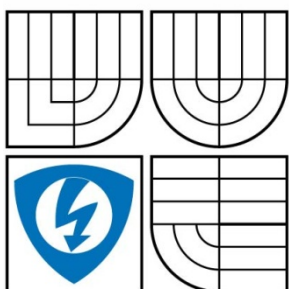


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ A ELEKTROMAGNETICKÉ EMISE

ANALYSIS OF ACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC EMISSION SIGNAL

DISPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

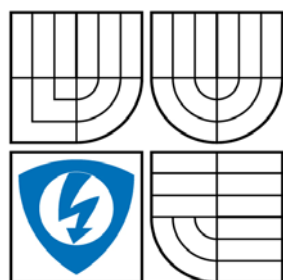
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR BOUDNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR SADOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student:

Bc. Petr Boudný

ID: 89335

Ročník:

2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Analýza signálů akustické a elektromagnetické emise

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je nalézt vhodné metody analýzy signálů akustické a elektromagnetické emise, které umožní poodhalit mechanismy vzniku těchto signálů v pevných látkách. Předpokládá se využití spektrální analýzy, vlnkové transformace a dalších vhodných metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Kozumplík J., Kolář R., Jan J.: Číslicové zpracování signálů v prostředí Matlab, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2001, ISBN 80-214-1964-4
[2] Šebesta V., Systémy, procesy a signály 1, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 1997, ISBN 80-214-0942-8

Termín zadání:

9.2.2009

Termín odevzdání:

26.5.2009

Vedoucí práce:

Ing. Petr Sadovský, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNENÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt – CZ

Diplomová práce je zaměřena na analýzu signálů akustické a elektromagnetické emise. Tyto signály vznikají působením vnějšího napětí na materiál, které vyvolá plastickou deformaci a vznik trhlin. Spektrální analýzou je patrné, že se jedná o signály nestacionární. K analýze byla využita vlnková transformace, která tak popisuje signál v čase i ve frekvenci.

Klíčová slova – CZ

Akustická emise, elektromagnetická emise, vznik trhlin, spektrální analýza, vlnková transformace, krátkodobá Fourierova transformace.

Abstract – EN

Master's thesis is focused to analyse the acoustic and electromagnetic emission signals. These signals generate external power applied on the material. This power put there plastic deformation and create cracks. Spectral analyse show that signals are non-stationary. Wavelet transformation was used to spectral analyse which informate about time-frequency vaules of the signal.

Keywords – EN

Acoustic emission, electromagnetic emission, cracks, spectral analyse, wavelet transformation, short-time Fourier transformation.

Bibiliografická citace

BOUDNÝ, P. *Analýza signálů akustické a elektromagnetické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Sadovský, Ph.D.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza signálů akustické a elektromagnetické emise jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Sadovskému, Ph.D., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

Obsah

2	Teorie akustické a elektromagnetické emise	3
2.1	Elektromagnetická emise	3
2.2	Akustická emise	4
3	Vznik trhliny	6
3.1	Vazby mezi atomy	6
3.1.1	Iontová vazba	7
3.1.2	Kovalentní vazba	8
3.1.3	Kovová vazba	8
3.2	Základy krystalografie	9
3.2.1	Krystalické mřížky	10
3.2.2	Bodové poruchy	11
3.2.3	Čárové poruchy – dislokace	11
3.2.4	Plošné poruchy	12
3.3	Plastická deformace monokrystalů	12
3.4	Plastická deformace polykrystalu	13
4.	Generace signálů akustické a elektromagnetické emise	14
5.	Metody snímání elektromagnetické a akustické emise	15
5.1	Snímání elektromagnetické emise	15
5.2	Snímání akustické emise	16
6.	Měření signálů akustické a elektromagnetické emise	17
7.	Krátkodobá Fourierova transformace	19
8.	Vlnková transformace	21
8.1	Spojité vlnkové transformace	23
8.2	Diskrétní vlnkové transformace	24
8.3	Mateřské funkce	26
8.3.1	Haarova vlnka	26
8.3.2	Vlnka Mexican Hat	27
8.3.3	Morletova vlnka	28
8.3.4	Meyerova vlnka	29
8.3.5	Vlnka Daubechies	30
8.4	Výběr vlnky	50
9	Analýza	50
9.1	Program	50
9.2	Signál	50
9.3	Diskrétní Fourierova transformace	50
9.4	Krátkodobá Fourierova transformace	50
9.5	Spojité vlnkové transformace	40
9.6	Diskrétní vlnkové transformace	43
9.7	Spektrální hustota výkonu	49
10	Závěr	50
	Seznam obrázků	51
	Použitá literatura	51

1 Úvod

Diplomová práce se týká analýzy signálu akustické a elektromagnetické emise. Tyto signály nám poskytují informace o vzniku trhlin v pevných materiálech. Emisní signály jsou využívány v průmyslu, jako zdroj informací o vlastnostech zkoumaných materiálů. Tyto signály lze měřit bez destruktivního působení na daný materiál. Metoda analýzy se tak řadí mezi nedestruktivní metody měření.

Pro popis signálů bylo využito spektrálních analýz, které popisují chování signálu jak v čase, tak ve frekvenci. Tato metoda nám poskytne informace od vzniku signálu po jeho skončení. To je způsobeno vznikem trhliny a ustálením její tvorby, která je zapříčiněna plastickou deformací materiálu. Jednou z hlavních metod analýzy byla použita vlnková transformace. Její využití bylo k zobrazení průběhu signálu v čase a frekvenci. Metoda byla použita i pro filtrování změřeného signálu.

2 Teorie akustické a elektromagnetické emise

Emisní události označujeme jednorázový proces, při němž se v jeho důsledku uvolní jisté množství energie.

Elektromagnetická a akustická emise je jev, který nastává při tlakovém namáhání pevného tělesa. K získání signálů elektromagnetické a akustické emise není potřeba destruktivního působení na látku. Signály vznikají již při zatěžování zkoumané látky. Metoda se tak řadí mezi nedestruktivní metody měření spadající pod obor defektoskopie. Během tohoto procesu vznikají, uvnitř v materiálu pevného tělesa, mikroskopické trhliny v délkách řádově desetin milimetru (0,3 – 1,5 mm).[8]

Namáháním tělesa a působením síly na krystalickou mřížku tělesa, vzrůstá v mřížce mechanické napětí. Chybí-li v mřížce jeden nebo více atomů (tzv. vakantní atomy), je porušena rovnováha vazebních sil. Při překročení meze pevnosti v kluzu přeskočí atom sousedící s vakancí na její místo a dojde k uvolnění energie. [1], [8]

Využití této metody je vhodné při studiu deformačních procesů, mechanismů lomů, studiu trhlín, při zatěžovacích zkouškách ocelových konstrukcí a stavebních hmot. Nejčastější výzkum a uplatnění tak najdeme nejvíce ve stavebnictví a geofyzice.

2.1 Elektromagnetická emise

Elektromagnetická emise je charakterizována elektromagnetickými signály vysílanými při zatěžování tělesa. Ke generaci elektromagnetického pole dochází při mechanickém vybuzení látky. Jev je vyvolaný jakýmkoliv mechanickým namáháním jako je tlak, tah, ohyb či úder.

Samotný způsob vzniku jevu elektromagnetické emise v nevodivých pevných látkách není zcela vysvětlen, byť existuje mnoho teorií. Nejčastější

teorií je skutečnost, kdy dochází k nerovnoměrnému rozložení elektrického náboje v materiálu při vytvoření trhliny vinou ztráty chemických vazeb.

Elektromagnetické a elektrické pole se vytváří vibracemi stěn trhliny. Stěny jsou nabitý opačnými náboji, řádově 10^{-6} C.m^{-2} [9].

2.2 Akustická emise

Akustická emise se vztahuje ke generaci elastické vlny vzniklé náhlým přerozdělením napětí v materiálu.

Pokud je vzorek podroben vnějším podnětům (změna tlaku, zatížení nebo teploty), můžeme zaznamenat uvolnění energie ve formě napěťových vln, které se dostávají napovrch materiálu a mohou být zaznamenávány senzory. V látce dochází k rozbití krystalické mřížky a k uvolnění chemických vazeb což přispívá k akustické emisi. Ta může být, krom jiných materiálů, měřena a zaznamenávána také v polymerech, dřevě a betonu [5].

Detekce a analýza signálů akustické emise může poskytnout cenné informace o původu a významu trhlin v materiálu. Univerzálnost testování akustických emisí má velké průmyslové uplatnění (hodnocení integrity složení materiálu, odhalování trhlin či monitorování kvality sváru) a je též využívána jako výzkumný nástroj [5].

Akustická emise se řadí mezi nedestruktivní metody měření a má četné výhody. První výhodou se týká dodávání (napájení) energie do vzorku během měření, namísto toho akustická emise pouze zaznamenává uvolněnou energii z materiálů a vzorek tak nemusí být externě napájen. Měření akustické emise je často prováděno na materiálu v provozu což zajišťuje adekvátní zatížení vzorku k určování vzniku trhlin vně látky. Druhou výhodou je, že akustická emise se zabývá dynamickými procesy nebo změnami v materiálu. To je užitečné, neboť pouze aktivní rysy, jako např. vzrůstající počet trhlin, jsou zvýrazněny. Schopnost rozlišit mezi vznikajícími a ustálenými poruchami (trhlinami) je značná. Avšak je možné, že poruchy nejsou zjištěitelné. Při nedostatečném

zatížení látky nemusí dojít k akustickému jevu. Další výhody měření akustické emise jsou spjaty s rychlým a plně objemovým zkoumáním (lokalizace trhlin) za použití více snímačů [5].

Nevýhodou je dosud neobjasněnost způsobu vzniku emisních balíků a tedy nemožnost jednoznačné interpretace měření, další nevýhodou je příliš malá energie mnohých akustických pulsů, čímž tyto pulsy zanikají v šumovém pozadí snímače.

3 Vznik trhliny

V literatuře zabývající se akustickou a elektromagnetickou emisí jsem během shromažďování informací nenalezl samotný princip vzniku trhliny, co se děje v materiálu při jeho namáhání, a proč u některých vznikají trhliny hůře a u jiných snázeji. Odpověď na tyto otázky je třeba hledat v samotné mikrostruktúře materiálů.

Vznik trhlín je podmíněn okolními vlivy působící na daný materiál.

Faktory podílející se na vzniku trhliny jsou :

- Typ působícího zatížení
- Časový průběh zatížení
- Doba zatížení
- Vlastnost materiálu
- Teplota při níž zatížení probíhá

Z uvedených podmínek lze usoudit, že k tvorbě trhlín bude u každého materiálu docházet za jiných okolností a různé vzorky budou odlišně reagovat na stejně působící faktory. K nalezení otázky proč jsou některé materiály odolnější na tvorbu trhlín než jiné, je třeba seznámit se s vlastnostmi materiálu již na atomární struktúře. Tento pohled umožní lépe pochopit důvod vzniku trhlín a reagování samotných atomů na vnější vlivy.

3.1 Vazby mezi atomy

K pochopení mnoha fyzikálních vlastností materiálů je nutné rozumět meziatomovým silám držícím atomy látky pohromadě. Princip meziatomové vazby je názorný na dvou izolovaných atomech, které jsou k sobě přibližovány. Velmi vzdálené atomy se vzájemně neovlivňují. Když se přibližují, začínají na sebe působit přitažlivými a odpuzivými silami, přičemž velikost každé síly je závislá na vzdálenosti atomů.

Jakmile se atomy k sobě přiblíží na vzdálenost, při níž dojde k překrytí vnějších (valenčních) elektronových drah, začne mezi atomy působit značná odpudivá síla. Výsledná síla působící mezi atomy je algebraickým součtem přitažlivé síly a odpudivé síly.

V pevných látkách je možno nalézt tři typy meziatomových vazeb:

- iontovou,
- kovalentní,
- kovovou.

Charakter vazby závisí na elektronové struktuře zúčastněných atomů. Obecně platí, že typ vazby je dán snahou atomů o dosažení stabilní elektronové konfigurace vzácných plynů, tzn., že každý atom se snaží zaplnit valenční elektronové dráhy a doplnit valenční elektrony na oktet [10].

3.1.1 Iontová vazba

Je nejjednodušší na popis i pochopení. Působí ve sloučeninách kovů a nekovů. Atom kovového prvku ochotně uvolňuje svůj jediný valenční elektron, který mu přebývá nad valenční oktet, a vytváří kladně nabitý kation. Naopak nekovový prvek rád přijme nabízený elektron, protože mu chybí jen ten jeden do vytvoření valenčního oktetu – přijetím elektronu se z elektroneutrálního prvku stane záporně nabitý anion. Oba prvky zúčastněné na vazbě získají stabilní elektronovou konfiguraci vzácného plynu. Vazebné síly mají coulombovský charakter daný tím, že opačně elektricky nabitě částice se přitahují [10].

Z povahy iontové vazby vyplývají její základní vlastnosti:

- vazba je nesměrová, její síla je stejná ve všech směrech kolem iontu,
- vazebné energie jsou relativně velké (pohybují se od 600 do 1500 kJ.mol⁻¹), což se odráží např. ve vysoké teplotě tání iontových sloučenin,
- materiály s iontovou vazbou jsou tvrdé a křehké,
- jsou dobrými elektrickými a tepelnými izolanty.

3.1.2 Kovalentní vazba

Stabilní elektronová konfigurace je dosažena společným sdílením valenčních elektronů zúčastněných atomů. Jinak řečeno – příslušné atomy přispívají k vazbě alespoň jedním ze svých valenčních elektronů a společně sdílené elektrony jsou považovány za příslušné oběma atomům. Počet kovalentních vazeb, které je daný prvek schopen navázat, závisí na počtu valenčních elektronů. Kovalentní vazba se vyskytuje v mnoha nekovových jednoduchých molekulách.

Kovalentní vazba :

- je směrová, neboť existuje vždy ve směru mezi atomy zúčastněnými na sdílení elektronů,
- může být velmi pevná a proto poskytuje materiálu velkou tvrdost a vysokou teplotu tání (např. diamant má teplotu tání vyšší než 3550°C),
- nebo může být naopak velmi slabá a dává nízkou teplotu tání (např. vismut s teplotou tání pouhých 270°C),
- je typická pro polymery tvořené dlouhými řetězci C – atomů.

Ve skutečnosti je velmi obtížné najít čistě iontovou nebo kovalentní vazbu. Ve sloučeninách je zastoupení vazby dáno relativní polohou zúčastněných prvků v periodické tabulce – čím jsou od sebe vzdálenější, tím má vazba iontovější charakter. Naopak čím jsou prvky blíže u sebe, tím je vyšší podíl vazby kovalentní [10].

3.1.3 Kovová vazba

Nachází se v kovech a jejich slitinách. Kovové materiály mají maximálně tři valenční elektrony. V modelu kovové vazby nejsou tyto elektrony vázány k některému atomu, ale jsou více méně volné a pohybují se celým objemem materiálu. Mohou být tedy považovány za příslušné celému objemu kovu, ve kterém tvoří elektronový mrak. Zbytek nevalenčních elektronů a jader atomů

tvoří kladně nabité ionty, jejichž náboj odpovídá počtu valenčních elektronů v elektronovém mraku.

Kovová vazba:

- je nesměrová, protože volné valenční elektrony ruší odpuzující síly, které by působily mezi kladně nabitými zbytky atomů (kationy),
- elektronový mrak působí jako „lepidlo“ spojující kationy dohromady,
- vazba je různě pevná – od slabé (68 kJ.mol^{-1} pro Hg) až po silnou (850 kJ.mol^{-1} pro W),
- tomu odpovídají i teploty tání (-39°C pro Hg a 3410°C pro W),
- v důsledku volného pohybu valenčních elektronů jsou materiály s kovovou vazbou dobrými vodiči tepla a elektřiny.

Z popisu jednotlivých meziatomových vazeb vyplývá, že materiály, jejichž atomy v molekulách jsou mezi sebou vázány iontovou vazbou, se vyznačují tvrdostí ale zároveň křehkostí. U ostatních vazeb mohou být tyto síly různě pevné. Popisem atomových vazeb následuje určení jejich uspořádání v molekulách, tímto se zabývá krystalografie [10].

3.2 Základy krystalografie

Rozeznáváme dva typy tuhých látek – jedny jsou krystalické a druhé amorfní. Krystalické látky mají atomy nějakým způsobem uspořádány v celém svém objemu (např. kovy, keramika, minerály), v látkách amorfních atomy uspořádány nejsou (typickým představitelem amorfní látky je vosk). Uspořádanost atomů je určující pro další vlastnosti materiálů.

Pro popis krystalové struktury je výhodné rozdělit materiál na malé opakující se jednotky (buňky), jejichž posouváním o jednotkovou vzdálenost podél krystalografických os je možno vytvořit celý krystal. Buňka je tedy základní jednotkou definující danou krystalovou strukturu svou geometrií a

postavením atomů. Podle zvyklostí jsou vrcholy rovnoběžnostěnu buňky místy, do nichž jsou umísťovány hmotné body představujících atomy, resp. středy tuhých koulí atomů [10].

3.2.1 Krystalické mřížky

Všechny krystalové mřížky, je možno dělit do skupin podle různých hledisek, např. podle geometrického tvaru buňky. Atomy mohou být v krystalové mřížce uloženy pouze v uzlových polohách (vrcholech mřížky) – taková mřížka se nazývá prostá. Navíc se však mohou vyskytovat i v jiných místech (uprostřed stěn mřížky nebo v jejím tělesovém středu. Kovové materiály nejčastěji krystalizují v soustavě krychlové prostorově středěné, krychlové plošně středěné nebo hexagonální těsně uspořádané.

Ideální krystalová mřížka se vyznačuje pravidelným uspořádáním stejných elementárních buněk, v nichž se opakuje vždy stejné rozložení částic. Tato dokonalá periodičnost však není splněna u reálných krystalů. Každý reálný krystal má ve své struktuře poruchy. Můžeme rozlišovat poruchy bodové, čárové, plošné a objemové [8], [10].

3.2.2 Bodové poruchy

Vakance je porucha vyvolaná chybějícími částicemi v mřížce. Je to neobsazený uzlový bod v krystalové mřížce. Vzniká při krystalizaci nebo jako důsledek vibrace atomů. Množství vakancí roste exponenciálně s rostoucí teplotou. Při dostatečně vysoké teplotě se vakance mohou krystalem přesouvat; tento pohyb je spojen s protisměrným pohybem atomů a nazývá se migrace vakancí.

Intersticiální atom je atom základního prvku, který se z uzlového bodu dostal do prostoru mezi uzlovými body, tj. do intersticiální polohy. Způsobuje relativně velkou deformaci okolní mřížky. Pravděpodobnost tohoto defektu je proto malá a porucha existuje v koncentracích menších než vakance.

Atom příměsi, jehož poloměr je ve srovnání se základním atomem menší. Potom je deformace okolní mřížky samozřejmě menší.

Substituční atom je atom příměsového prvku, který se usadí v neobsazené uzlové poloze v krystalové mřížce [8].

3.2.3 Čárové poruchy – dislokace

Čárová porucha (neboli dislokace) se netýká jednoho bodu mřížky (resp. jedné částice), ale celé roviny částic. Dislokaci si lze představit následujícím způsobem: krystal rozřízneme, oddálíme obě části od sebe a mezi ně vložíme jednu atomovou polorovinu (polorovinu složenou z atomů). V okolí této vložené poloroviny bude krystalická mřížka silně deformovaná. Existují dva typy dislokací:

- Hranová dislokace - mezi atomové roviny byla vložena další atomová polorovina. Koncová řada jejích atomů tvoří tzv. dislokační čáru, rovina kolmá na rovinu dislokace obsahující dislokační čáru se nazývá rovina dislokace – nad ní jsou atomy smáčknuty (vrstva atomů je navíc), pod ní jsou od sebe oddáleny.
- Šroubová dislokace - představíme si, že krystal nařízíme a podél dislokační čáry. Ze soustavy rovin se vytvoří spojitý dislokační stupeň procházející krystalem od jednoho jeho povrchu ke druhému a proto nemůže být stanovena rovina dislokace.

Jednou z nejdůležitějších vlastností dislokací je jejich schopnost pohybu materiálem při působení napětí. Mohou se pohybovat skluzem nebo šplháním. Přítomnost, počet, pohyblivost a další vlastnosti dislokací umožňují vysvětlit podstatu plastické deformace [8].

3.2.4 Plošné poruchy

Hranice podzrn - existují mezi oblastmi s málo rozdílnou orientací krystalové mřížky. Jsou tvořeny seskupením hranových dislokací mezi oběma podzrny. Nazývají se také dislokační hranice nebo hranice s malým úhlem.

Hranice zrn - předpokládá větší rozdíly v orientaci sousedních mřížek. Dislokace se k sobě přiblíží a začnou se překrývat; hranice je neuspořádaná, nazývá se hranice s velkým úhlem. Má velkou koncentraci bodových a čárových poruch; je nejčastějším typem hranice v polykrystalu. Hranice zrn mají velký vliv na chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Dislokace se na hranicích zrn zastavují a dál nepokračují [8].

Z různého uspořádání krystalů se tak odvozuje možnost vzniku poruch, poruchy bodové, plošné nebo čárové. Při působení vnějšího napětí na materiál tak vzniká některá z těchto poruch.

Dislokační interakce vedou ke vzniku vakancí, to se během zatežování projeví v jejich zvýšené koncentraci v celém zatěžovaném objemu. Vzniklé vakance mohou vytvářet shluky a dutiny, které lze o dostatečné velikosti již považovat za trhlinu.

Při malém a krátkém namáhání, které charakterizuje elastickou deformaci, nevyvolá namáhání na krystalické mřížky takový efekt, aby došlo k poruchám krystalické mřížky a následným vznikům trhlin.

3.3 Plastická deformace monokrystalů

U všech krystalických materiálů má elastická deformace jistou hranici – tzv. mez elasticity. Po jejím překročení dochází v materiálu k trvalým změnám – tahové napětí způsobuje štěpení meziatomových vazeb při rozvoji plastické deformace a nakonec vznik trhlin, smykové napětí vede až ke smykovému lomu. Ukázalo se, že po překročení meze elasticity dochází vlivem smykového napětí k pohybu (skluzu) krystalografických rovin podél skluzové roviny. Jsou přitom postupně porušovány původní a navazovány nové meziatomové vazby. Dislokace tak postupuje danou skluzovou rovinou až na volný povrch materiálu. Je přitom trvale přesunuta jedna atomová rovina a na volném povrchu vznikne schodek o velikosti jedné meziatomové vzdálenosti.

Makroskopická plastická deformace vzniká mnohonásobným opakováním popsaného procesu [8].

3.4 Plastická deformace polykrystalu

Reálné konstrukční materiály jsou polykrystalické, složené z velkého počtu zrn, která mají všechna stejnou, ale vzájemně různě orientovanou, krystalovou mřížku. V místech styku zrn (na jejich hranici) je pravidelnost krystalové mřížky porušena, ale vazby mezi atomy přetrvávají, takže hranice jsou dostatečně pevné. Při zatížení vznikne první plastická deformace v tom zrně, jehož skluzová rovina je nejvhodněji orientovaná vůči působícímu tahovému napětí. To znamená, že k plastické deformaci nedojde naráz v celém objemu materiálu, ale že bude probíhat postupně [8].

Tvorbu trhlin bych shrnul vyjádřením, že k poruchám vytvořených v materiálu musí na daný materiál působit takové napětí, po tak dlouhou dobu, při které se namáhání mění v plastickou deformaci. Toto vnější působení na materiál je již tak velké, že dochází k šíření dislokací v krystalických mřížkách. S rostoucím počtem dislokací, tak postupně začínají vznikat trhliny. Ty mají za následek vznik emisních signálů, které mohou být měřeny a dále vyhodnocovány. Jejich snímáním lze určit, že v materiálu již dochází k nevratným poškozením.

4 Generace signálů akustické a elektromagnetické emise

Vznikem trhliny dochází k nerovnoměrnému rozmístění elektrického náboje. Stěny se během tohoto procesu nabíjí opačnými náboji a na stěnách trhliny se tak vytváří elektrický dipól.

Akustická emise je charakterizována vznikem okamžitých mechanických vln v ultrazvukovém pásmu. Vznik AE souvisí s šířením akustických vln. Ty jsou vyvolány náhlým uvolněním energie elastické napjatosti v materiálu. Při disktrétním skokovém zvětšení rozměru trhliny je emitována napěťová vlna a signál AE je tak měřitelná pomocí snímačů. Napěťové vlny se emitují např. v pevných látkách při fázových transformacích, při pohybu dislokací, při kavitaci v kapalinách či v průběhu korozních procesů.

Vznik signálů elektromagnetické emise je podmíněn pohybem nabitých stěn trhliny. Vibracemi stěn trhliny počas deformace materiálu se vytváří časově proměnný dipól, tím je generováno elektrické a magnetické pole. Pokud jsou náboje v klidu, tedy soustava kladně a záporně nabitých částic v malé vzdalenosti od sebe nejeví pohyb, tehdy je statické elektromagnetické pole v rovnovážném stavu a není měřitelné. Měřitelná je elektromagnetická emise pokud dochází k přerozdělení elektrického náboje a tím k jeho pohybu.

5 Metody snímání elektromagnetické a akustické emise

Zaznamenání jevu elektromagnetické a akustické emise je dáno charakterem, kterým se emise projevuje. U elektromagnetické emise je touto vlastností elektromagnetické pole dané magnetickou indukcí $\vec{B}$ a intenzitou elektrického pole $\vec{E}$. Pro akustickou emisi je tímto projevem mechanická elastická vlna [8]. Elektromagnetickou emisi je tak možné měřit a zaznamenávat ze dvou hodnot elektromagnetického pole, z magnetické indukce nebo z intenzity elektrického pole. Na pracovišti Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně je snímání jevu emise pro elektromagnetickou emisi sestaveno z kapacitního snímače. Ten byl vybrán jako vhodný snímač pro měření emise.

Akustická emise se snímá piezoelektrickými snímači, které jsou založeny na piezoelektrickém jevu, výsledkem je piezoelektrické napětí.

5.1 Snímání elektromagnetické emise

Z důvodu vyšší citlivosti detekce vzniku trhlin byl vybrán kapacitní snímač pro měření elektromagnetické emise. Snímač je tvořen deskami kondenzátoru, které zaznamenávají velikost intenzity elektrického pole $\vec{E}$. Během procesu tvorby trhlin vzniká elektrický náboj obou polarit $-q$ a $+q$ na stěnách trhlin.

Pohybem elektrického náboje q rychlostí $\vec{v}$ v elektrickém poli se vytváří proud $i(t)$. Tento proud pak na zatěžovacím rezistoru R vytváří elektrické napětí $u(t)$. Napětí, která se časem mění, tak svou velikostí popisuje charakter trhliny a pohyb nábojů v trhlíně. Pro intenzitu elektrického pole $\vec{E}$ platí

$$\vec{E} = \frac{u(t)}{d}, \quad (5.0)$$

d značí vzdálenost mezi deskami kondenzátoru [1], [8].

5.2 Snímání akustické emise

Jevem akustická emise se vytváří děj, při němž uvnitř materiálu spontánně vznikají napětové vlny zvukové až ultrazvukové frekvence v důsledku náhlého lokálního uvolnění energie. Pomocí snímání signálů AE je možné z četnosti registrovaných signálů určit stupeň poškození materiálu zatěžované konstrukce či součásti.

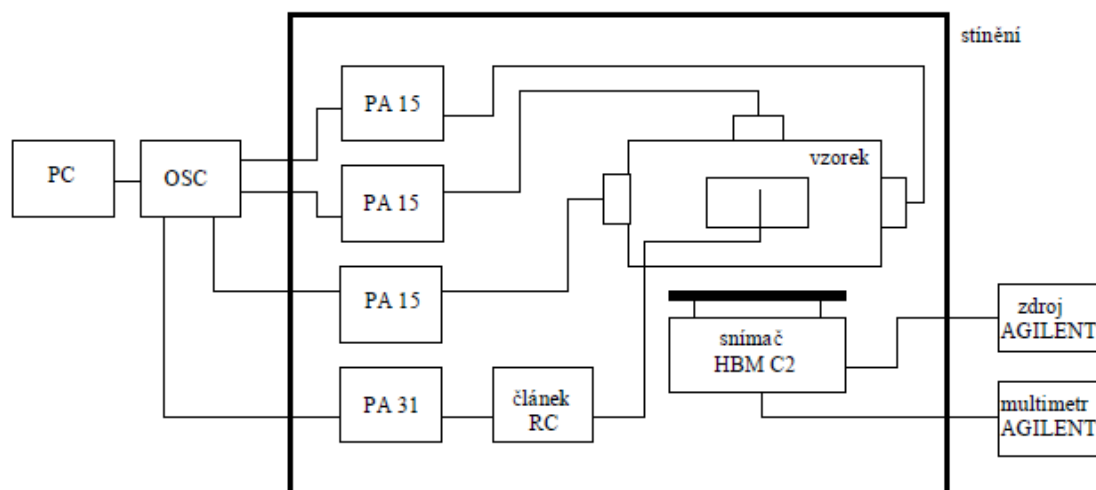
Mechanicky namáháním generované napětové vlny se zaznamenávají za pomoci piezoelektrických snímačů. Ty jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalů indukovat napětí v odezvě na aplikované mechanické namáhání. Při stlačení krystalu se na něm objeví povrchový elektrický náboj. Piezoelektrický jev má i opačný děj, u něhož vnější elektrické pole vyvolává deformaci krystalu. Pokud krystal vložíme do elektrického pole (přivedeme na jeho protější stěny opačné náboje), krystal se ve směru jedné své osy zkracuje, resp. prodlužuje podle toho, jaký byl směr a smysl elektrického pole. Přivádíme-li ke stěnám krystalu střídavé napětí, mění se smysl elektrického pole periodicky v taktu frekvence. Krystal se začne periodicky zkracovat a prodlužovat ve směru osy, přičemž se deformace dějí rovněž v taktu frekvence střídavého napětí – krystal se rozkmitá. Při zapojení krystalu na střídavé napětí lze tímto způsobem získat i zdroj zvuku nebo ultrazvuku.

Měřený vzorek je obvykle snímán více piezoelektrickými snímači. Vhodným rozmístěním snímačů lze lokalizovat místo původu emisních událostí.

Při samotném měření je kladen důraz na parametry snímače. Záleží především na vlastnostech měřeného vzorku, na místě umístění snímače a na vlastnostech okolního prostředí. Tyto požadavky vylučují použití nějakého univerzálního snímače, naopak vytváří potřebu nalezení vhodného snímače pro konkrétní aplikaci [14].

6 Měření signálů akustické a elektromagnetické emise

Pracoviště měření elektromagnetické a akustické emise se skládá z vyhodnocovací techniky reprezentované osciloskopem a počítačem, dále jsou to zesilovače speciálně určené k zesílení elektromagnetické nebo akustické emise a silová část soustavy složená z lisu a siloměru. Vzorek společně s prvními zesilovači je umístěn ve stíněné konstrukci z důvodu odstranění elektromagnetického rušení.



Obr. 6.1: Blokové schéma měřicího pracoviště.

Jevy elektromagnetické a akustické emise jsou vytvářeny a měřeny za pomoci následujících přístrojů : [12], [13].

1. Ruční hydraulický lis AUTOTECH
2. Snímač pro měření sil HBM C2
3. RC článěk
4. Nízkošumový zesilovač 3S SEDLAK PA15

5. Nízkošumový zesilovač 3S SEDLAK PA31
6. Zesilovač EG & G Princeton 5113
7. Osciloskop TIEPIE Handyscope HS4
8. Napájecí zdroj Agilent E3631A
9. Digitální multimetr Agilent 34410A

Změřené signály jsou uloženy na obslužném počítači, který řídí proces měření. Naměřená data jsou poté programem na zpracování signálu uložena do souborů k pozdějšímu vyhodnocování.

7 Krátkodobá Fourierova transformace

Pokud se zabýváme analýzou nestacionárních signálů (signálů, jejichž parametry se mění s časem — například s proměnnou frekvencí), s klasickou Fourierovou transformací si již nevystačíme. Potřebujeme u spektra sledovat nejen jeho okamžitý tvar, ale i umístění v čase. Jedním z nástrojů časově-frekvenční analýzy je i krátkodobá Fourierova transformace, jejímž výsledkem je krátkodobé spektrum (*Short-Time Fourier Transformation* - STFT spektrum). STFT je založena na diskrétní Fourierově transformaci - DFT analýze krátkých časových úseků signálu po sobě, což se provádí pomocí posouváním tzv. okénkové (váhové) funkce. Tímto se získá informace o tom, jaké frekvenční složky se v signálu v daném časovém intervalu nachází. Sestavením všech výsledků vznikne požadovaný časově frekvenční náhled na signál. Platí pro ni, že časové i frekvenční rozlišení je konstantní pro celou analýzu a souvisí s předem zvolenou délkou okna počtem bodů DFT a vzorkovací frekvencí. STFT se dá popsat následujícím vzorcem :

$$X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (7.0)$$

kde w je tzv. funkce okna, sloužící k ořezu signálu, a τ je parametr časového posunu, který lokalizuje daný časový úsek [11]. STFT nám tedy ve výsledku vytvoří dvourozměrnou informaci ve formátu pozice okna - příslušný soubor frekvenčních složek, a to je právě klíčem k analýze nestacionárních signálů. Jediné, co musíme udělat, je nastavit správný časový interval vyjádřený τ (měl by obsáhnout alespoň jednu periodu komponenty s nejnižší frekvencí) a nadefinovat funkci okna w tak, aby ořezala signál jen na aktuálně zpracovávaný časový okamžik. Stejně jako u Fourierovy transformace (výkonové spektrum), spočítáme spektrogram jako :

$$S_x(\omega, \tau) = |X(\omega, \tau)|^2 \quad (7.1)$$

Nevýhodou STFT je, že při použití úzkého okénka má STFT dobré rozlišovací schopnosti v časové oblasti, ve frekvenční oblasti podstatně horší. Při použití širokého okénka má STFT dobré rozlišovací schopnosti ve frekvenční oblasti, v časové oblasti špatné.

Vliv zvolené délky okna ovlivňuje časově-frekvenční rozlišení. Prodloužení okénka má za následek zlepšení kmitočtového rozlišení (Δf) a zhoršení časového rozlišení (Δt). Zkrácení okénka má opačné důsledky.

Pro časově-frekvenční prostor existuje mez dosažitelného rozlišení, která souvisí s Heisenbergovým principem neurčitosti [13].

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} \geq \frac{1}{4\pi} \quad (7.2)$$

Toto nás vede k zamyšlení, zdali je možné získat přesný popis signálu, tzn. perfektní rozlišení v časové a frekvenční oblasti. Odpověď na tuto otázku dává Heisenbergův princip neurčitosti.

Heisenbergův princip neurčitosti

„Podle principu neurčitosti dvojice konjugovaných proměnných (jako je poloha a hybnost nebo energie a čas) nelze měřit se stejnou přesností ve stejný okamžik, neboť nemají v daný okamžik stejně definované hodnoty.“

První nevýhoda STFT pro spoustu praktických použití tkví ve vysoké nadbytečnosti algoritmu a zbytečně obsáhlému popisu transformovaného signálu. Tuto redundanci můžeme snížit vzorkováním spektra STFT. Další a to zásadní nevýhodou zůstává to, že ať zvolíme jakékoliv okno, je pro celý signál neměnné a časově-frekvenční rozlišení je tedy konstantní pro celý analyzovaný signál. Proto se začal hledat jiný systém analýzy a to analýzy s více úrovněmi rozlišitelnosti.

8 Vlnková transformace

Vlnková transformace patří do třídy MRA (Multi Resolution Analysis) nástrojů pro zpracování zejména nestacionárních signálů. Tyto metody používají různé rozlišení pro různé frekvence. Tedy obvykle tak, že u nižší frekvence je dobře určena frekvence a u vyšších frekvencí je dobře určena lokalizace v čase.

Tímto přístupem odstraňuje některé nedostatky diskrétní Fourierovy transformace. Řešením poskytuje použití okna, které v čase ohraničí krátký úsek signálu a umožní z něj určovat spektrum v daném časovém intervalu takový postup se nazývá *Short-Time Fourier Transform*. Z období Heisenbergova principu neurčitosti vyplývá, že nelze současně určit přesně frekvenci a polohu jejího výskytu v čase. Proto má uvedené řešení pro časově konstantně široké okno pro všechny kmitočty velkou rozlišitelnost ve frekvenci a malou v čase a naopak pro časově úzké okno velkou rozlišitelnost v čase a malou ve frekvenci. Ideou vlnkové transformace je vhodnou změnou šířky "okna" v čase a jeho tvarem dosáhnout optimálního poměru rozlišitelnosti v čase a frekvenci. Pro nízké frekvence je "okno" širší, pro vysoké užší

Bázovými funkcemi této transformace jsou wavelety - vlnky, zásadní rozdíl proti DFT je v tom, že wavelety jsou časově omezené – tedy působí jen na omezenou část signálu. Vlnková transformace není jedinou transformací, jedná se o jistý typ transformací se společnými rysy, vzájemně se lišících podle tvaru zvolené báze funkce – waveletu (vlnky). Každá báze funkce je podporována pouze na konečném časovém intervalu, anebo přinejmenším její hodnoty mimo tento interval jsou zanedbatelně malé. Následkem toho, kterákoliv hodnota spektra, založená na využití této vlnky, je ovlivněna pouze odpovídajícím úsekem analyzovaného signálu.[3]

Základem je tzv. mateřská vlnka ψ (*mother wavelet*), která udává tvar všech odvozených vlnek odpovídajících příslušným parametrům.

Tato funkce musí splňovat několik podmínek :

- je nenulová pouze na ohraničeném intervalu v čase (má kompaktní nosič) – její limity v nekonečnu se rovnají nule (nebo jsou tyto hodnoty zanedbatelně malé)
- její energie na celé reálné ose je konečná :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (8.0)$$

- má nulovou střední hodnotu:

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (8.1)$$

- osciluje (mění znaménko)

Pomocí parametru s , který se jmenuje měřítko, je možné měnit její šířku (dilatace), parametrem τ zvaným poloha, se mění umístění vlnky na časové ose (translace).

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad s, \tau \in \mathbb{R}, s \neq 0 \quad (8.2)$$

Parametr s označovaný jako měřítko (scale) ovládá časovou šířku (dilataci) funkce. Pro $s > 1$ je vlnka natažena s -krát. Člen $1/\sqrt{s}$ zajišťuje zachování energie vlnky při změnách měřítka.

Parametr τ , zvaný poloha, mění umístění vlnky na časové ose (translace). Změna tohoto parametru umožňuje pokrýt postupně vlnkami určitého konečného trvání celý časový rozsah signálu [3],[13].

8.1 Spojitá vlnková transformace

Spojitá waveletová transformace (*Continuous Wavelet Transform* - CWT)

je definována:

$$S_{CWT}(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \quad (8.3)$$

Výsledek pro jednorozměrný signál představuje dvourozměrná funkce, nazývaná vlnkové koeficienty. Hodnoty spektra jsou dány korelačním

integrálem mezi analyzovaným signálem $s(t)$ a bázovou funkcí $\frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$, jíž

je konkrétní vlnka. Grafické vyjádření vlnkových koeficientů v rovině (τ, s) se často nazývá scalogram nebo vlnková mapa. Doporučeným způsobem je nalezení měřítka, při kterém nastává maximum vlnkových koeficientů při transformaci sinusovky referenční frekvence. U některých vlnek je souvislost přímá (Mexican hat, Morletova vlnka), u jiných (Daubechies) je vztah diskutabilní [3],[13].

Algoritmus CWT je následující:

1. Vybere se vhodný wavelet a nastaví se jako matecní.
2. Wavelet se porovná s analyzovaným signálem. Zvolená vlnka se umístí na počátek signálu a spočte se koeficient CWT. Čím je koeficient větší, tím je větší shoda waveletu (při daném posunutí a měřítku) se signálem.
3. Vlnka se posune vzhledem k signálu (časové posunutí) o předem určený krok doprava a opakuje se krok 2. Krok 3 se provádí pro všechna časová posunutí.
4. Tento postup se opakuje až do dosažení konce signálu.
5. Změníme měřítko vlnky (roztáhneme nebo smrštíme) a opakujeme kroky 2 až 4.
6. Krok 5 opakujeme pro všechna zvolená měřítka.

Koeficienty transformace se počítají obvykle pro všechny celočíselné hodnoty měřítka a polohy.

8.2 Diskrétní vlnková transformace

Spojitá vlnková transformace pracuje v teoretické rovině se všemi možnými měřítky a translacemi. To představuje teoreticky nekonečné množství výstupních dat – v praxi se proto využívají různé modifikace CWT s ohledem na měřítko a translace.

Diskrétní vlnková transformace (*Discrete Wavelet Transform* - DWT)

využívá měřítek a translací, které jsou mocninou dvojky (tzv. *dyadické*). Lze ji vyjádřit pomocí ortogonální matice W řádu $n \times n$. Je-li $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ vektor délky n , pak jeho waveletovou transformací je vektor $d = (d_1, \dots, d_n)^T$, získaný jako $d = Wy$.

Inverzní waveletová transformace je vyjádřena jako $y = W^{-1}d = W^T d$ díky ortogonalitě W . Z předchozího vyplývá vlastnost waveletové transformace – linearita. Vhodnou dvojkovou závislostí parametrů s a τ můžeme vytvořit z vhodné vlnky ψ ortonormální bázi:

$$s = 2^p \quad \tau = 2^p k \quad p, k \in \mathbb{Z} \quad (8.4)$$

$$\psi_{k,p}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^p}} \psi\left(\frac{t - 2^p k}{2^p}\right) \quad (8.5)$$

Parametr p odpovídá měřítku, k poloze. Díky ortonormalitě pak takto volená vlnka umožňuje neredundantní dekompozici signálu. Vlnková funkce ψ se chová jako pásmová propust filtrující vstupní signál kolem centrálního kmitočtu, který je závislý na měřítku mocninou dvou, v následujícím měřítku je filtrována horní polovina pásma předchozí dolnofrekvenční části signálu. S rostoucím kmitočtem roste šířka pásma tohoto filtru, činitel jakosti je tak konstantní pro celou množinu měřítkem odvozených filtrů. Pro zvolené minimální měřítko však zůstává nepokryto pásmo od nižších kmitočtů do nuly. Proto je od vlnky ψ odvozena měřítková funkce ϕ , která má charakter dolní propusti.

Funkce musí splňovat podmínku přípustnosti :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (8.6)$$

Vzhledem k tomuto uspořádání je logickou volbou uspořádat filtry jako soustavu pásmových propustí a poslední část spektra vyřešit dolní propustí [3],[13].

Vhodnější je však poněkud odlišná podoba – použití dolních a horních propustí, tak jako v případě poslední části spektra a sestavení těchto dvojic filtrů do podoby stromu, rozvíjejícího se na straně dolní propusti. Horní propusti realizují vlnky, dolní měřítkové funkce. Výstupy horních propustí jsou koeficienty detailů, dolní propustí koeficienty aproximací – tedy rozdílů ve vyšších frekvencích a hrubého popisu. Oba filtry, dolní propust h (scaling filter) a horní propust g (wavelet filter), tvoří pár kvadraturních zrcadlových filtrů (QMF), které mají komplementární propustná pásma. Výstupy obou filtrů jsou podvzorkovány na polovinu vstupních vzorků. Horní propust poskytuje koeficienty tzv. detailů DWT (cD), dolní propust koeficienty tzv. aproximace (cA). Díky decimaci je celkový počet koeficientů po jednom kroku stejný jako počet vstupních vzorků. Koeficienty aproximace lze dále analyzovat shodným rozkladem filtry a obdržet tak další soubor koeficientů aproximace a detailů. Tak lze postupovat až do vyčerpání vstupní sekvence. Jednotlivé konvoluce s decimací lze formalizovat následujícími vzorci:

$$cA_{p+1}(k) = \sum_{m=1}^N h(m-2k)cA_p(m) \quad (8.7)$$

$$cD_{p+1}(k) = \sum_{m=1}^N g(m-2k)cA_p(m) \quad (8.8)$$

kde cA_p , cD_p jsou koeficienty aproximace resp. detailů měřítka $p \in \langle 0, P \rangle$ a N je délka vstupní sekvence $cA_0 = f(n)$. Pár kvadraturních zrcadlových filtrů můžeme chápat jako ortonormální jádro transformace obdobné tzv. motýlku u FFT. Kde cA_p , cD_p jsou koeficienty.

Podle výchozí formulace vlnky jsou určeny filtry h a g . Nejčastěji je z měřítkové funkce ϕ odvozen měřítkový filtr w , který má charakter dolní propusti. Po normalizaci w podělením normou poskytne koeficienty dolnoproustního filtru h . K němu se vypočítá horní propust g jako komplement (kvadrurní zrcadlový filtr) [3],[13].

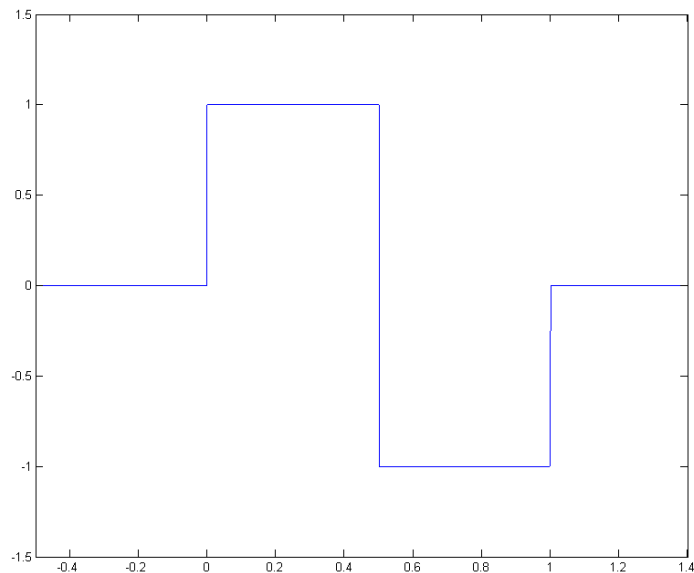
8.3 Mateřské funkce

Vlnková transformace využívá široké spektrum mateřských vlnek. Většina z nich má své pojmenování podle svého tvůrce či tvaru. Variabilita vlnek umožňuje vlnkové transformaci překlenutí se přes problémy STFT a následné použití vlnkové transformace pro analýzu nestacionárních signálů. Z vlastností je uvedena vhodnost pro CWT a DWT, typ nosiče a typ symetrie. V případě nekompaktního nosiče je numerický výpočet prováděn na efektivním nosiči.

8.3.1 Haarova vlnka

Jedná se o nejjednodušší možnou vlnku, realizovanou dvěma jednotkovými skoky – výsledkem jsou dva obdélníkové pulzy s amplitudou mezi 1 a přechodem od kladného k zápornému v 1/2. Navrhl ji maďarský matematik Alfred Haar již v roce 1909. Jakkoliv je dokonale lokalizována v časové oblasti, její spektrum není ukončené (hrany obdélníku). Další nevýhodu implikuje nespojitost, není derivovatelná. Je však ortogonální. Jak bude uvedeno o odstavec dále, jde o speciální případ vlnky Daubechiesové. Vzhledem k symetrii transformace mezi časovou a frekvenční oblastí má také „dvojníka“ – vlnku, dokonale lokalizovanou ve spektrální oblasti a neukončenou v oblasti časové.

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 & t < 0, t > 1 \end{cases} \quad (8.9)$$



Obr. 8.1: Haarova vlnka.

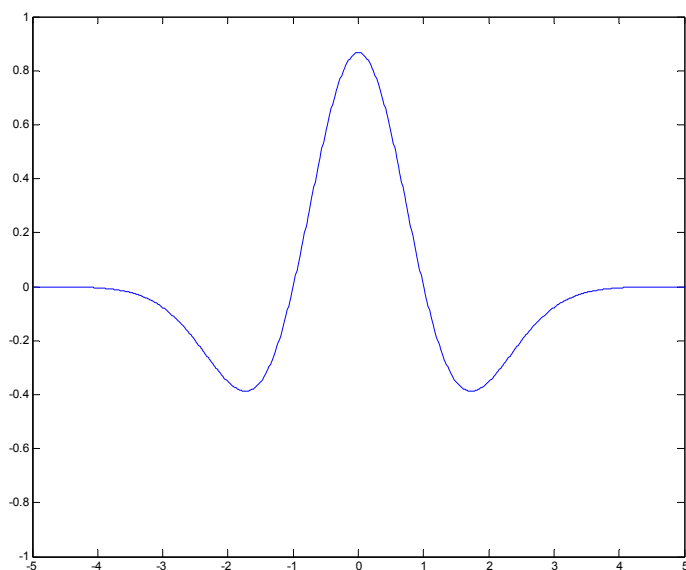
8.3.2 Vlnka Mexican Hat

Tato vlnka má tvar druhé derivace hustoty pravděpodobnosti Gaussova rozdělení. Nemá kompaktní nosič, je symetrická a není ortogonální – nevhodná pro DWT. Náleží do rodiny Gaussovských vlnek, odvozených od Gaussova rozdělení derivacemi různých řádů.

Její název pochází z podobnosti s mexickým kloboukem, položeným vzhůru nohama, je definována :

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{\frac{1}{4}} (1 - 2x^2) e^{-x^2} \quad (8.10)$$

Vlastnosti : symetrická, nemá kompaktní nosič, vhodná pro CWT, není ortogonální – nelze použít pro DWT.



Obr. 8.2: Vlnka Mexican Hat.

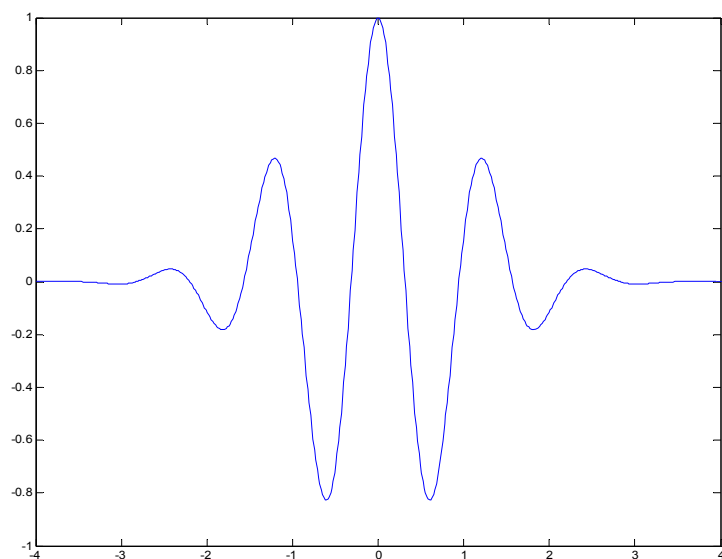
8.3.3 Morletova vlnka

Morletova vlnka je definována jako komplexní harmonická funkce modulovaná Gaussovským oknem.

Vlastnosti – symetrická, komplexní, není ortogonální – nelze ji použít pro DWT.

Její definice :

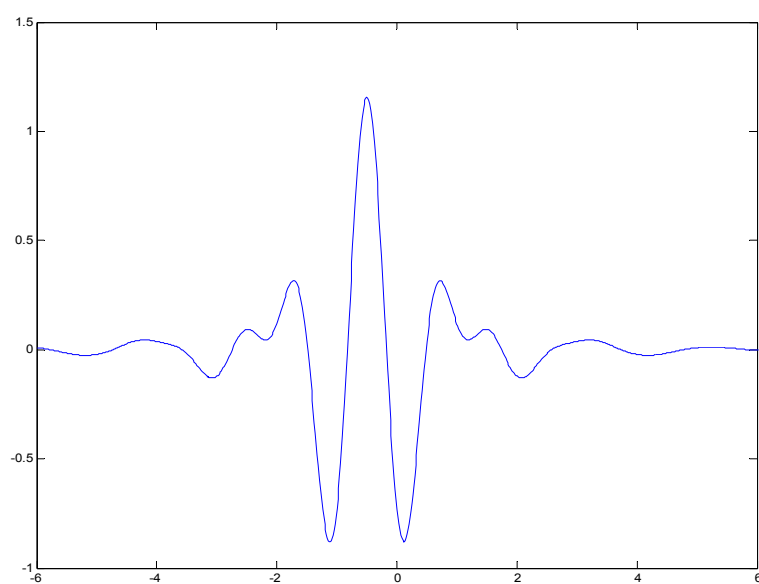
$$\psi(x) = a \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2} (\cos(5x) + j \sin(5x)) \quad (8.11)$$



Obr. 8.3: Morletova vlnka.

8.3.4 Meyerova vlnka

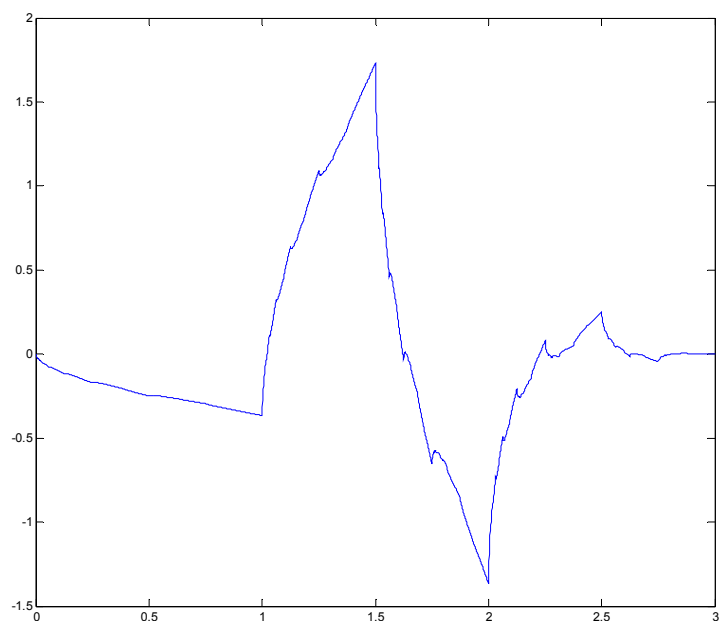
Tato vlnka nemá vyjádření v časové oblasti, je definována čistě ve frekvenční. Symetrická, nemá kompaktní nosič, ortogonální – vhodná pro CWT i DWT.



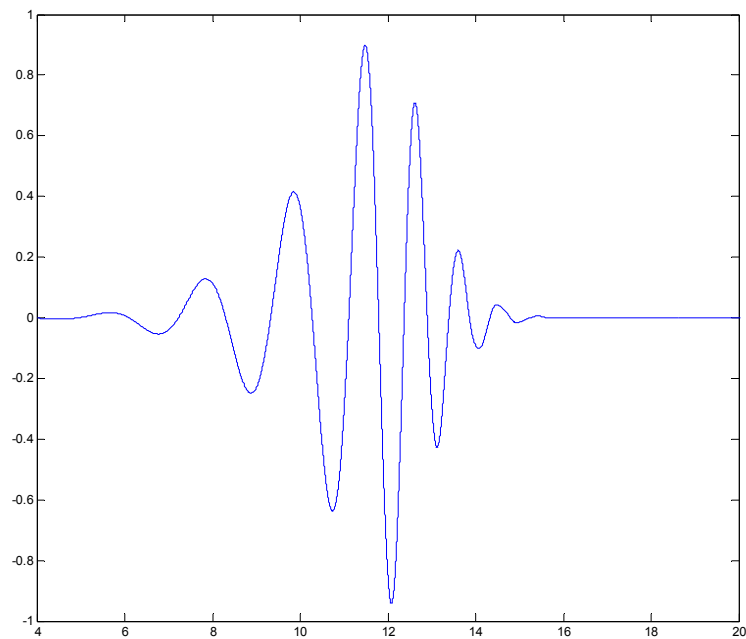
Obr. 8.4: Meyerova vlnka.

8.3.5 Vlnka Daubechies

Představuje skupinu waveletů různého řádu $N \geq 1$ ($N = 1$ Haarův wavelet). Nemají, kromě Haarova, explicitní vyjádření vlnkové funkce. Asymetrický (kromě Daubechies řádu 1), má kompaktní nosič délky $2N-1$, ortogonální, je vhodný pro CWT i DWT.



Obr. 8.5: Vlnka Daubechiesova 2. řádu.



Obr. 8.6: Vlnka Daubechiesova 12. řádu.

8.4 Výběr vlnky

Bylo nalezeno několik souvislostí mezi řešenou úlohou (charakterem analyzovaného signálu) a vhodnou vlnkou. Tato pravidla lze shrnout do následujících doporučení:

- Komplexní vlnky jako Morletova detekují dobře oscilace, nejsou vhodné pro detekci osamocených singularit.
- Čistě reálné vlnky s málo oscilacemi dobře detekují špičky a singularity v signálu.
- Antisymetrické vlnky jsou vhodné k detekci změn gradientu.
- Symetrické vlnky nezpůsobují fázový posun mezi špičkou, singularitou, oscilací v signálu a příslušným projevem ve vlnkových koeficientech.
- Pro současnou detekci amplitudy a fáze je nutné použít komplexní vlnku (např. Morletovu)

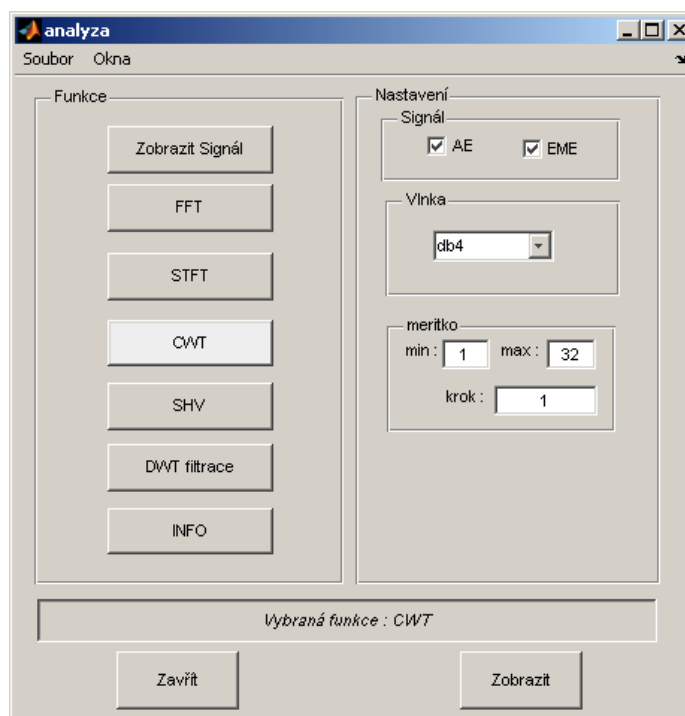
9 Analýza

K popisu signálu pomocí jeho složek ve spektrální oblasti se využívá spektrálních analýz. V oblasti analýzy signálů, jejichž charakter se v čase mění, se v současnosti začíná široce uplatňovat tzv. časově-frekvenční analýza, která je popisována spektrogramy. Spektrogramy jsou posloupností krátkodobých spekter umožňujících sledovat vývoj frekvenčního obsahu signálu v čase. Je to dvourozměrný obraz, skládající se ze dvou souřadnic, první odpovídá frekvenci, druhá času. Barevné vyobrazení charakterizuje amplitudy odpovídajících koeficientů spekter.

Při analýze signálů akustické a elektromagnetické emise jsem využil diskrétní Fourierové transformace. Ta ale není vhodná k popisu nestacionárních signálů, jak už je zřejmé z její definice, tak z vyobrazených grafů. K tomu lépe poslouží krátkodobá Fourierova transformace využívající krátkých časových úseků signálu po sobě. Ty se následně chovají jako kvazistacionární. Krátkodobá Fourierova transformace nám dává dobrou rozlišovací schopnost buď v časové oblasti, nebo ve frekvenční. Zároveň, jak v čase, tak ve frekvenci, dobrou rozlišovací schopnost vlivem konstantní délky váhovacího okénka nedostaneme. Tuto nevýhodu se pokouší kompenzovat metody víceúrovňové rozlišitelnosti, mezi tuto metodu se řadí metoda vlnkové transformace. Jak již bylo popsáno výše, vlnková transformace používá tzv. mateřských vlnek. Jejich změnou, v čase a měřítku, dostaneme lepší rozlišení v čase i ve frekvenci, zde v měřítku. Spojitou vlnkovou transformaci jsem využil k zobrazení vlnkové mapy (scalogram), obdoba spektrogramu krátké Fourierovy transformace. Diskrétní vlnková transformace se v současnosti hojně využívá k dvěma činnostem spojených se signálem. První využití je odšumění (de-noise) signálu, signál je rozložen do dané úrovně na koeficienty aproximační - C_A a detailní - C_D . Poté následuje prahování a signál je z jednotlivých koeficientů rekonstrukčním filtrem opět poskládán dohromady. Druhým využitím diskrétní vlnkové transformace je komprese (compression).

9.1 Program

Pro analýzu signálů elektromagnetické a akustické emise, jsem si v programovém prostředí MATLAB naprogramoval program využívající funkce spektrálních analýz. Program je upraven pro načítání dat ze souborů vytvořených při měření signálů elektromagnetické a akustické emise. Po jejich načtení, jsou jednotlivé signály vykresleny a program je připraven k použití vestavěných funkcí na naměřená data. Okno programu je rozděleno na dvě hlavní části. První polovinu tvoří seznam funkcí aplikovatelných na načtená data. Výběrem jednotlivé funkce se aktivuje její příslušné nastavení v druhé polovině. Zde je možnost vybrat zdali funkce bude použita na oba signály, popřípadně si vybrat pouze jeden. Po nastavení funkce vyvoláme její provedení a zobrazení v grafu tlačítkem Zobrazit, nacházející se ve spodní části programu. Grafy funkcí jsou zobrazovány do nových oken, popřípadně zvolením možnosti *Zobrazit v jednom okně* z kontextové nabídky Okna, budou další grafy vykreslovány ve stejném okně, zamezí se tím otvírání dalších oken pro následující zobrazení. Pokud se budu v textu odkazovat na tento pomocný program pro analýzu signálů EME a AE, budu jej tak již zmiňovat pouze jako *program*.



Obr. 9.1: Program.

9.2 Signál

Soubor naměřených dat vzorkováním analogového signálu $x_a(t)$ vzorkovací periodou $T = \frac{1}{f_{vz}}$ nám dává posloupnost vzorků, pro které platí :

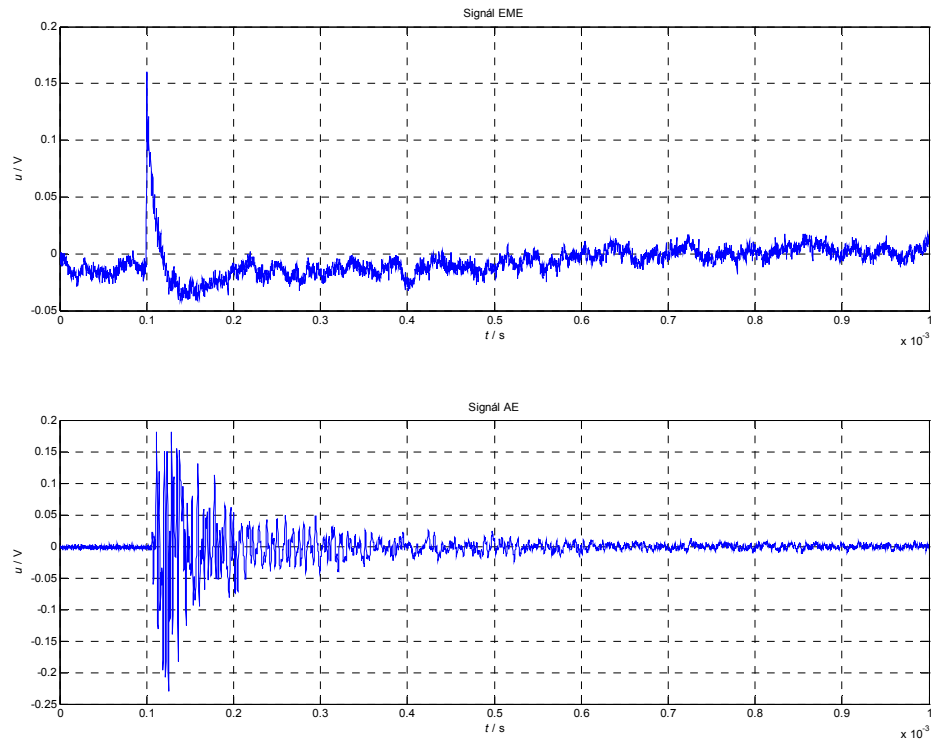
$$x[n] = x_a(nT), \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (9.0)$$

Jelikož u signálu elektromagnetické a akustické emise nelze najít pravidelně se opakující úsek o délce N , neplatí tak podmínka periodicity :

$$x[n + N] = x[n], \quad (9.1)$$

a hovoříme tak o daném signálu jako o signálu aperiodickém. Signály dále nejde přesně popsat matematickou funkcí, funkční hodnoty signálu tak nelze vypočítat na základě nezávislé proměnné za pomoci předem určené matematické funkce. Signály elektromagnetické a akustické emise se tak řadí mezi signály stochastické, nemůžeme u nich určit hodnoty, které by je předem popsaly. Pro spektrální analýzu je důležité určit, zdali se jedná o signál stacionární či nestacionární. U nestacionárních lze vysledovat různorodý výskyt frekvencí v čase. Zatímco pro stacionární signály platí, že všechny frekvence se vyskytují ve všech časech. Změřené emisní signály po následné analýze lze považovat za nestacionární signály, nejsou neměnné.

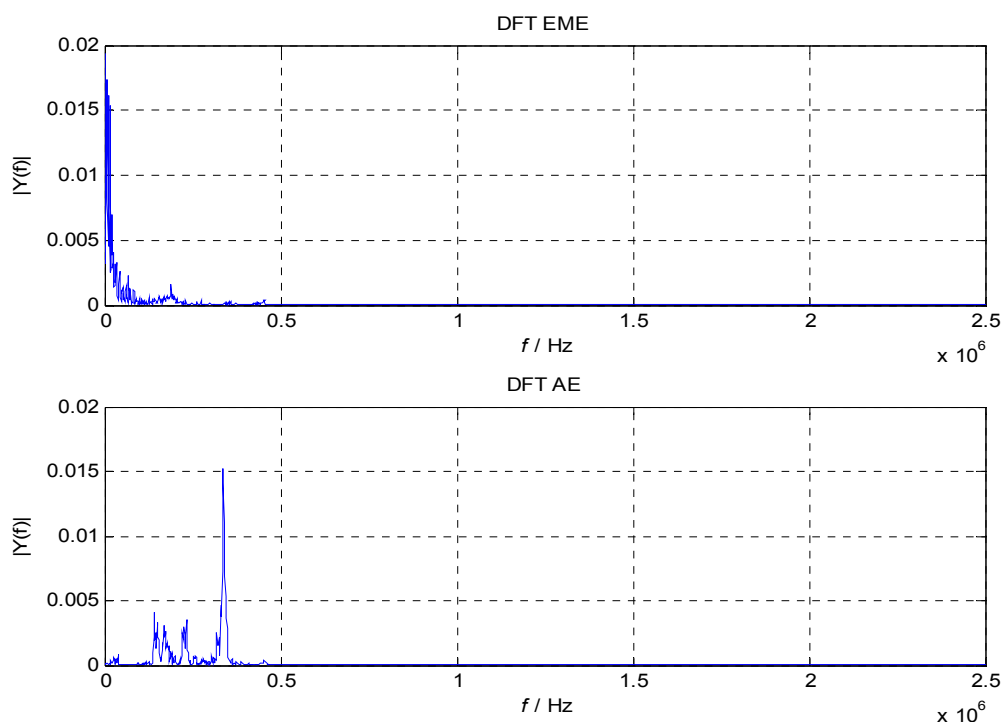
Naměřené signály jsou vzorkovány vzorkovací frekvencí $f_{vz} = 5MHz$. Celkový počet hodnot pro jeden naměřený signál je 5000 vzorků.



Obr. 9.2: Signál EME, AE.

9.3 Diskrétní Fourierova transformace

K analýze signálu EME a AE jsem použil i diskrétní fourierovu transformaci. Tato metoda sice nepodává podrobné informace o rozmístění jednotlivých spektrálních složek v čase, ale dává globální přehled o výskytu všech frekvenčních složek obsažených v signále. Slouží tak k rychlému náhledu na měřená data a k zjištění, kterých hodnot si posléze všímat.



Obr. 9.3: Diskrétní Fourierova transformace EME, AE.



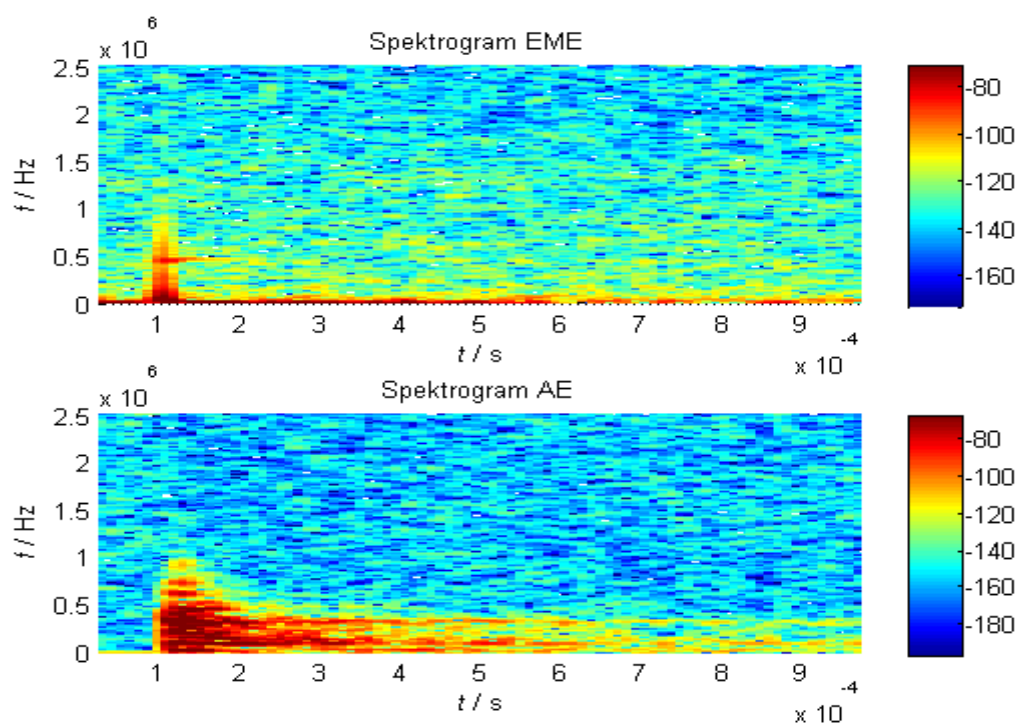
Obr. 9.4: Nastavení DFT EME, AE.

9.4 Krátkodobá Fourierova transformace

Použitím krátkodobé Fourierovy transformace (*Shot-Time Fourier transform* - STFT) lze sledovat vývoj signálu v čase i ve frekvenci. U signálů elektromagnetické a akustické emise lze sledovat výskyt jednotlivých frekvencí v čase. Zbylá informace vypočtená funkcí STFT je spektrální hustota výkonu každého segmentu. Ta je v grafu vyobrazena pomocí třetí souřadnice, první dvě patří frekvenci a času. Grafy spektrogramů jsou trojrozměrné, je možné je tak zobrazit v prostoru, což může být pro některé aplikace obtížné. Častou reprezentací třetího rozměru ve spektrogramech je jeho určení barevnou hodnotou. Data jsou vykreslena pouze ve dvou rozměrném zobrazení, poslední rozměr je zastoupen barvou, barevným složkám je přiřazena číselná stupnice, která obsahuje rozsah funkčních hodnot zastoupené funkce.

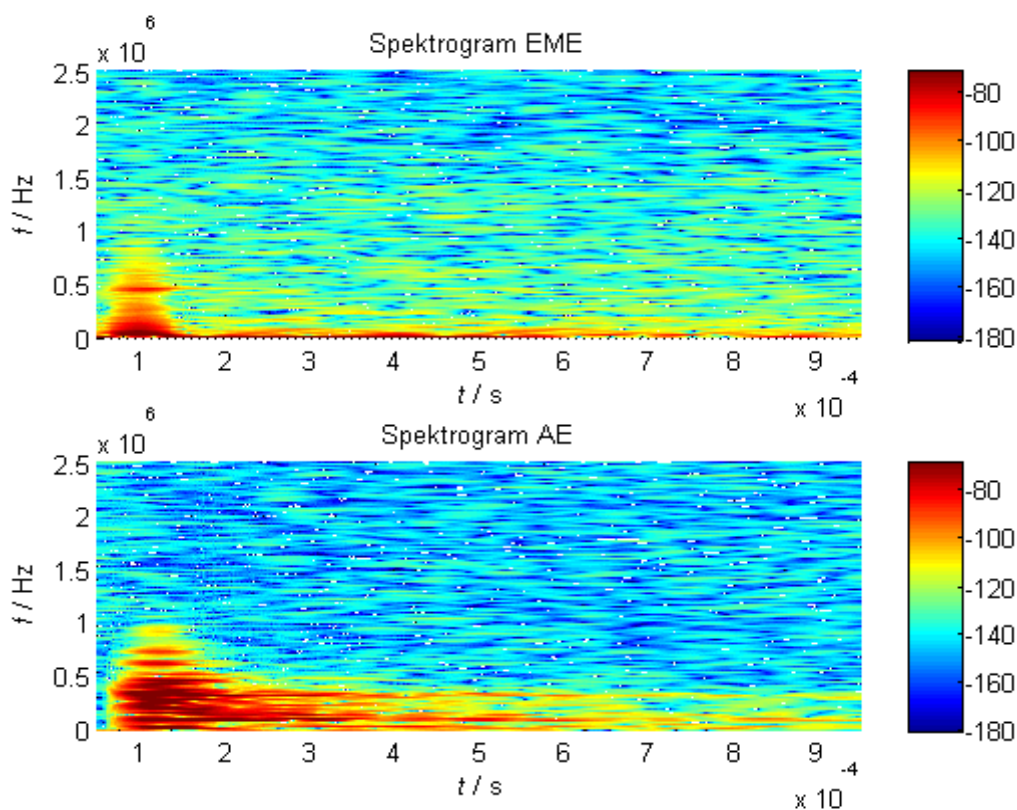
U signálu elektromagnetické emise si lze povšimnout dominantních frekvencí v čase $t_1 = 0,1 \text{ ms}$, kdy jsou frekvenční složky zastoupeny od nízkých frekvencí až po hodnotu 1 MHz. V tomto úseku dochází ke vzniku trhliny, vytvoření elektrického dipólu a přerozdělení elektrického náboje. Náboje se pohybují a snímače tak dokáží měřit elektromagnetickou emisi. Z grafu vidíme, že tento proces trvá do doby $t_2 = 0,2 \text{ ms}$.

Akustická emise doprovází elektromagnetickou emisi společně při vzniku trhliny. Při rychlém uvolnění energie elastické napjatosti je charakteristické pro akustickou emisi emitování napěťové vlny. Z grafu tento průběh opět nalezneme v čase $t_1 = 0,1 \text{ ms}$. Nejvíce dominantních frekvencí je rozprostřeno kolem frekvence 0,5 MHz, ostatní frekvence jsou znatelné od nižších až po vyšší frekvence končící hodnotou 1 MHz. Postupné šíření akustické vlny a její dozrívání je z grafu patrné až do času $t_2 = 0,6 \text{ ms}$.

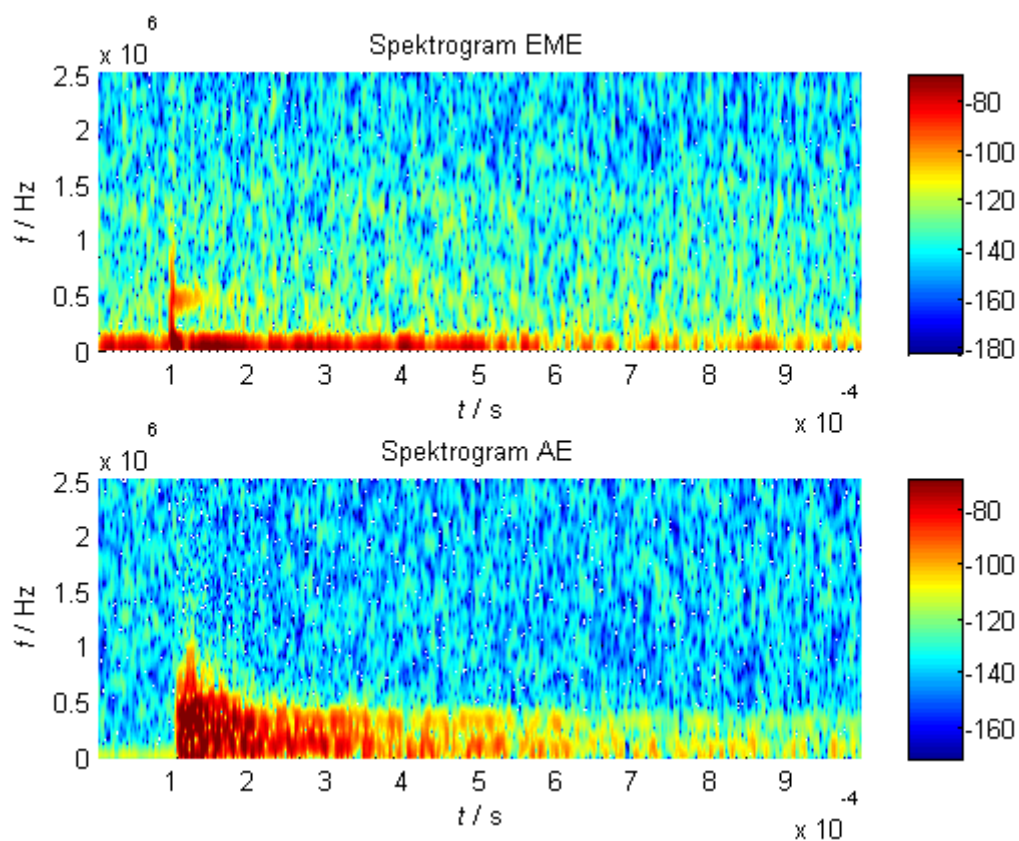


Obr. 9.5: Spektrogram EME, AE.

Volbou širokého okna dostaneme dobrú rozlišovaciu schopnosť signálu vo frekvencii, zatiaľ čo pre úzke okno je dobré rozlíšenie v čase.



Obr. 9.6: Spektrogram EME, AE široké okno.



Obr. 9.7: Spektrogram EME, AE úzké okno.

Pro volbu širokého okna jsem zvolil nastavení STFT s délkou DFT 512 vzorků:

- délka váhovacího okna 511 vzorků,
- překryv oken 500 vzorků.

Úzké okno jsem nastavil změnou délky okna a překryvu na hodnoty :

- délka váhovacího okna 49 vzorků,
- překryv oken 40 vzorků.

9.5 Spojitá vlnková transformace

Spojitá vlnková transformace (*Continuous Wavelet Transform* – CWT) stejně jako krátkodobá Fourierova transformace patří mezi časově - frekvenční analýzy. Výhodou CWT je, že nepoužívá okno konstantní délky. Může tak podat dobré rozlišení v čase i ve frekvenci. Výsledkem CWT pro každé okno je koeficient. Jeho hodnota je tím větší, čím větší je podobnost zkoumaného signálu v místě okna s vybranou vlnkou. Ze vzorečku (vzorec CWT) nám šířku okna definuje s :

- velké s – vlnka je široká v čase,
- malé s – vlnka je úzká v čase.

Hodnota τ posouvá vlnku po časové přímce, určuje tak polohu okna.

Pokud necháme s konstantní a τ se bude měnit, výsledkem bude časový signál, jehož hodnoty budou udávat, jaká část transformovaného signálu se nejvíce podobá vybrané vlnce. Koeficienty CWT v tomto bodě budou mít největší amplitudu.

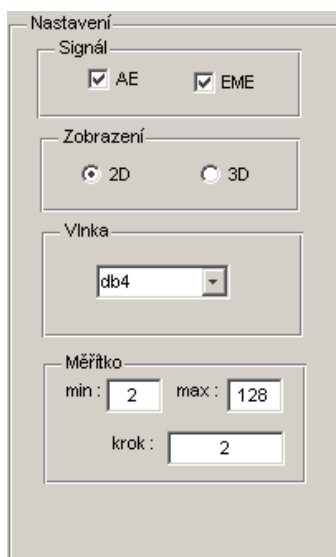
Změnou s i τ současně získáme podrobnější tabulku koeficientů, ve které budou údaje jak o čase, tak i o měřítku. Měřítko souvisí s frekvencí. Čím větší bude s tím širší vlnka bude odpovídat nižším frekvencím ve zkoumaném signálu.

Je tak vhodné zvolit takovou vlnku, která bude po transformaci signálu vykazovat co největší počet vysokých hodnot koeficientů transformace.

Pro výběr vlnky a zvolení měřítka slouží v programu funkce CWT, její nastavení vypadá dle obr. 9.8. Výběrem různých vlnek jsem se pokoušel získat zobrazení, které by obsahovalo velké množství vyšších koeficientů CWT analyzovaného signálu. Cílem je vybrat vlnku podobného tvaru jako analyzovaný signál. Pro frekvenční analýzu signálu jsem nevyužil Biorthogonalních vlnek. Tyto vlnky se používají při rekonstrukci obrazu či signálu. Místo jedné vlnky se používají dvě, jedna pro rozklad a druhá pro rekonstrukci.

Dále podmínkou nastavení měřítka je :

1. Všechna měřítka musí být kladná reálná čísla
2. Přírůstek (krok) měřítka musí být kladný.
3. Nejvyšší měřítka nesmí překročit maximální hodnotu závislou na signále.



Nastavení

Signál

☒ AE ☒ EME

Zobrazení

☒ 2D ☐ 3D

Vlnka

db4

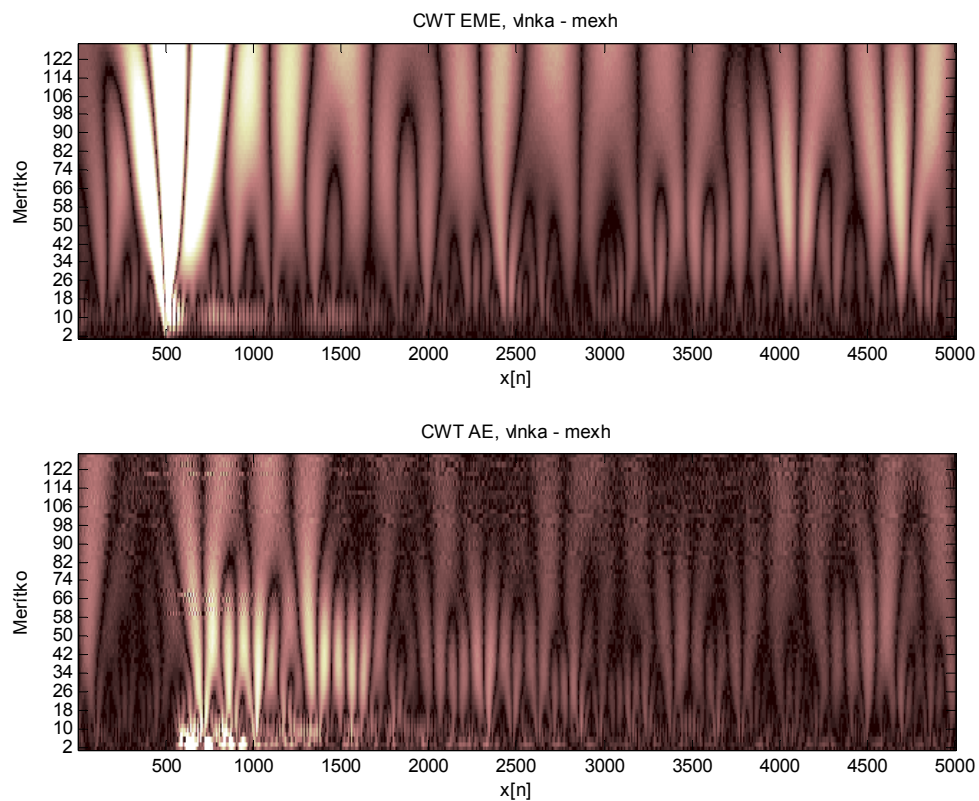
Měřítka

min : 2 max : 128

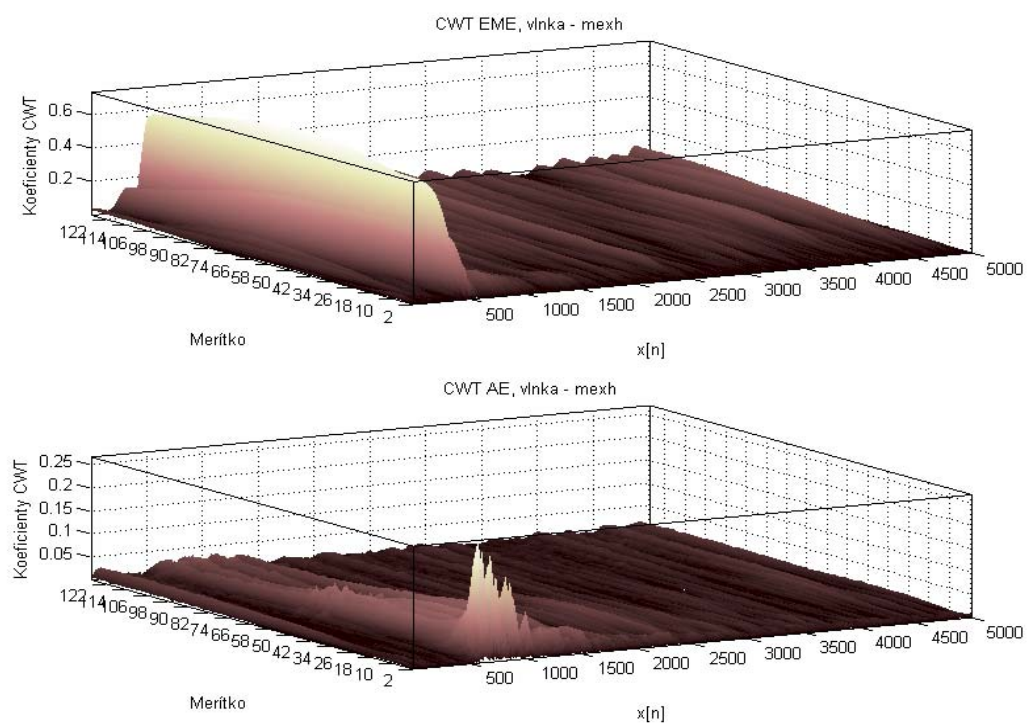
krok : 2

Obr. 9.8: Nastavení CWT.

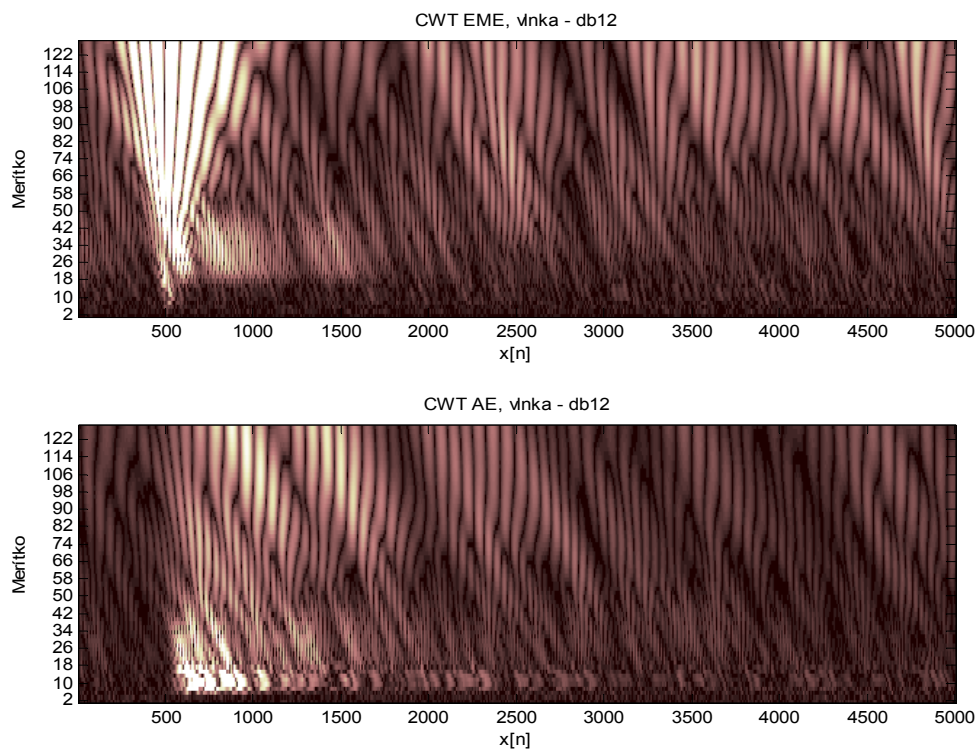
Různým výběrem vlnek a zobrazením jejich transformace s měřeným signálem poskytovala vlnka Mexican Hat velké hodnoty koeficientu transformace. Rozdíly mezi jednotlivými vlnkami jsou ukázány na následujících grafech.



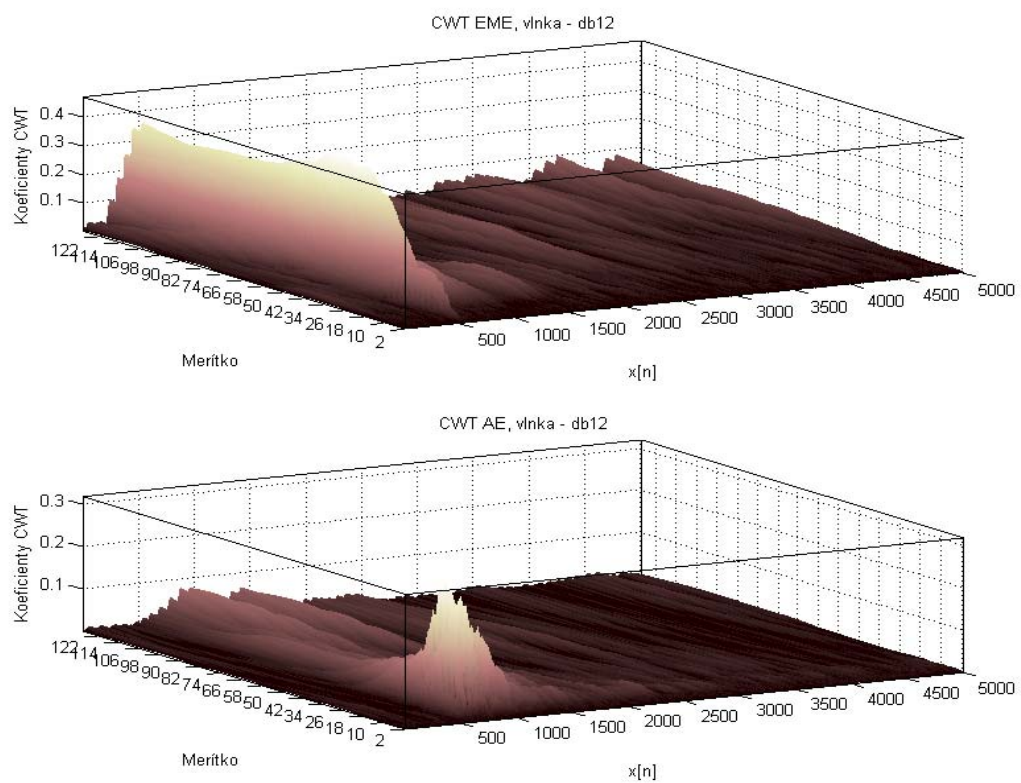
Obr. 9.9: CWT EME, AE - mexh.



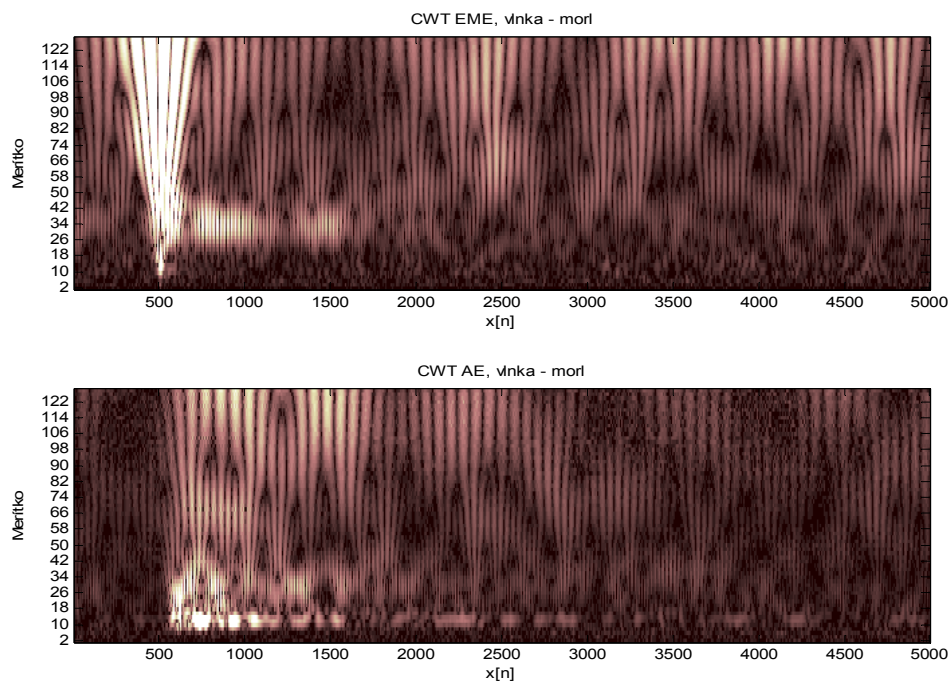
Obr. 9.10: CWT EME, AE - mexh.



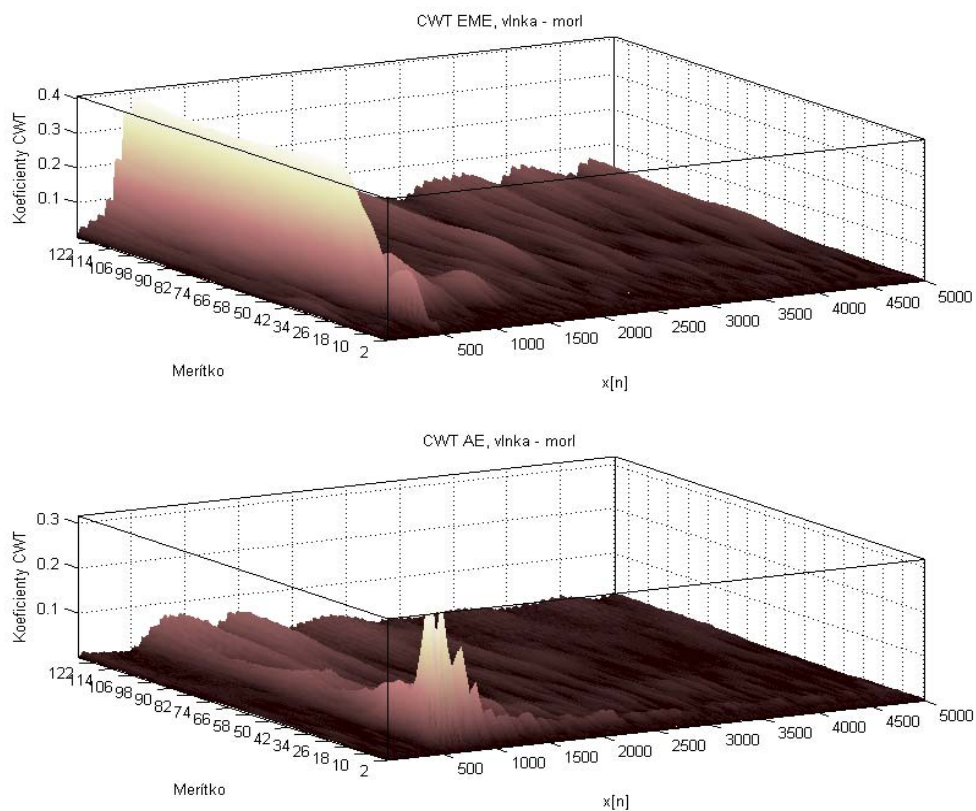
Obr. 9.11: CWT EME, AE – db12.



Obr. 9.12: CWT EME, AE – db12.



Obr. 9.13: CWT EME, AE – morl.



Obr. 9.14: CWT EME, AE - morl

9.6 Diskrétní vlnková transformace

Zatímco CWT je spojena s výpočtem koeficientů transformace a jejich následným zobrazením v podobě vlnkové mapy. Diskrétní vlnková transformace (*Discrete Wavelet Transform* - DWT) je více spjata s odšumováním (*denoise*) a kompresí (*compression*) signálu. Velké zastoupení má DWT ve zpracování obrazu.

Při odšumování signálu metodou DWT dochází k dekompozici signálu na danou úroveň. Během zkoušení metody v programu jsem usoudil, že rozklad signálu do třetí úrovně dává optimální výsledky. DWT dělá rozklad za pomoci páru kvadraturních zrcadlových filtrů. Horní propust poskytuje koeficienty detailů – cD, dolní propust koeficienty aproximace – cA. Koeficienty aproximace jsou dále rozkládány až do námi zvolené úrovně. Po každé dekompozici se vytváří výstupní vektor dat poloviční délky původního vektoru. Následuje prahování, $x(n)$ jsou v následném prahování koeficienty dekompozice, $y(n)$ jsou prahované koeficienty. K filtraci jsem vybral měkké prahování popsané funkcí :

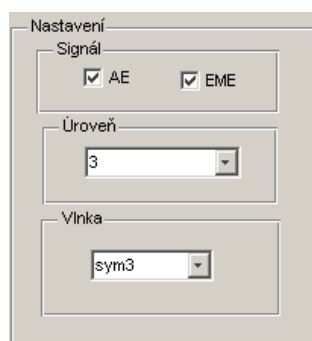
$$y(n) = \begin{cases} \text{sign}(x(n))(|x(n)| - T) & \text{pro } |x(n)| > T \\ 0 & \text{pro } |x(n)| \leq T \end{cases} \quad (9.2)$$

Funkce sign značí funkci signum definovanou vztahem :

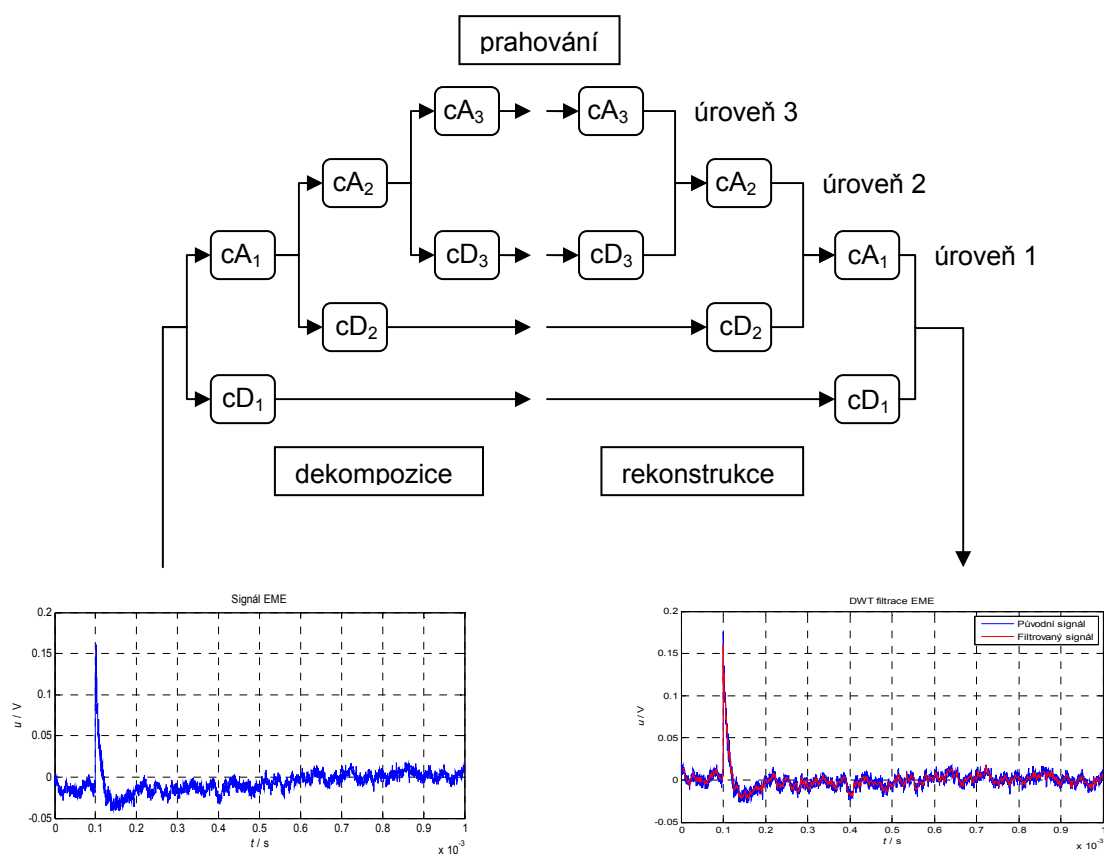
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & : x < 0 \\ 0 & : x = 0 \\ 1 & : x > 0 \end{cases} \quad (9.3)$$

Práh T je určen matlabovskou funkcí `ddencmp` použitou k určení hodnot pro filtrování signálu.

Nastavení filtrování pomocí DWT se v programu realizuje výběrem úrovně a vlnky, dle obr.



Obr. 9.15: Nastavení DWT.



Obr. 9.16: DWT filtrování.

Algoritmus odstranění šumu ze signálu :

- vybere se vhodná vlnka a hladina rozkladu h
- vypočítá se rozklad signálu na hladinách 0 až $h - 1$
- pro hladiny detailů $d1$ až dh se stanoví práh omezení a aplikuje se proces
- odstranění podprahových hodnot detailních koeficientů
- provede se zpětná rekonstrukce, která je založena na použití původních

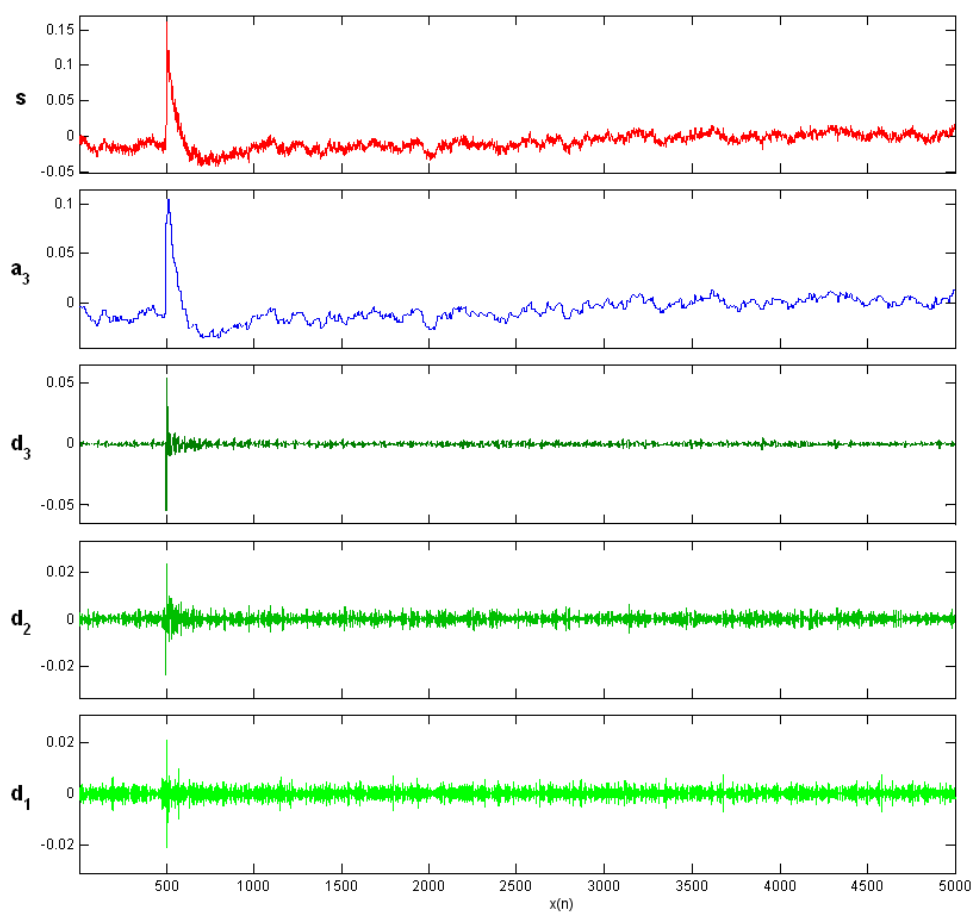
- aproximovaných koeficientů hladiny h a modifikovaných detailních koeficientů z hladin 0 až $h - 1$ signálu.

Během rekonstrukce je signál S složen dohromady z koeficientů :

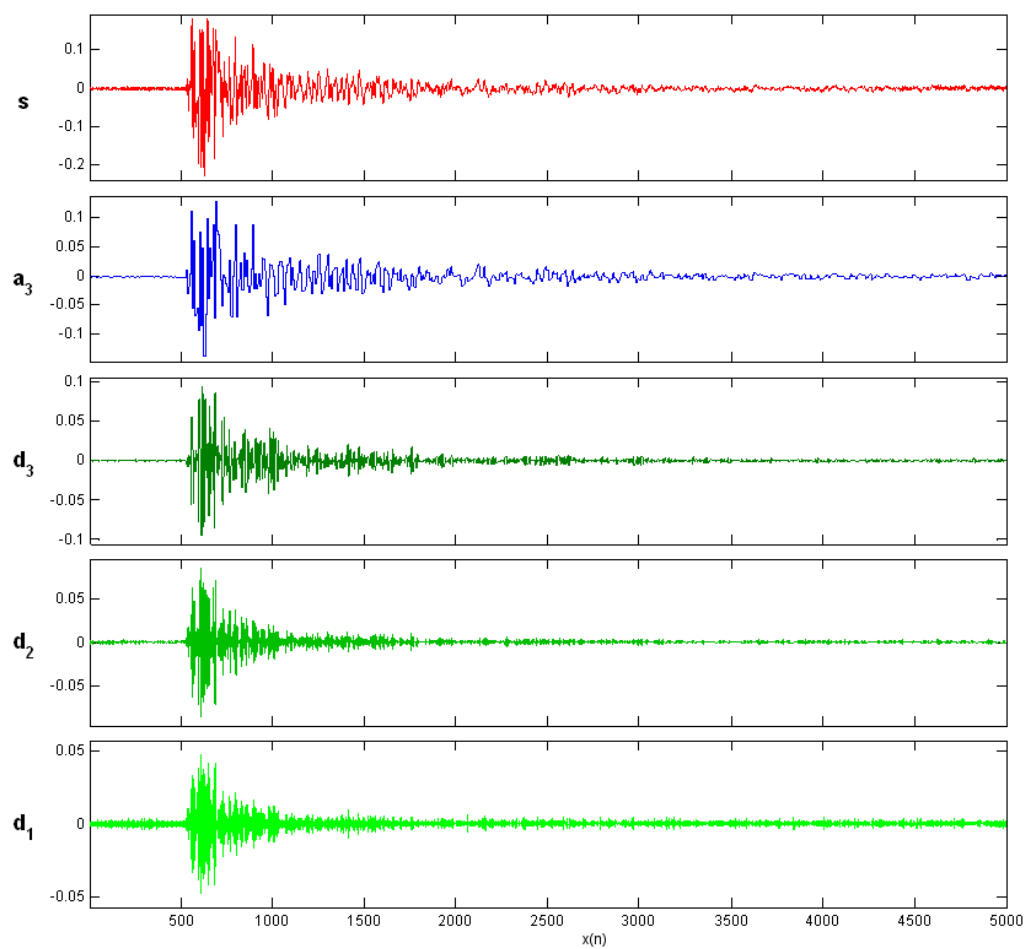
$$S = cA_3 + cD_3 + cD_2 + cD_1 \quad (9.4)$$

Aplikací různých vlnek během filtrování jsem nevypozoroval větší rozdíly mezi vlnkami, rozklad jsem po několika testech volil to třetí úrovně, tato hodnota se mi zdála optimální.

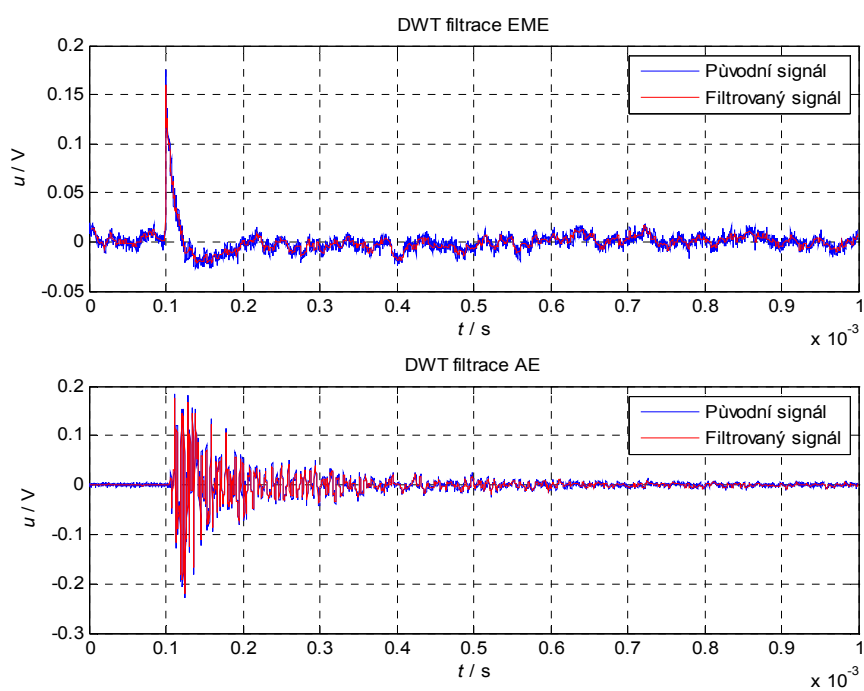
Následující grafy zobrazují rozklad signálu do třetí úrovně.



Obr. 9.17: Dekompozice EME.



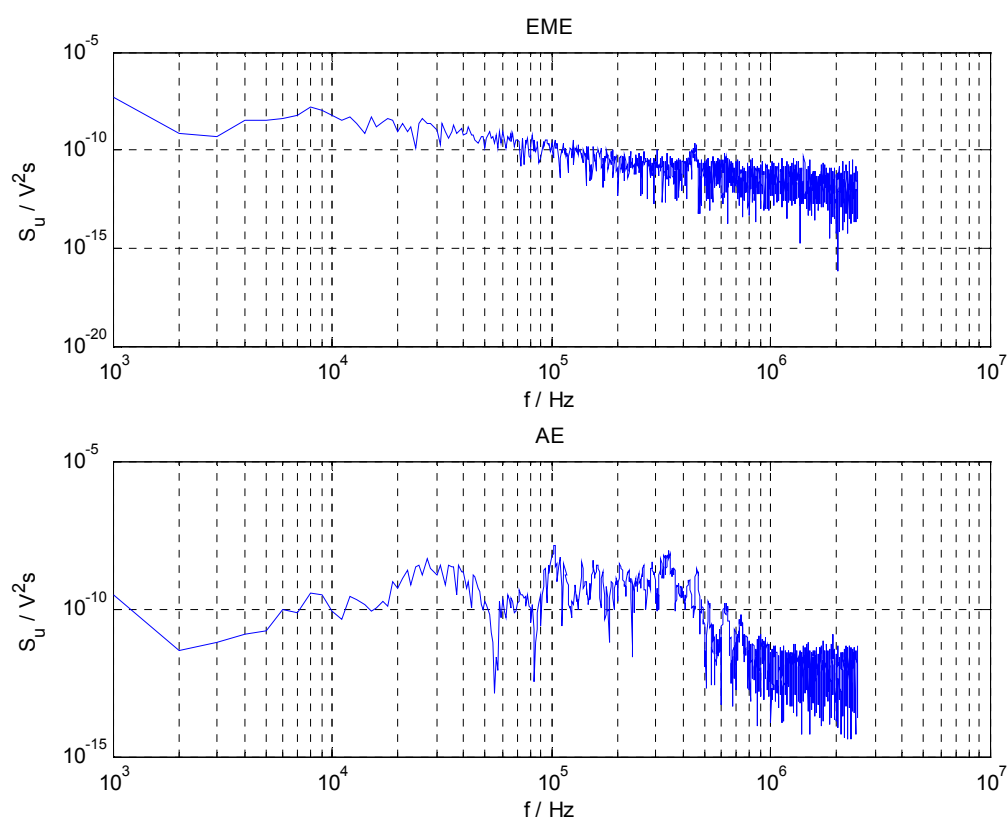
Obr. 9.18: Dekompozice AE.



Obr. 9.19: DWT filtrace EME, AE.

9.7 Spektrální hustota výkonu

Spektrální hustota výkonu patří mezi nástroj popisující stochastické procesy, charakterizuje rozdělení výkonu signálu v závislosti na kmitočtu. V grafu u EME má signál největší hodnotu výkonu kolem frekvence 8 kHz, se zvyšující se frekvenci výkon klesá. U signál AE lze najít tři hodnoty frekvencí s vyšší hodnotou výkonu, první na frekvenci 20 kHz, druhá na frekvenci 100 kHz a poslední na frekvenci 250 kHz.



Obr. 9.20: Spektrální hustota výkonu EME, AE.

10 Závěr

Emisní hodnoty nám poskytují informace o dějích vznikajících a probíhajících uvnitř materiálu. Zaznamenáváním těchto hodnot můžeme popsat, které děje uvnitř materiálu probíhají. Zaměřením této diplomové práce byla analýza signálů akustické a elektromagnetické emise.

Signály nám poskytují informace o tvorbě trhlin. Ty vznikají buď záměrným působením na materiál nebo vznikají volně, běžným užíváním materiálu. Z popsaných vlastností materiálu v makroskopickém měřítku lze říci, že působením vnějšího tlaku na materiál je zapříčiněno vznik dislokací v krystalické mřížce. Jejich nabývání tak vede ke vzniku trhliny. Ta generuje signály akustické a elektromagnetické emise. Objasnění jejich emitování je prozatím popsáno teoreticky. Nepodařilo se mi najít vhodnou metodu, která by tak mohla poodhalit vznik mechanismu signálů akustické a elektromagnetické emise.

Použité spektrální analýzy zobrazují vývoj signálu od jeho generace po ustálení tvorby trhlin. Z výsledků je patrné, že vhodným použitím více úrovněv analýzy získáme informace, které nám analýzy vhodné pouze pro stacionární signály neposkytnou. Vhodným nástrojem se projevila vlnková transformace, která má široké uplatnění ve zpracování signálů.

Seznam obrázků

Obr. 6.1: Blokové schéma měřícího pracoviště	17
Obr. 8.1: Haarova vlnka.	27
Obr. 8.2: Vlnka Mexican Hat	28
Obr. 8.3: Morletova vlnka	29
Obr. 8.4: Meyerova vlnka	29
Obr. 8.5: Vlnka Daubechiesova 2. řádu	30
Obr. 8.6: Vlnka Daubechiesova 12. řádu.	31
Obr. 9.1: Program	33
Obr. 9.2: Signál EME, AE.	35
Obr. 9.3: Diskretní Fourierova transformace EME, AE.	36
Obr. 9.4: Nastavení DFT EME, AE.....	36
Obr. 9.5: Spektrogram EME, AE.	38
Obr. 9.6: Spektrogram EME, AE široké okno.	38
Obr. 9.7: Spektrogram EME, AE úzké okno.....	39
Obr. 9.8: Nastavení CWT.....	41
Obr. 9.9: CWT EME, AE - mexh	42
Obr. 9.10: CWT EME, AE - mexh	42
Obr. 9.11: CWT EME, AE – db12.	43
Obr. 9.12: CWT EME, AE – db12.	43
Obr. 9.13: CWT EME, AE – morl.....	44
Obr. 9.14: CWT EME, AE – morl.....	44
Obr. 9.15: Nastavení DWT	46
Obr. 9.16: DWT filtrování.....	46
Obr. 9.17: Dekompozice EME	47
Obr. 9.18: Dekompozice AE	48
Obr. 9.19: DWT filtrace EME, AE.....	48
Obr. 9.20: Spektrální hustota výkonu EME, AE.....	49

Použitá literatura

[1] CHOBOLA, Zdeněk. Nedestruktivní testování materiálů a struktur pomocí analýzy signálu získaného při jejich namáhání. VUTIUM Brno 2002, ISBN 80-214-2043-X.

[2] PAZDERA L., SMUTNÝ J., KOŘENSKÁ M., MAZAL P.

Využití časově frekvenčních metod pro analýzu signálů při nedestruktivním testování.

- [3] ŠMÍD R. Úvod do vlnkové transformace
- [4] JAN, Jiří. Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů. VUTIUM Brno 2002, ISBN 80-214-0816-2.
- [5] NDT Resource Center, Introduction to Acoustic Emission Testing [online], Dostupný z WWW : < http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm>
- [6] SOVKA Pavel, POLLÁK Petr. Vybrané metody číslicového zpracování signálů, Skripta ČVUT Praha, ISBN 80-01-02824-6
- [7] MOLLIKOVÁ Eva, Chování materiálu za působení vnější síly.
- [8] KOKTAVÝ, Pavel. Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik, Skripta FEKT VUT v Brně. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [9] KOKTAVÝ, P., KOKTAVÝ, B., Analysis of mechanical load induced micro-crack generation in composites, In DEFEKTOSKOPIE 2005 - sborník příspěvků. Znojmo : Czech Society for Nondestructive Testing, 2005, ISBN 80-214-3053-2.
- [10] MOLLIKOVÁ Eva, Struktura hmoty.
- [11] ČERNOCKÝ Jan, Neparametrický popis - Fourierova analýza Signálu.
- [12] SMUTNÝ J., PAZDERA L., Využití výpočetního systému MATLAB při nedestruktivní kontrolesatvebních materiálů a dílcůroznoremakustické odezvy generované mechanickým impulsem.
- [13] SEDLÁČEK M., ŠMÍD R., MATLAB v měření. Skripta ČVUT Praha, ISBN 80-01-02851-8
- [14] KNÁPEK, Alexander. ANALÝZA SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE. Bakalářská práce, Brno 2006.

