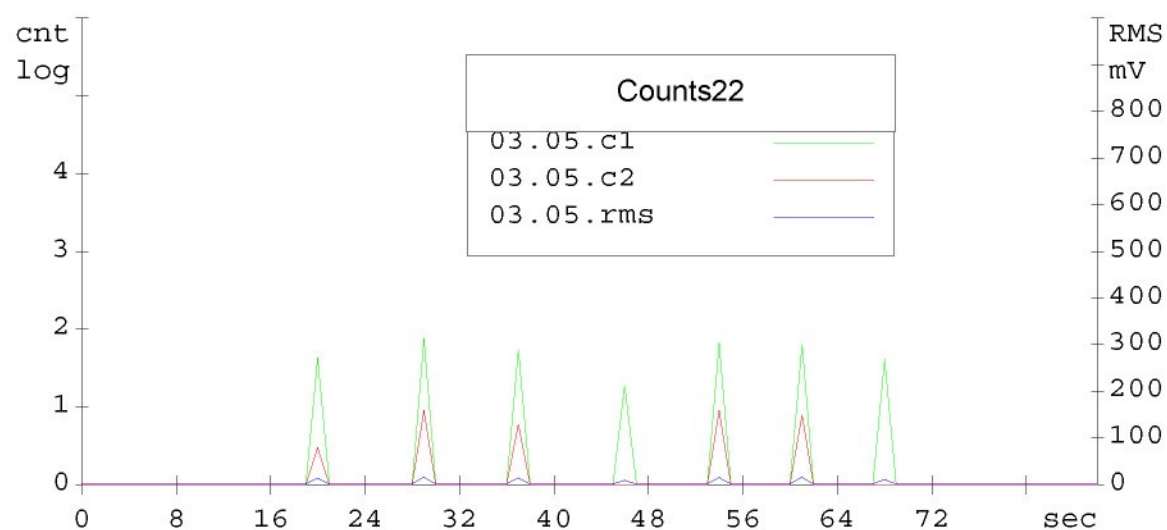
Obr. 11a Grafický výsledek měření označeného 11, signál z interního piezokeramického snímače



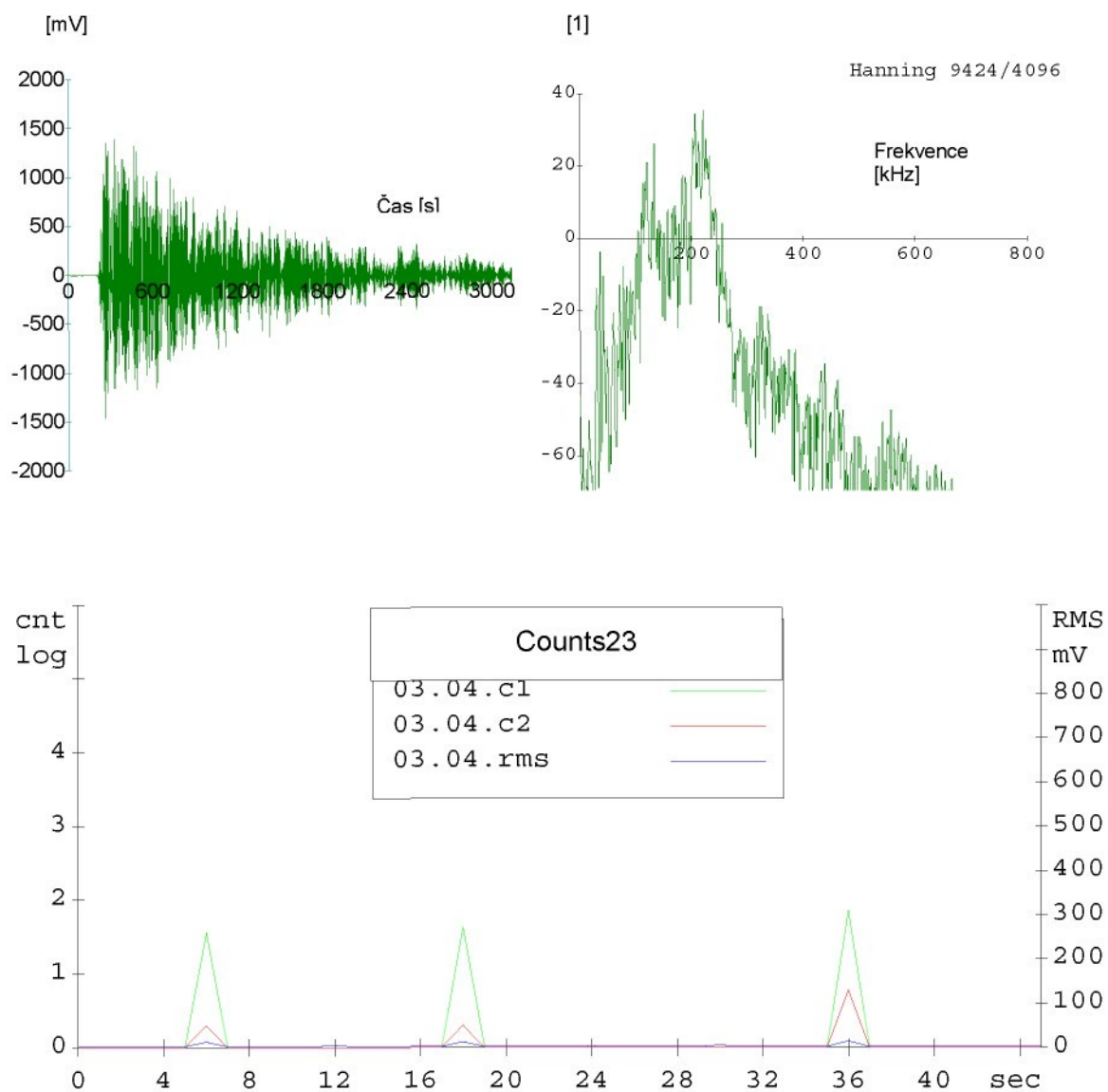
Obr. 11b Grafický výsledek měření označeného 11, signál z externího piezokeramického snímače



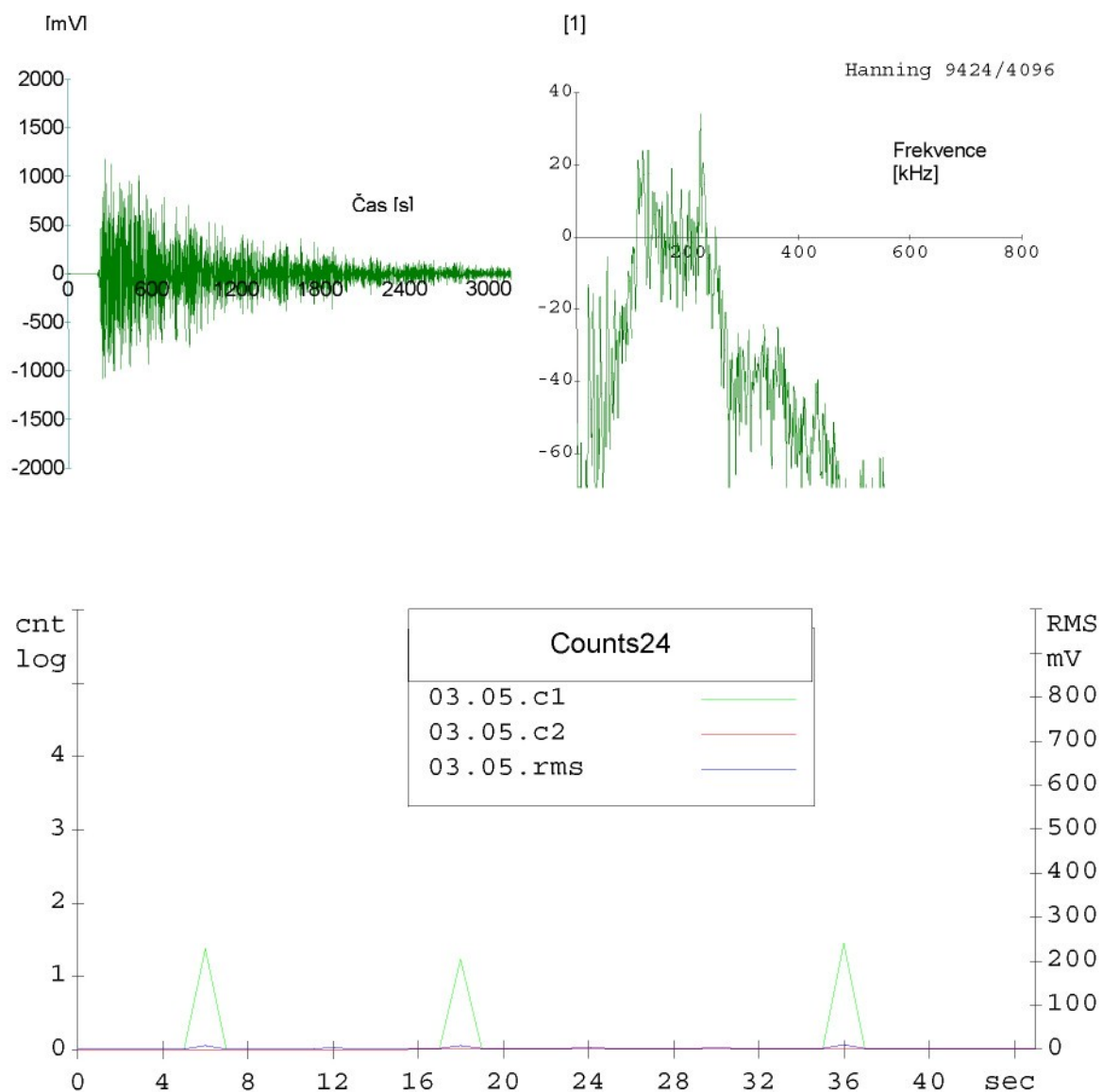
Obr. 12a Grafický výsledek měření označeného 12, signál z interního piezokeramického snímače



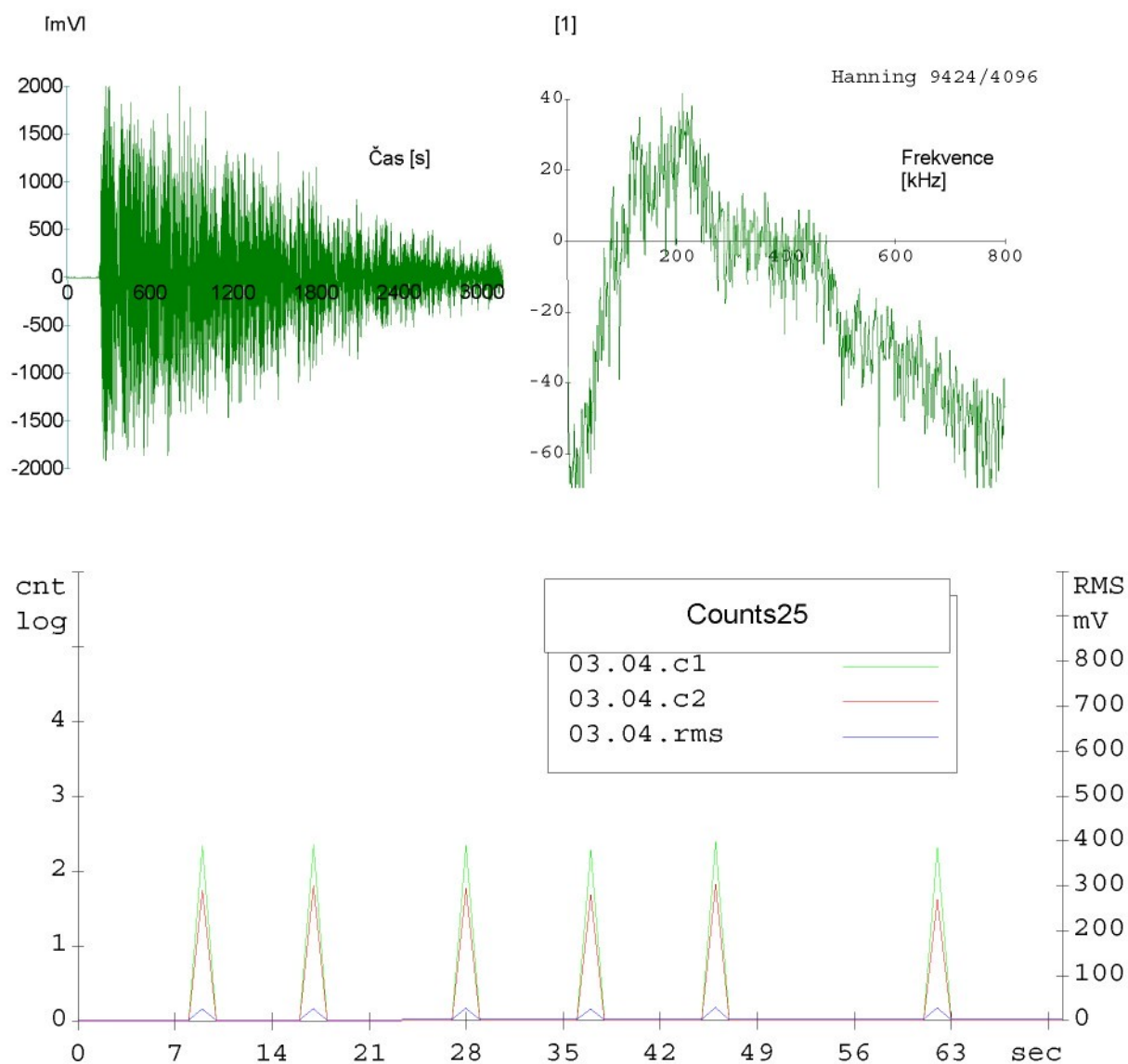
Obr. 12b Grafický výsledek měření označeného 12, signál z externího piezokeramického snímače



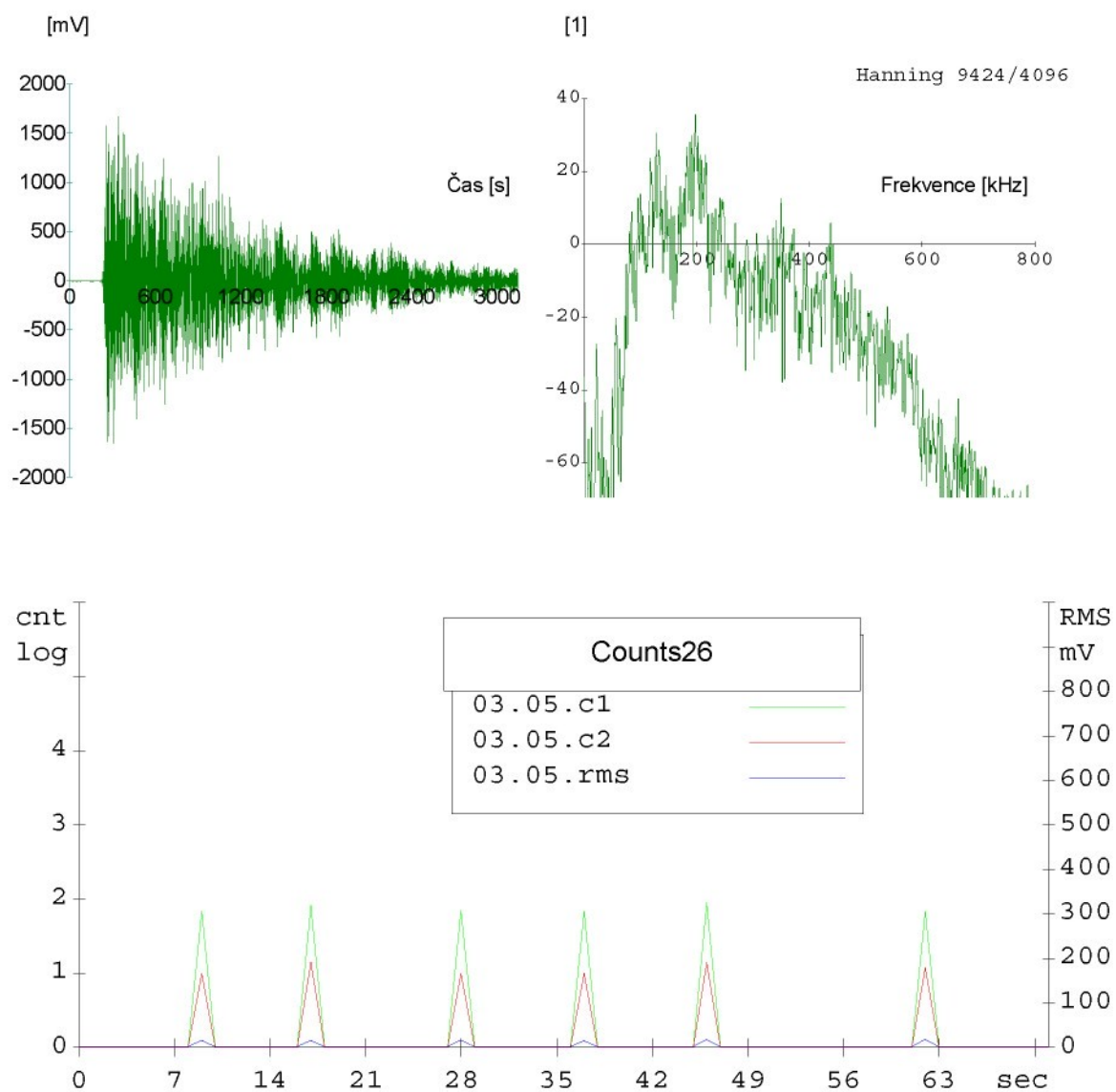
Obr. 13a Grafický výsledek měření označeného 13, signál z interního piezokeramického snímače



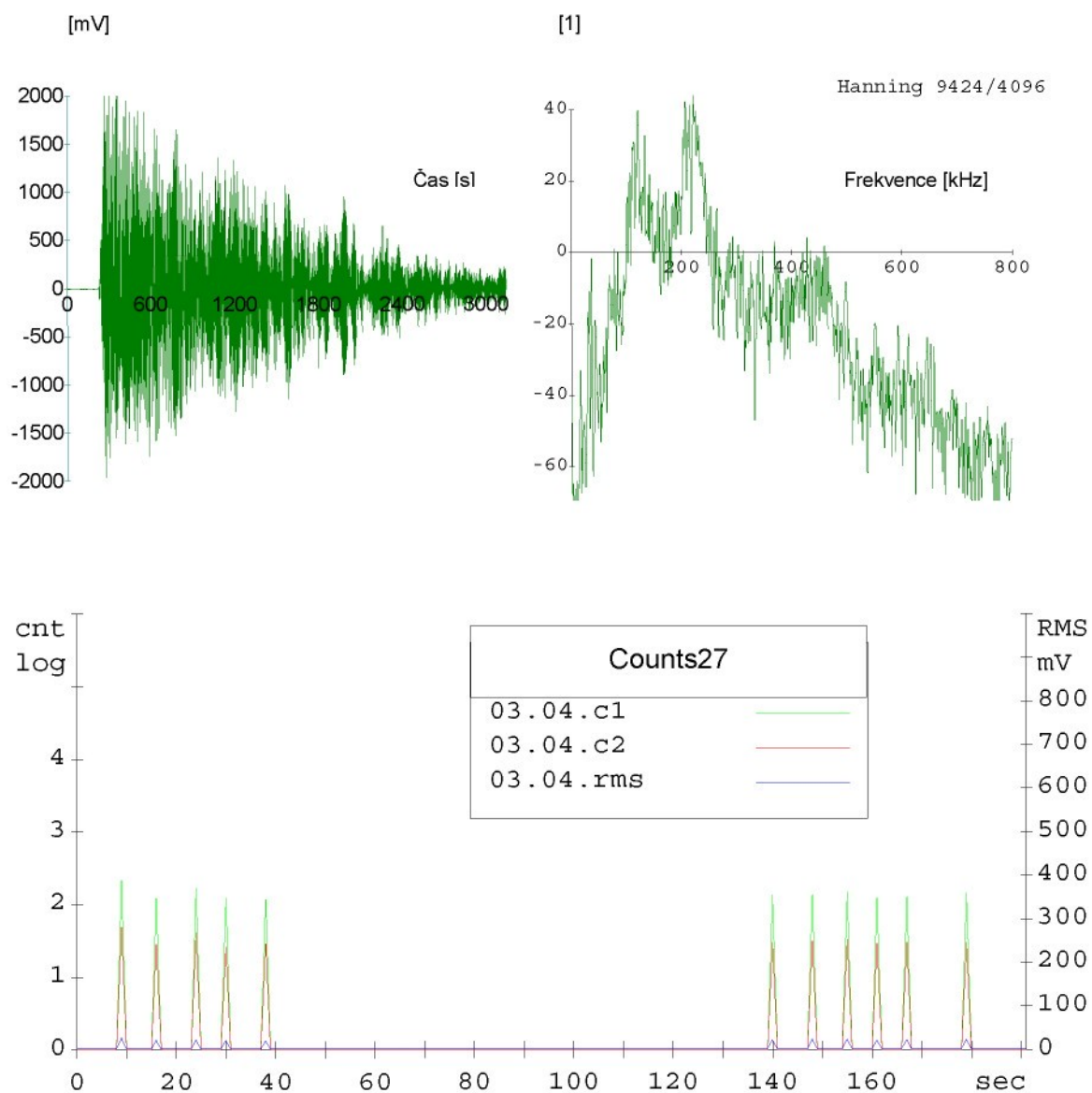
Obr. 13b Grafický výsledek měření označeného 13, signál z externího piezokeramického snímače



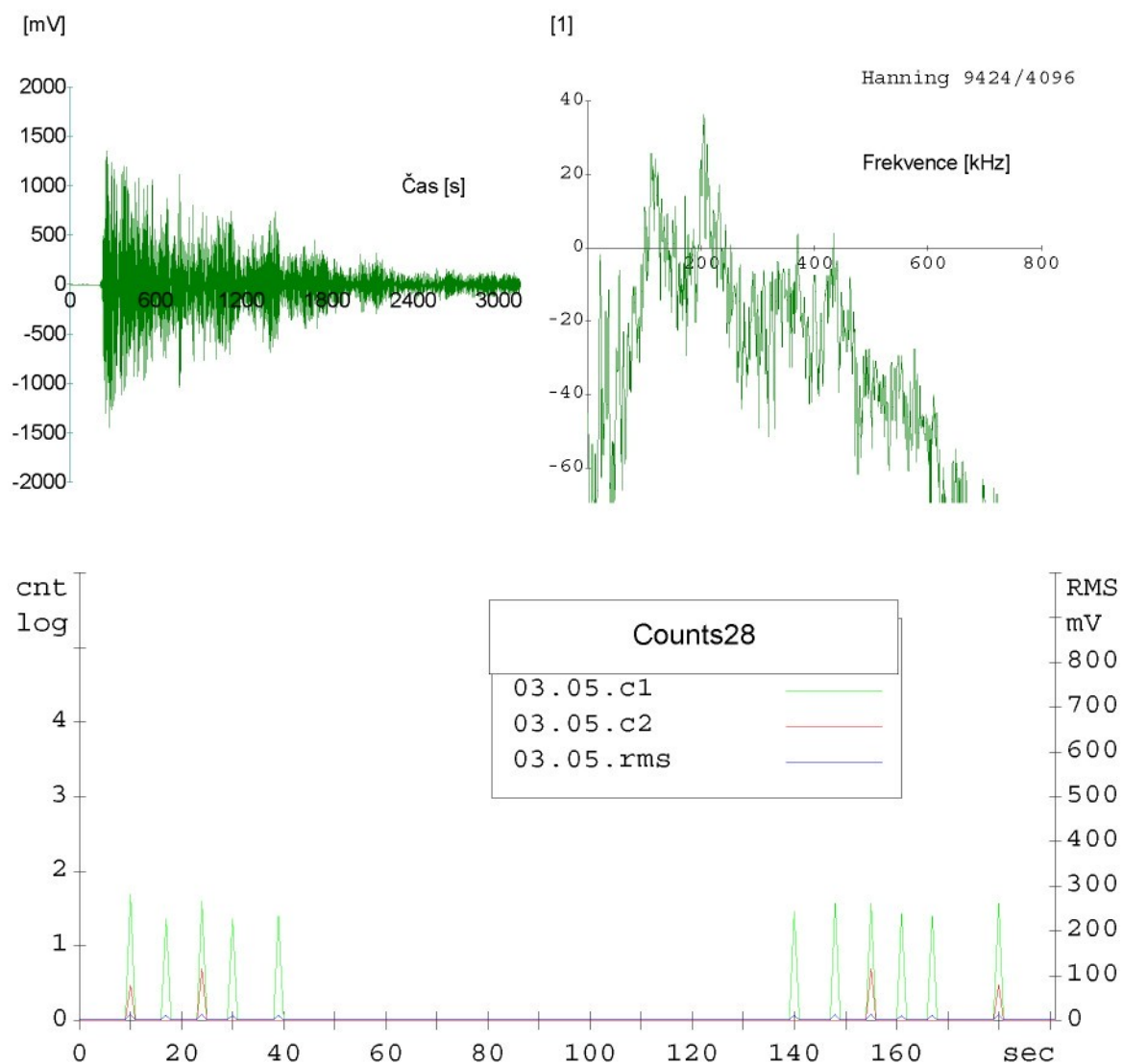
Obr. 14a Grafický výsledek měření označeného 14, signál z interního piezokeramického snímače



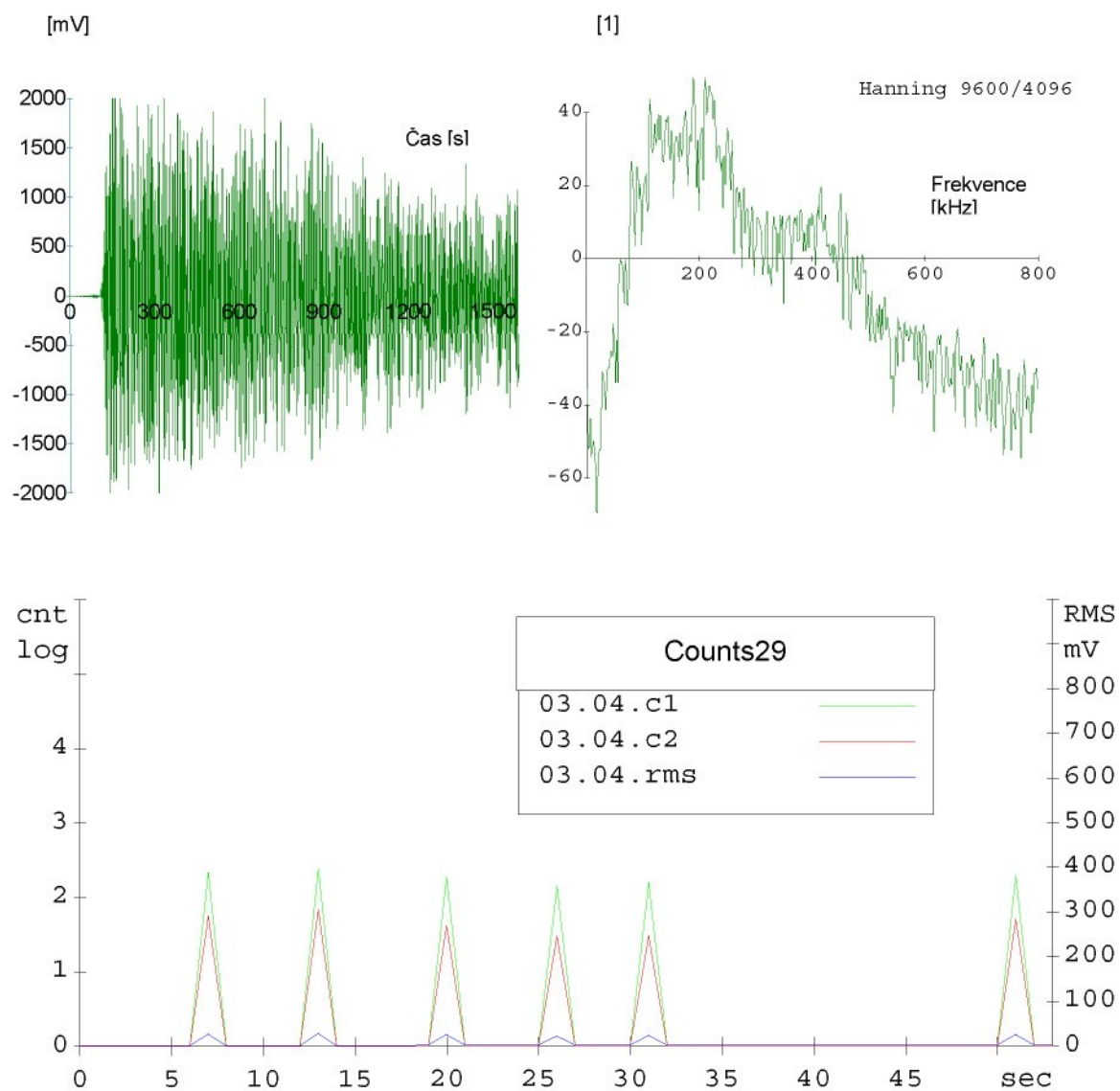
Obr. 14b Grafický výsledek měření označeného 14, signál z externího piezokeramického snímače



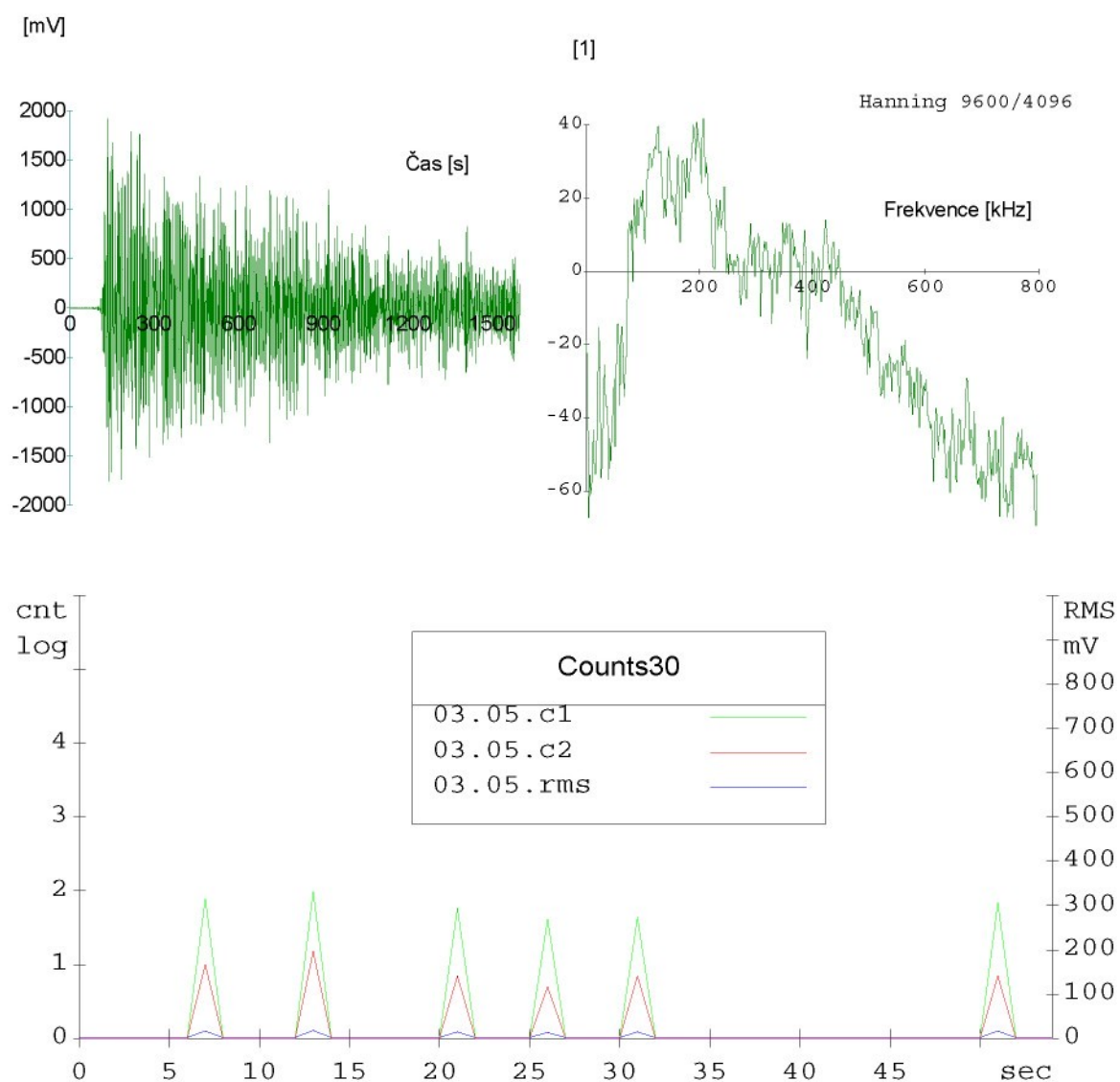
Obr. 15a Grafický výsledek měření označeného 15, signál z interního piezokeramického snímače bez interního předzesilovače



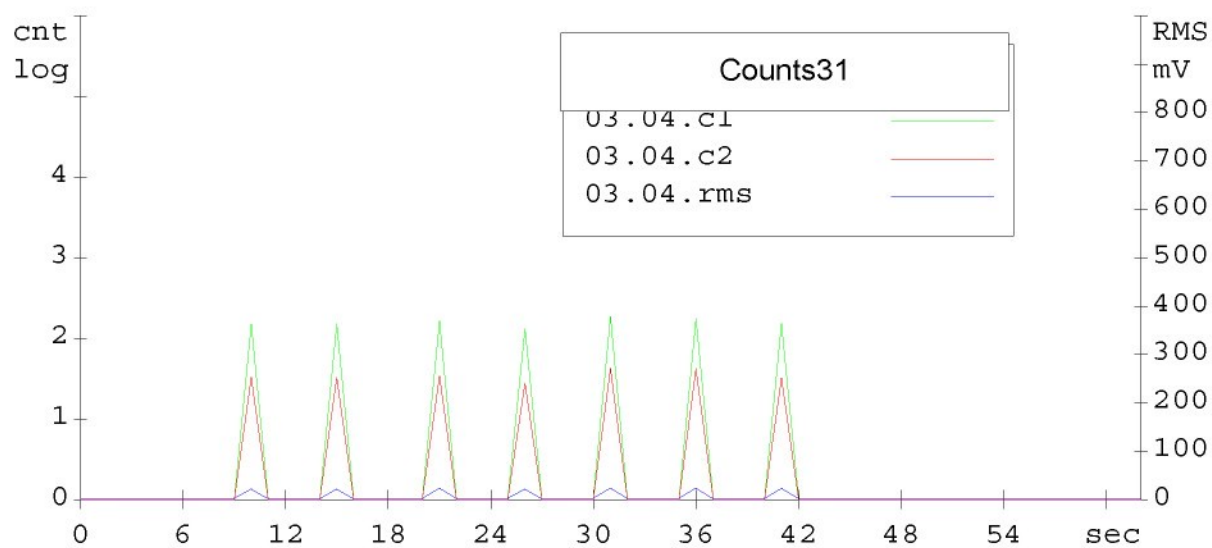
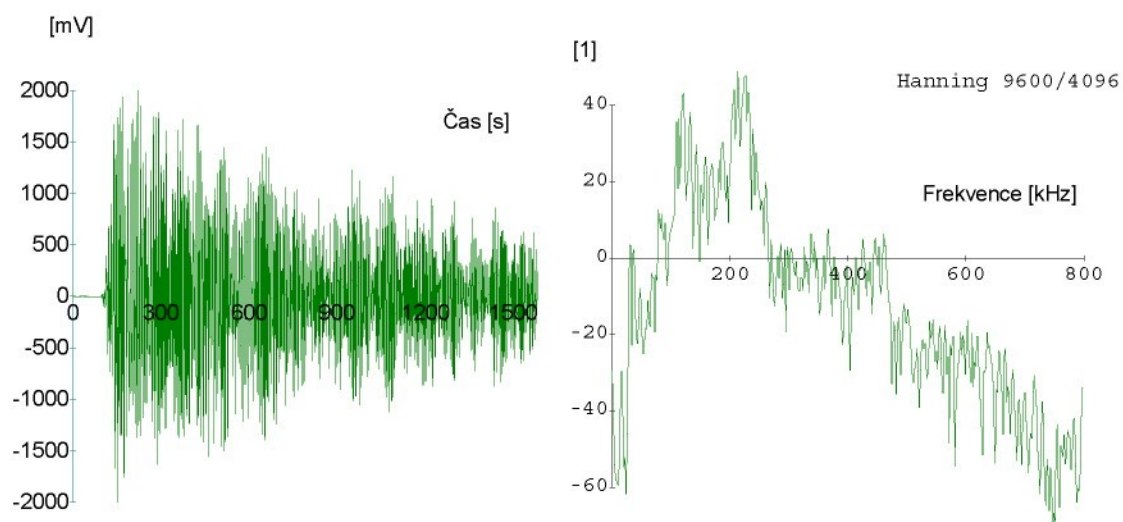
Obr. 15b Grafický výsledek měření označeného 15, signál z externího piezokeramického snímače



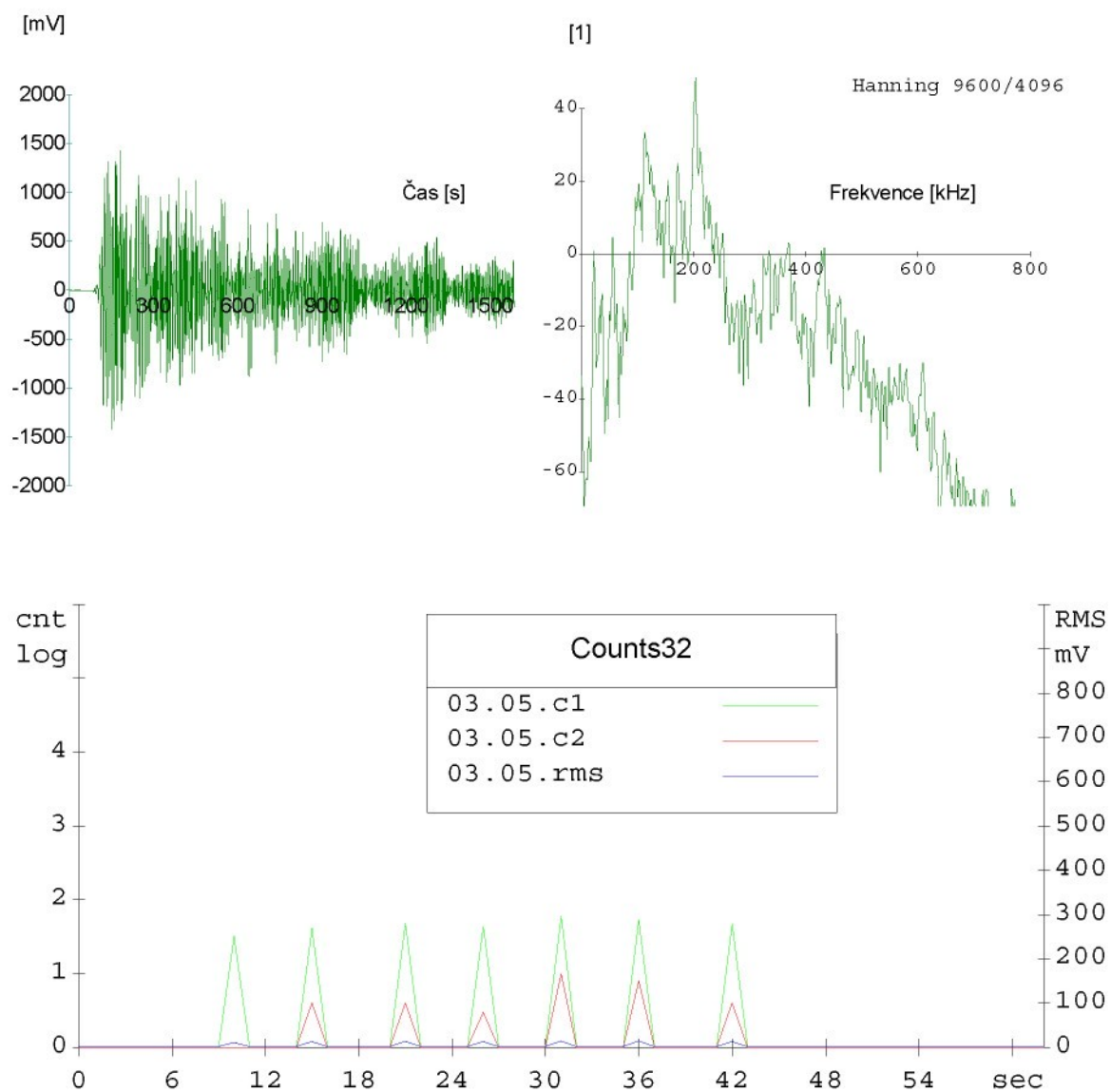
Obr. 16a Grafický výsledek měření označeného 16, signál z interního snímače



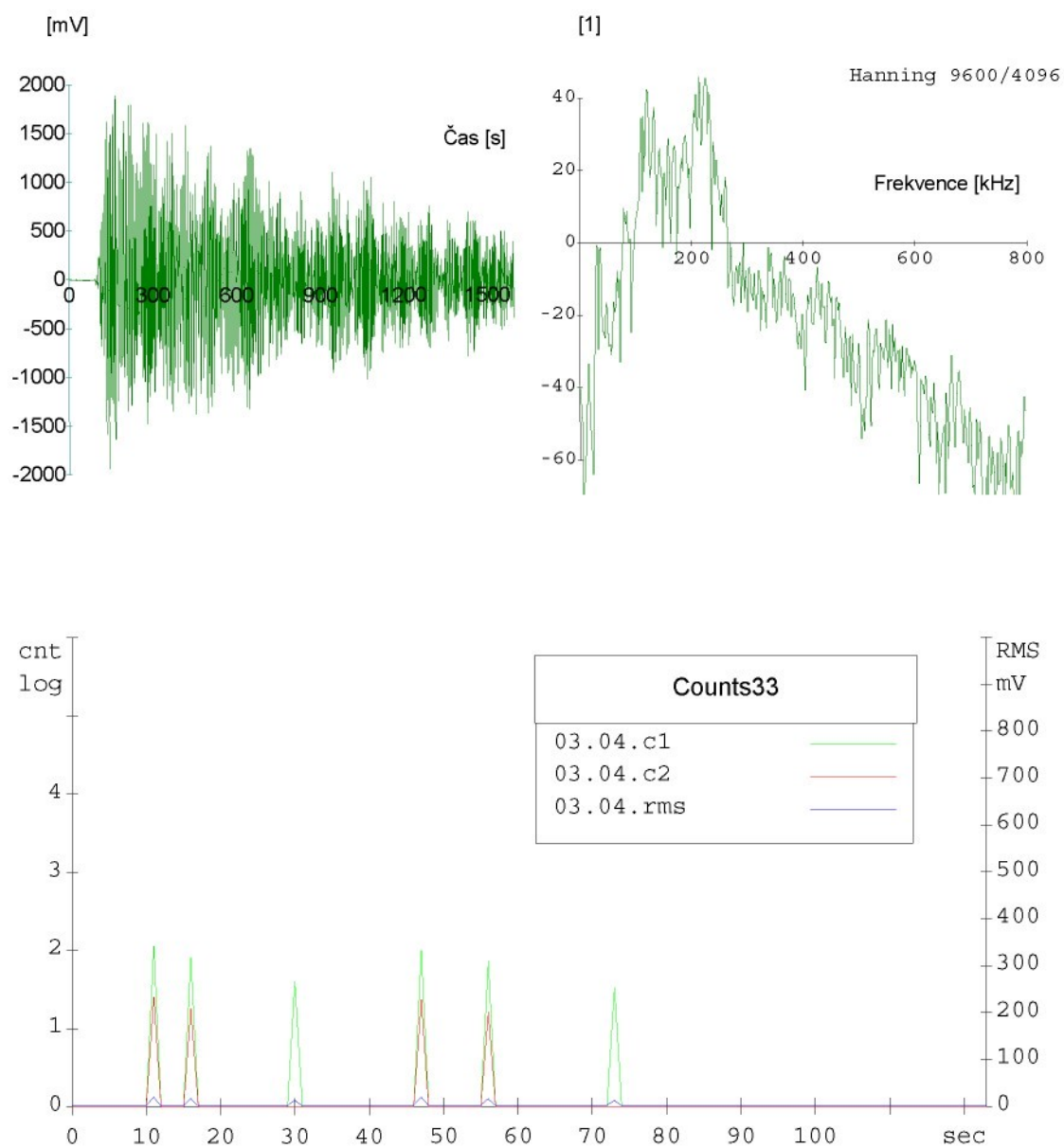
Obr. 16b Grafický výsledek měření označeného 16, signál z externího snímače bez předzesilovače



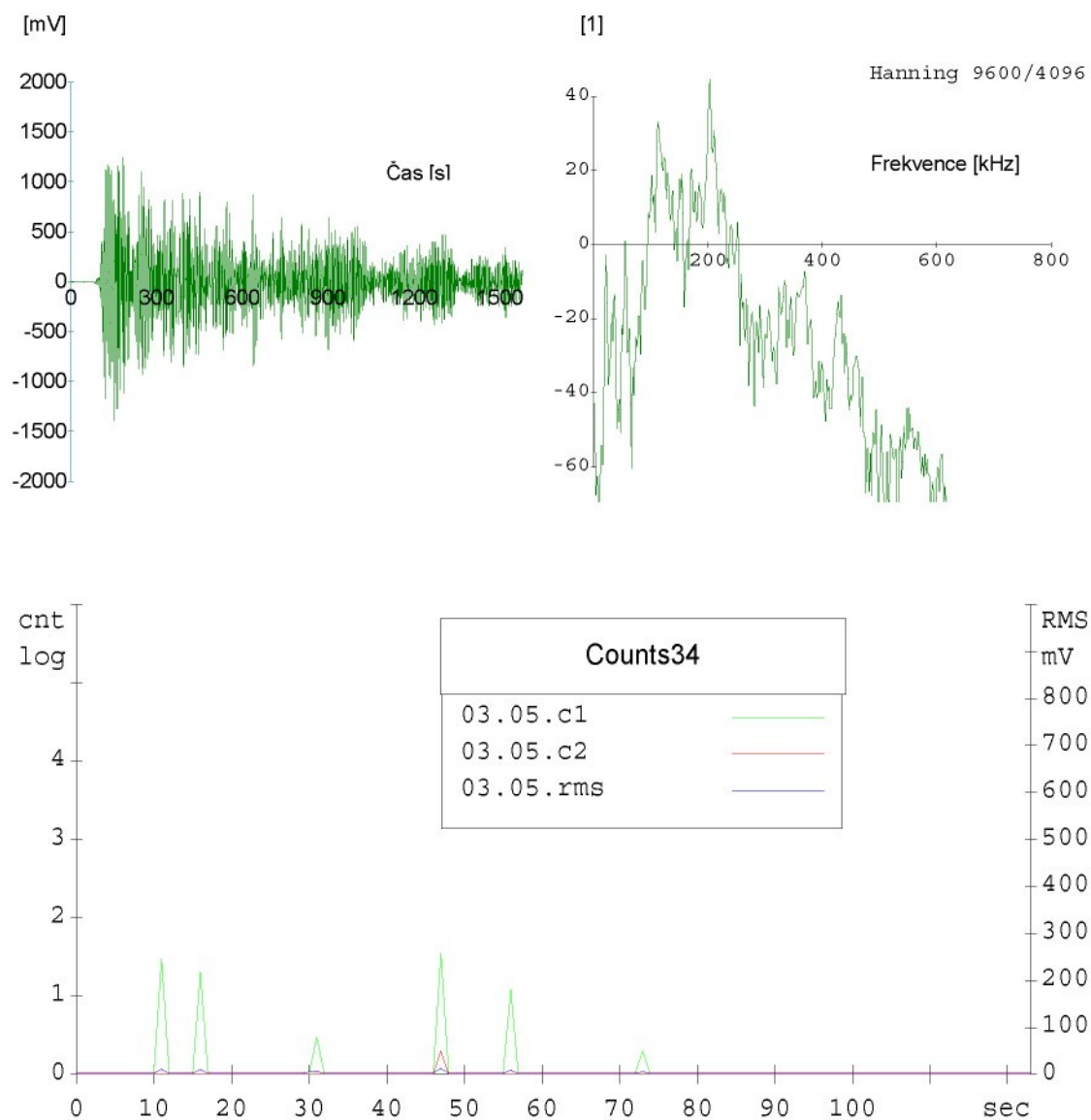
Obr. 17a Grafický výsledek měření označeného 17, signál z interního snímače



Obr. 17b Grafický výsledek měření označeného 17, signál z externího snímače bez předzesilovače

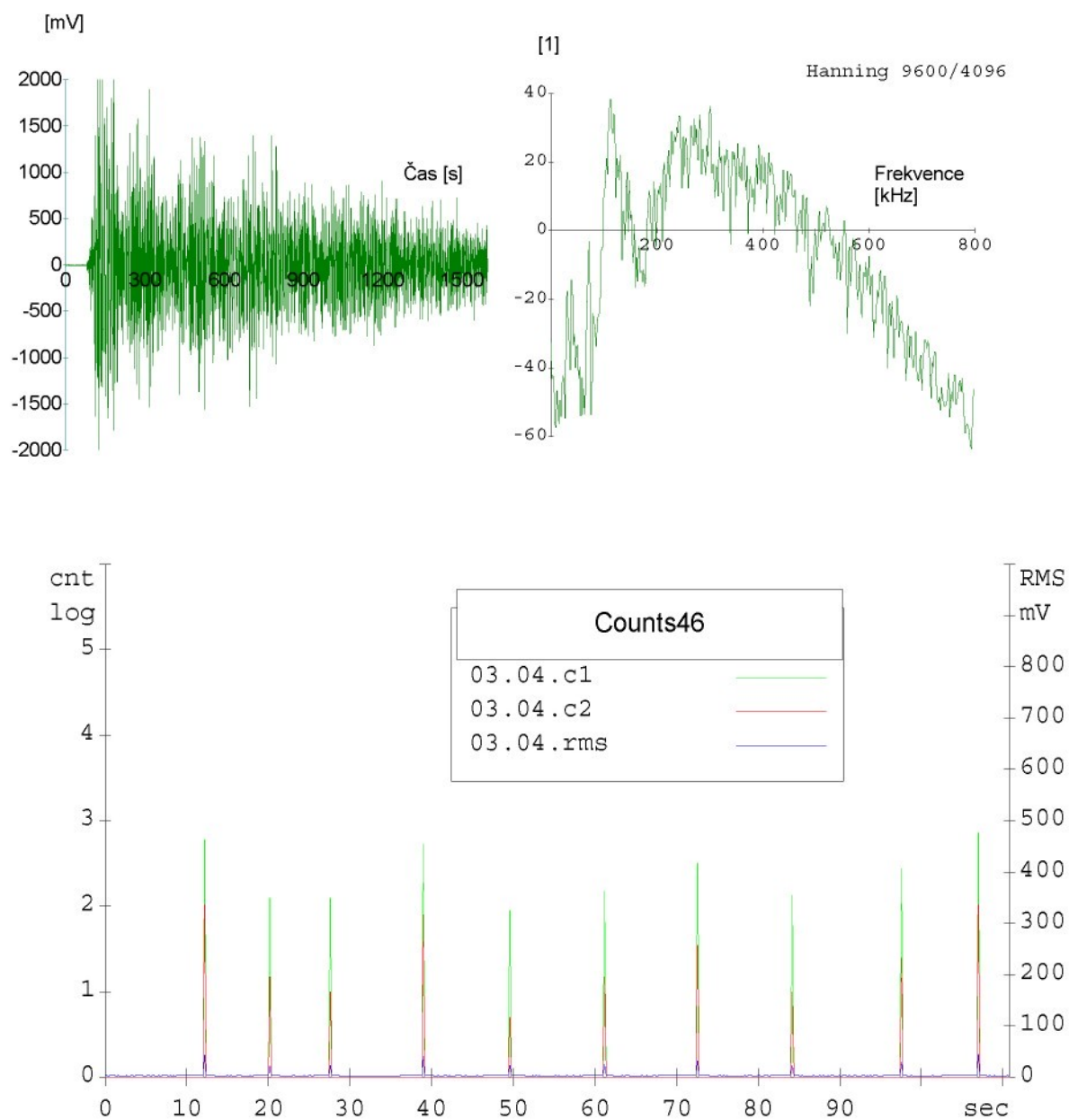


Obr. 18a Grafický výsledek měření označeného 18, signál z interního snímače

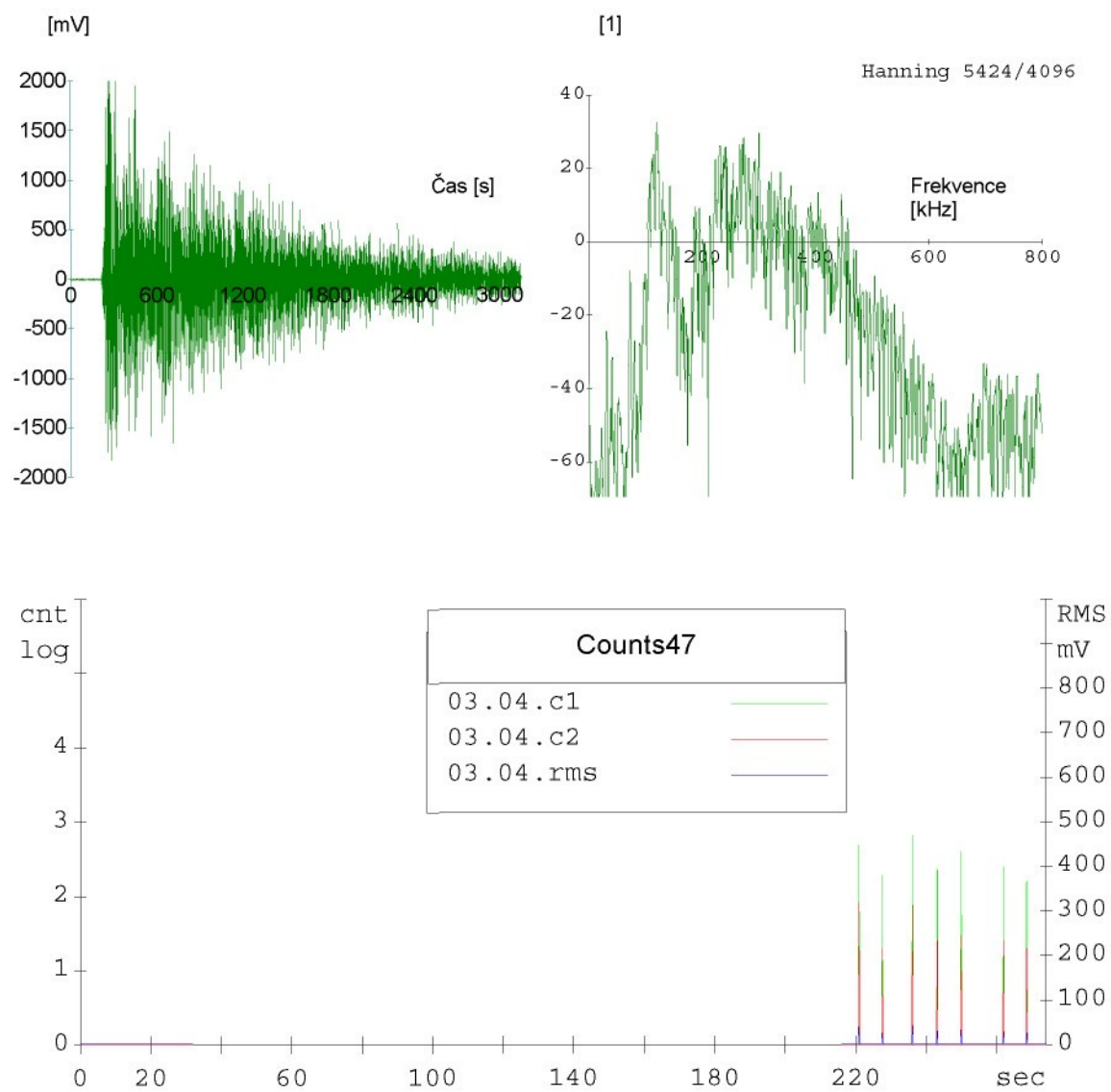


Obr. 18b Grafický výsledek měření označeného 18, signál z externího snímače bez předzesilovače

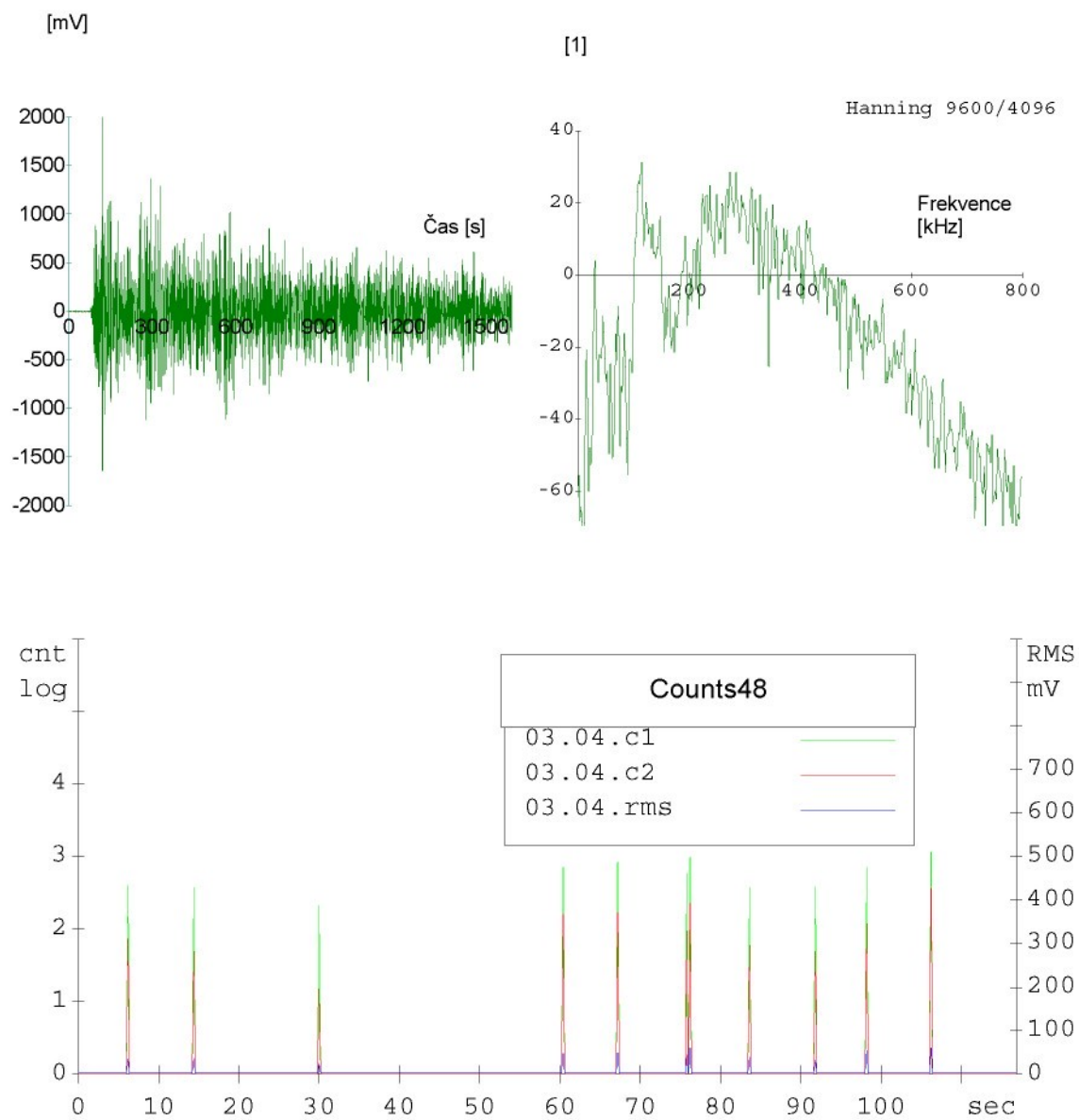
Přehled provedených měření



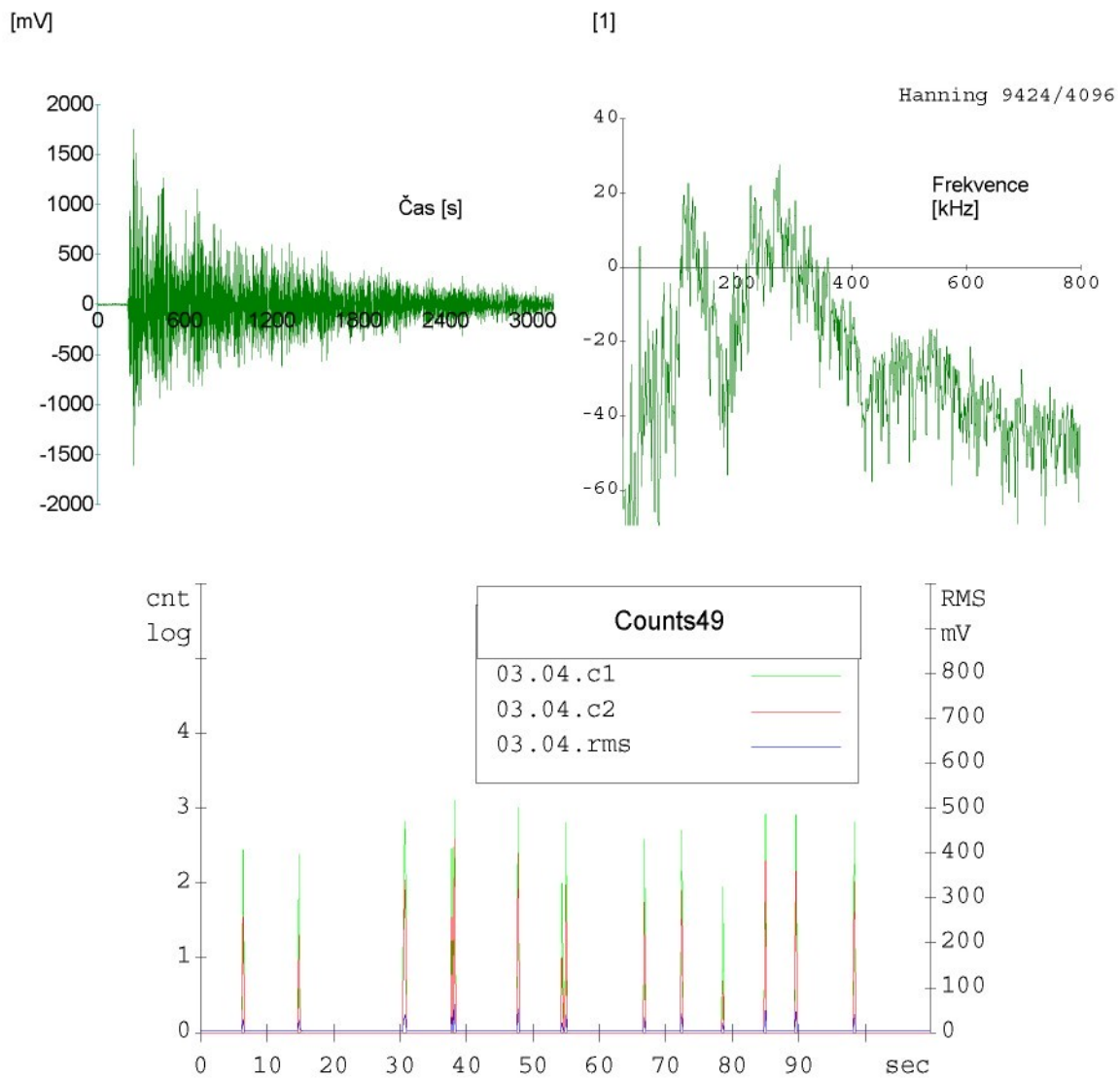
Obr. 1 Grafický výsledek měření označeného P01b



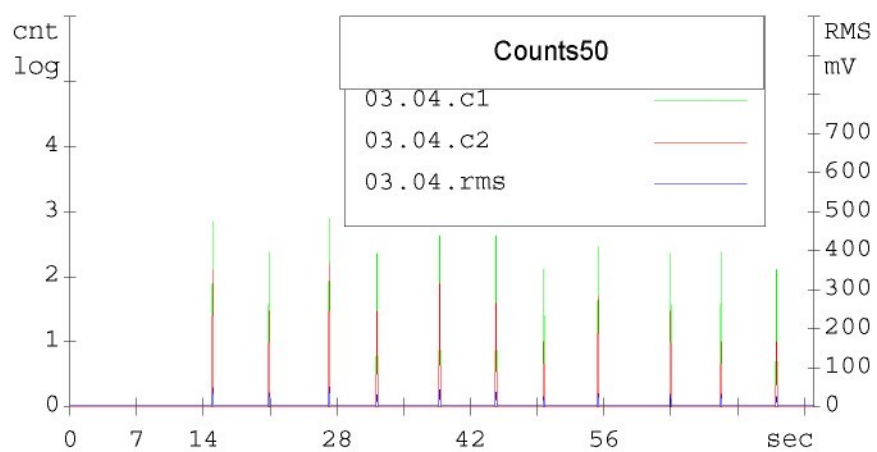
Obr. 2 Grafický výsledek měření označeného P02



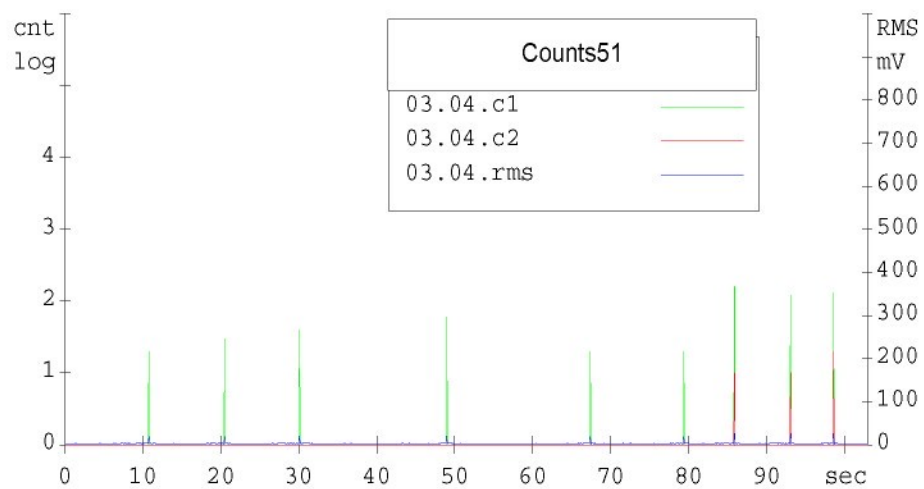
Obr. 3 Grafický výsledek měření označeného P03



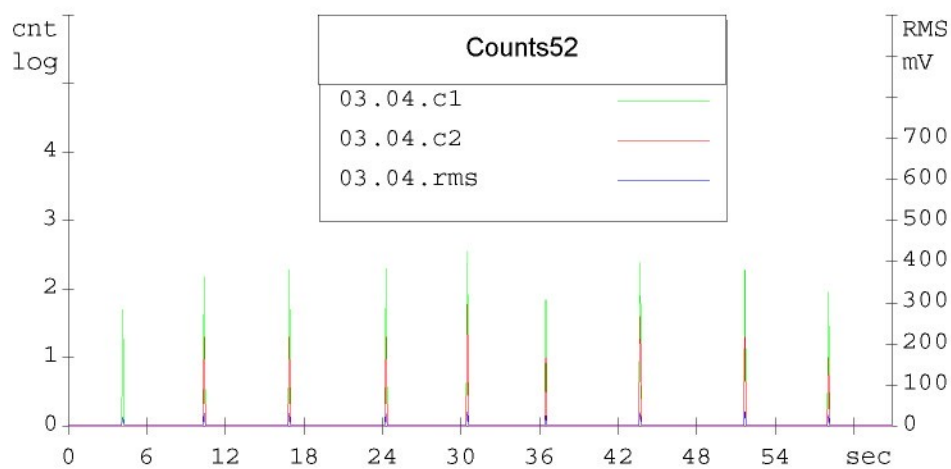
Obr. 4 Grafický výsledek měření označeného P04



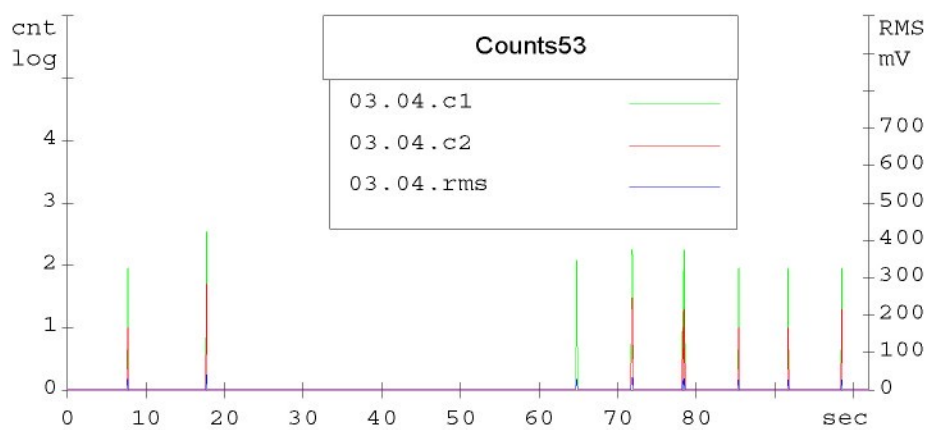
Obr. 5 Grafický výsledek měření označeného P06



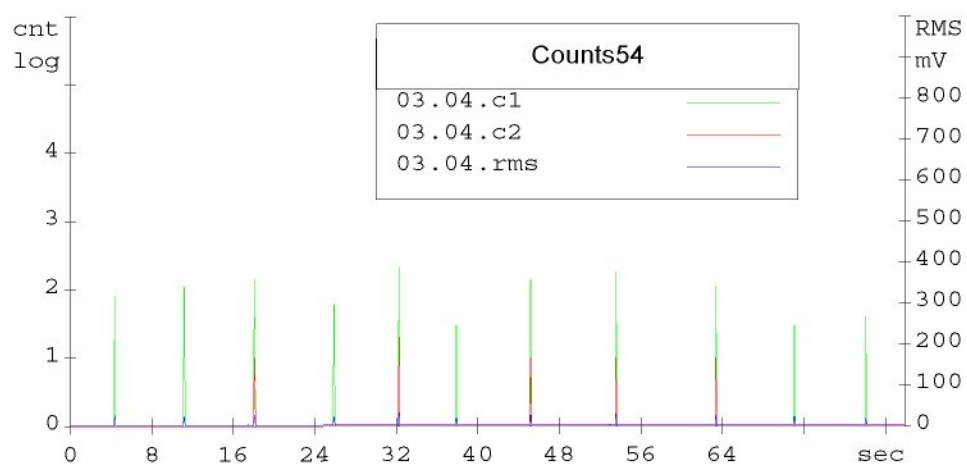
Obr. 6 Grafický výsledek měření označeného P07



Obr. 7 Grafický výsledek měření označeného P08



Obr. 8 Grafický výsledek měření označeného P09



Obr. 9 Grafický výsledek měření označeného P10