

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLNKOVÁ TRANSFORMACE A CHARAKTERIZACE SIGNÁLŮ
AKUSTICKÉ EMISE PRO SHLUKOVOU ANALÝZU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR BLAŽEK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLNKOVÁ TRANSFORMACE A CHARAKTERIZACE SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE PRO SHLUKOVOU ANALÝZU

WAVELET TRANSFORM AND CHARACTERIZATION OF ACOUSTIC SIGNAL EMISSION FOR
CLUSTER ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR BLAŽEK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Petr Blažek

ID: 140217

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Vlnková transformace a charakterizace signálů akustické emise pro shlukovou analýzu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem této práce je studium vlnkové transformace a její využití pro charakterizaci signálů akustické emise (AE) pro shlukovou analýzu. Testovací množinou budou signály uměle generované dvěma AE zdroji. Dílčí cíle: 1. S použitím předepsané literatury a souvisejících informací na internetu zpracovat stručný stav řešení problematiky. 2. Vytvořit algoritmus shlukové analýzy pro identifikaci AE událostí generovaných ze dvou rozdílných zdrojů AE. 3. Nalézt vhodné mateřské vlnky popisující signálové parametry události akustické emise pomocí spojitě a diskrétní vlnkové transformace, a vytvoření algoritmu s výstupním vektorem pro shlukovou analýzu. 4. Nalézt vhodné mateřské vlnky pro odstranění šumu AE signálu pomocí diskrétní vlnkové transformace a vytvoření odpovídajícího algoritmu. 5. Všechny algoritmy implementovat v prostředí MATLAB.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Scruby, C.,B. An introduction to acoustic emission. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1987, roč. 20, s. 946-953. ISSN: 0022-3735.
- [2] Csefalvay, G., Využití metod umělé inteligence pro charakterizaci zdrojů akustické emise v pevných látkách, pojednání o disertační práci VUT Brno, 2012.
- [3] Šmíd, R., Úvod do vlnkové transformace, <http://measure.feld.cvut.cz/groups/diag/download/Wavelet-intro8859.pdf>, 2001.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Petr Sedlák, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Tato práce popisuje použití vlnkové transformace pro charakterizaci signálů akustické emise ve shlukové analýze. Akustická emise, jež patří mezi pasivní nedestruktivní metody, nabízí obrovský potenciál díky své možnosti kvantizačního vyhodnocování, jako je lokalizace a charakterizace emisních zdrojů, tj. široké spektrum degradačních procesů v materiálu. V této práci jsem se zaměřil na testování vstupních parametrů AE, výběr vhodné mateřské vlnky při aplikaci DWT a WPT pro charakterizaci zdrojů AE a na výběr vhodné mateřské vlnky při redukci šumu pomocí DWT.

KLÍČOVÁ SLOVA

akustická emise, shluková analýza, vlnková transformace, vstupní parametry

ABSTRACT

This work describes the usage application of wavelet transform for on characterization of acoustic emission signals in cluster analysis. Acoustic emission, which are among the passive non-destructive methods, offering a huge potential due to quantization evaluating their options, such as localization and characterization of emission sources, i.e. wide spectrum of degradation processes in the material. In this work, I focused on testing the input parameters AE, selection of a suitable mother wavelet in the application of DWT and WPT for characterization of AE sources and the selection of a suitable mother wavelet noise reduction when using DWT

KEYWORDS

acoustic emission, cluster analysis, input features, wavelet transform

BLAŽEK, Petr *Vlnková transformace a charakterizace signálů akustické emise pro shlukovou analýzu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 61 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vlnková transformace a charakterizace signálů akustické emise pro shlukovou analýzu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Petru Sedlákoví, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Vlnková transformace	13
1.1 Spojitá vlnková transformace (CWT)	13
1.2 Diskrétní vlnková transformace (DWT)	14
1.3 Reálná dyadická vlnková transformace s diskrétním časem	14
1.4 Banky filtrů	15
1.5 Paketová DTWT	15
1.6 Bázové funkce	16
1.6.1 Druhy vlnků	16
2 Akustická emise	20
2.1 Základní princip akustické emise	20
2.2 Událost Akustické emise	21
2.2.1 Parametry popisující událost AE	21
3 Shluková analýza	23
3.1 Metody shlukování	23
3.2 Normovací metody	24
3.3 Metody redukce dimenzí	24
4 Redukce šumu pomocí DWT	26
4.1 Prahování vlnkových koeficientů	26
5 Metodika vyhodnocení rozlišitelnosti AE zdrojů	27
5.1 Algoritmus shlukové analýzy pro rozlišení AE zdrojů	27
5.2 Metodika vyhodnocení	28
5.3 Popis experimentu	28
6 Parametry AE události v časově frekvenční oblasti	30

6.1	Vhodné mateřské vlnky	30
6.1.1	Parametry v časově-frekvenční oblasti	30
6.2	Definice použitých parametrů	30
6.3	Výsledky testování vstupních parametrů	32
7	Aplikace DWT a WPT pro charakterizaci zdrojů AE	35
7.1	Popis metodiky testování jednotlivých vlnek	36
7.2	Výsledky testování jednotlivých vlnek	37
8	Redukce šumu pomocí DWT a vliv na shlukování	43
8.1	Popis metodiky	43
8.2	Výsledky testování jednotlivých vlnek	43
9	Závěr	46
	Literatura	48
A	Příloha 1	50
A.1	Výslední tabulky pro pro shlukovou analýzu při aplikaci DWT a WPT	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Ukázka rozkladu diskrétní vlnkové transformace	14
1.2	Ukázka rozkladu diskrétní vlnkové transformace	15
1.3	Ukázka paketové DTWT se dvěma stupni rozkladu	16
1.4	Haarova vlnka	17
1.5	Daubechiesova vlnka 5. řádu	17
1.6	Symplet 5. řádu	18
1.7	Coiflet 2. řádu	18
1.8	Meyerova vlnka vlnka	18
1.9	Morletova vlnka	18
1.10	Gaussova vlnka 3. řádu	19
1.11	Shannonova vlnka 1-1	19
1.12	Vlnka Mexican hat	19
1.13	Biortogonální spline 3.3 vlnka	19
1.14	Reverzní biortogonální spline 3.7 vlnka	19
2.1	Schéma vzniku AE a detekce elastických vln v materiálu [3]	20
2.2	Událost s vybraný parametry AE z časové oblasti [8]	22
5.1	Vývojový diagram shlukové analýzy v programu MATLAB	27
5.2	Schéma experimentálního pracoviště	29
6.1	Signál zlomení tuhy	30
6.2	Signál laserový puls	30
6.3	Použití Morletovy vlnky na signál z obr.6.1	31
6.4	Použití Morletovy vlnky na signál z obr.6.2	31
6.5	Použití Gaborovy vlnky na signál z obr.6.1	31
6.6	Použití Gaborovy vlnky na signál z obr.6.2	31
6.7	Použití vlnky Battle-Lemarie na signál z obr.6.1	31
6.8	Použití vlnky Battle-Lemarie na signál z obr.6.2	31
6.9	Použití vlnky Mexican Hat na signál z obr.6.1	32
6.10	Použití vlnky Mexican Hat na signál z obr.6.2	32

6.11	Shluková analýza s metodou PCA a <i>histD</i> pro frekvenční oblast . . .	34
6.12	Shluková analýza s metodou LEM a <i>histD</i> pro frekvenční oblast . . .	34
7.1	Rozkladový strom DWT použitý při analýze	35
7.2	Rozkladový strom WPT použitý při analýze	36
8.1	Graf závislosti šumu na chybě shlukové analýzy	45

SEZNAM TABULEK

6.1	Výsledky shlukové analýzy pro jednotlivé metody	33
7.3	Shluková analýza všech výstupních signálů při použití DWT	39
7.4	Shluková analýza při DWT pro signál $X_{3,2}$	40
7.1	Shluková analýza všech výstupních signálů při použití WPT	41
7.2	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,8}$	42
8.1	Všechny testované vlnky pro redukci šumu v AE signálu	44
8.2	Vybrané vlnky pro redukci šumu v AE signálu	45
A.1	Shluková analýza při DWT pro signál $X_{1,1}$	51
A.2	Shluková analýza při DWT pro signál $X_{2,1}$	52
A.3	Shluková analýza při DWT pro signál $X_{3,1}$	54
A.4	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,7}$	55
A.5	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,6}$	56
A.6	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,5}$	57
A.7	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,4}$	58
A.8	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,3}$	59
A.9	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,2}$	60
A.10	Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,1}$	61

ÚVOD

Akustická emise (AE) se řadí mezi pasivní nedestruktivní metody, které identifikují pouze ty defekty, jež vznikají během monitorování či testování určitého objektu. To znamená že nevysílá žádné akustické a elektromagnetické vlny do materiálu, ale detekuje vznikající a rostoucí vady uvnitř materiálu. Akustická emise nabízí obrovský potenciál díky své možnosti kvantizačního vyhodnocování, jako je lokalizace a charakterizace emisních zdrojů. Mezi zdroje akustické emise, tedy procesy vyvolávají tento fenomén, patří pohyb dislokací včetně rozvinuté plastické deformace, lom strukturních složek materiálu, dekoheze zrn, vznik mikrokryсталických mikrotrhlin, růst trhlin, svírání a rozevírání. [10]

V poslední dekádě shluková analýza našla široké uplatnění v metodách nedestruktivního testování. Pro aplikaci této metody je nutné charakterizovat signály akustické emise pomocí vybraných parametrů v časové a frekvenční oblasti. Jedním z nových přístupů je parametrizace signálů v časově-frekvenční oblasti pomocí krátkodobé Fourierově transformace či vlnkové transformace, která dává hlubší informaci vzhledem ke schopnosti lépe lokalizovat energii v časově-frekvenční oblasti.[3]

V 80-tých letech 20.století se začínají objevovat práce, které se zabývají *vlnkami*, *vlnkovou transformací*, *vlnkovými packety* apod. Vlnky si můžeme představit jako funkce s určitými vlastnostmi, pomocí kterých je možné popisovat nejrůznější prostory funkcí. Vznik vlnkové teorie vychází z myšlenky použití ke konstrukci ortonormální báze daného prostoru všechny celočíselné translace a určité celočíselné(nejčastěji dyadické) dilatace jedné jediné funkce(tzv. mateřské vlnky). Vlnky jsou na rozdíl od geometrických funkcí sinus a kosinus lokalizovány v prostoru, což přináší výhodu řídké matice vlnkových koeficientů při reprezentaci dat.[2]

1 VLNKOVÁ TRANSFORMACE

Vlnková transformace spadá mezi integrální transformace, jenž umožňují získat časově-frekvenční popis signálu. Oproti starší Fourierově transformaci dává informaci nejen o tom, které frekvence se v signálu nacházejí, ale i o jejich umístění v čase. Vlnková transformace je v podstatě konvoluce určité funkce, nebo-li vlnky (nebo jejich skupin) s analyzovaným signálem. [13]

1.1 Spojitá vlnková transformace (CWT)

Spojitá vlnková transformace (Continuous wavelet transform) je popsána rovnicí

$$y(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (1.1)$$

Jedná se o korelaci signálu $x(t)$ s vlnkami odvozenými z obecně komplexní mateřské vlnky $\psi(t)$. Název vlnky se vžil s ohledem na jejich tvar. Funkce $\psi(t)$ musí mít nulovou střední hodnotu a proto její tvar odpovídá vlnce. Symbol $*$ v rovnici značí komplexně sdruženou funkci. Výsledná funkce $y(a, b)$ je popsána dvěma spojitými parametry a, b , kde parametr a určuje měřítko časové dilatace a parametr b posun funkce po časové ose. Konstanta $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normalizuje energii jednotlivých vlnek.

Díky dobrému časovému rozlišení na vyšších frekvencích a dobrému frekvenčnímu rozlišení na nízkých frekvencích obchází vlnková transformace Heisenbergův princip neurčitosti. Díky tomu se hodí tato transformace pro analýzu signálů s nízkými frekvencemi v celé délce a vysokými frekvencemi jen v krátkých časových intervalech. [14][4]

Vlastnosti CWT

- *Linearita* - vyplývá z vlastností skalárního součinu v

$$Wf(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt. \quad (1.2)$$

- *Invariance v čase* - popisuje fakt, že posun analyzované funkce po časové ose způsobí stejný posun vlnkových koeficientů po ose polohy.
- *Dilatace* - líčí závislost mezi spojitou vlnkovou transformací původní funkce a její roztaženou nebo zúženou podobou. [13]

1.2 Diskrétní vlnková transformace (DWT)

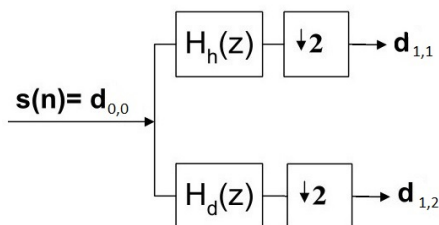
Diskrétní vlnková transformace (Discrete wavelet transform) je zvláštní případ spojité vlnkové transformace. Získáme ji nahrazením parametrů a, b funkcemi $a = a_0^m$ a $b = a_0^m kT$, kde $a_0 > 1, T > 0$. Koeficienty m, k pak musí být celočíselné, kde m reprezentuje kmitočtové měřítko a k měřítko časové.

Nejčastějším případem tohoto typu transformace je **dyadická diskrétní vlnková transformace**, kde parametry $a_0 = 2$ a $m > 0$ potom

$$y(m, k) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(2^{-m} \cdot t - kT) dt \quad (1.3)$$

Konstanta T určuje hustotu vzorkování koeficientů na časové ose pro jednotlivé kmitočtové úrovně dané indexem m . Konstanta T závisí na šířce pásma B mateřské vlnky. Dyadická DWT je charakterizována oktávovou podobou spekter soustavy vlnek. S rostoucím m se krok posunutí a zvětšuje. Výsledek je množina koeficientů $y(m, k)$ nerovnoměrně rozložených v časově-měřítkové rovině. [4][6]

Na obr.1.1 je zobrazen jednostupňový rozklad diskrétní vlnkové transformace, kde $H_h(z)$ je horní propust a $H_d(z)$ dolní propust. Signál se dělí do dvou frekvenčních pásem. Nízkofrekvenční signál obsahující aproximační složku ($d_{1,1}$) a na vysokofrekvenční složku s detailními informacemi ($d_{1,2}$). [14]



Obr. 1.1: Ukázka rozkladu diskrétní vlnkové transformace

1.3 Reálná dyadická vlnková transformace s diskrétním časem

Dyadická vlnková transformace s diskrétním časem (DTWT) (discrete time wavelet transform) je popsána jako funkce $y_m(n)$ diskrétního signálu $x(n)$:

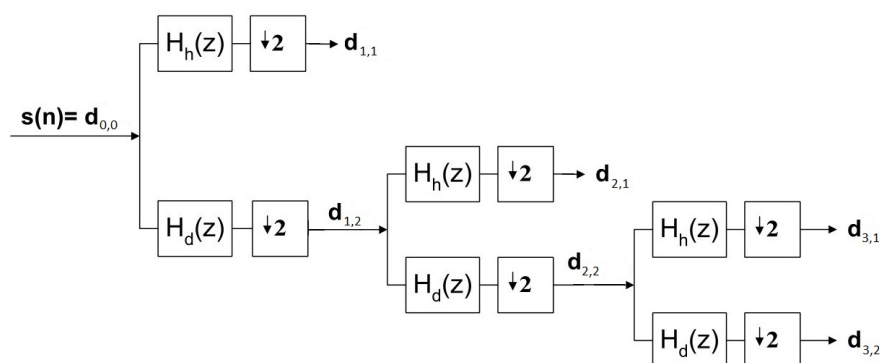
$$y_m(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_m(i) x(2^m n - i). \quad (1.4)$$

Ze vztahu je patrné, že vzorkovací frekvence $y_m(n)$ na výstupu m -tého filtru se 2^m -krát sníží oproti vzorkovací frekvenci f_{vz} vstupního signálu $x(n)$. Díky tomu je počet koeficientů transformace shodný s počtem vzorků vstupního signálu $x(n)$. [4][6]

1.4 Banky filtrů

Jedná se o víceúrovňový rozklad diskretní vlnkové transformace. Používá se ke zvýšení frekvenčního rozlišení. V každé úrovni rozkladu je rozloženo vždy nízkofrekvenční pásmo ($d_{x,y}$), kde x je úroveň rozkladu a y označení výstupního signálu. [14]

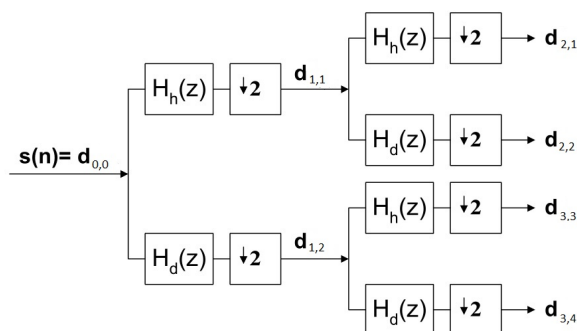
Na obr.1.2 je zobrazen tří úrovňový rozklad diskretní vlnkové transformace.



Obr. 1.2: Ukázka rozkladu diskretní vlnkové transformace

1.5 Paketová DTWT

Paketová DTWT je varianta transformace, u které je rozklad realizován úplným stromem. U paketové transformace se na každé úrovni rozkladu rozkládají oba bloky. Všechna kmitočtová pásma, na která se signál rozkládá, jsou stejně široká. Rozkladový strom může být i neúplný, podle volby uživatele, kdy v jedné úrovni může docházet k rozkladu detailů z bloku horní propusti a v jiné úrovni k rozkladu nedochází. Příklad rozkladu paketové DTWT je na obr. 1.3. Označení výstupních signálů je stejné jako u diskretní vlnkové transformace ($d_{x,y}$), kde x je úroveň rozkladu a y označení výstupního signálu. [4][6]



Obr. 1.3: Ukázka paketové DTWT se dvěma stupni rozkladu

1.6 Bázové funkce

Základním časově omezeným signálem tvořící podstatu bázové funkce je **mateřská vlnka** $\psi(t)$. Odvozují se z ní další vlnky podobné tvaru změnou měřítka a (dilatace) a posunutí b (translace). Báze je tvořena množinou funkcí $\psi_{a,b}(t)$ podle vztahu

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0, \quad (1.5)$$

kde člen $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ slouží k zachování energie při změně měřítka.

Vlastnosti vlnek

- **kompaktní nosič** - značí energii v čase lokalizovanou na konečné úseku
- **počet nulových bodů** - prvních n momentů vlnky jsou nulové. Vlnka je ortogonální až do stupně $n - 1$
- **symetrie** - zamezuje fázovému posunu mezi špičkou, singularitou, oscilací v signálu a příslušným projevem ve vlnkových koeficientech [13]

1.6.1 Druhy vlnek

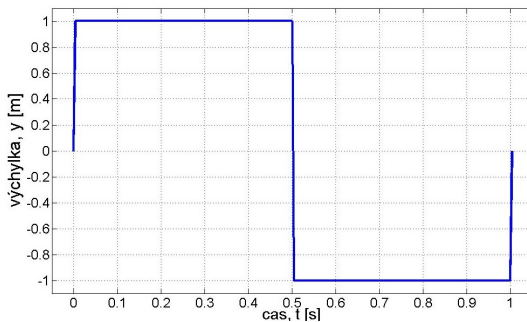
V dnešní době existuje velké množství mateřských vlnek. Vlnky jsou rozdělovány do rodin podle podobných vlastností, z čeho vychází i jejich možnosti použití. Rodiny vlnek lze ještě rozdělit do obecnějších kategorií. Kategorie mohou být např.: ortogonální, biortogonální, symetrická, asymetrická atd. [14]

- **Haar** - nejjednodušší a nejstarší vlnka, která ale neumožňuje hladkou rekonstrukci signálu. Průběh tvoří jedna perioda obdelníkového signálu s hodnotami ± 1 . Bývá často nazývána Daubechies řádu 1. Její výhodou je především rychlý výpočet, nevýhodou pak zejména nespojitost. Haarova vlnka je zobrazena na obr.1.4.

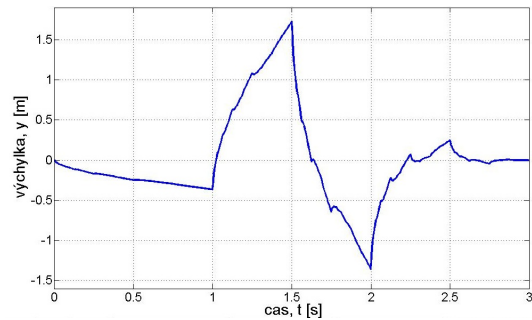
Vlastnosti - symetrická, ortogonální, biortogonální, vhodná pro CWT i DWT, má kompaktní nosič, jednoduchá a efektivní implementace.

- **Daubechies** - představují skupinu vlnek různého řádu s označením dbN , kde $N \geq 1$. Nemají explicitní vyjádření $\psi(x)$ kromě Daubechiesova řádu 1. Délka filtru je $2N$, kompaktní nosič má délku $2N - 1$ a počet nulových momentů je N . Příklad Daubechiesovy vlnky je na obr.1.5.

Vlastnosti - asymetrická (kromě prvního řádu), ortogonální, biortogonální, má kompaktní nosič, vhodná pro CWT i DWT.



Obr. 1.4: Haarova vlnka



Obr. 1.5: Daubechiesova vlnka 5. řádu

- **Symplety** - konstruovány jako Daubechiesové vlnky s označením $symN$, kde $N \geq 2$. Důraz je kladen na co největší symetrii. Délka filtru, počet nulových momentů i kompaktní nosič mají shodnou velikost jako u vlnek Daubechies. Příklad sympletu je na obr.1.6.

Vlastnosti - téměř symetrická, ortogonální, biortogonální, vhodná pro CWT i DWT, má kompaktní nosič.

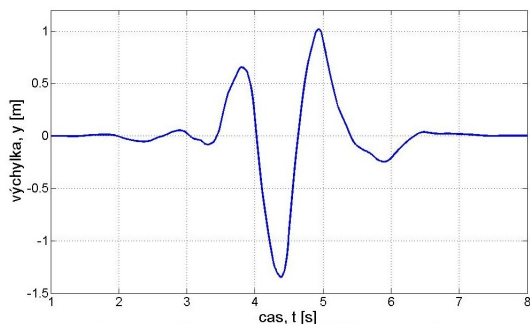
- **Coiflety** - konstruovány jako Daubechiesové vlnky s označením $coifN$, řád vlnky je v rozmezí $1 \leq N \leq 5$. Důraz je kladen na co největší počet nulových momentů. Délka filtru je $6N$, počet nulových momentů je $2N$ a délka kompaktního nosiče je $6N - 1$. Coiflet je zobrazen na obr.1.7.

Vlastnosti - asymetrická, má kompaktní nosič, ortogonální, biortogonální, vhodná pro CWT i DWT.

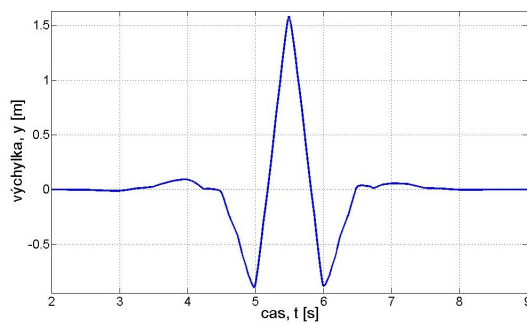
- **Meyer** - je definovaná jen ve frekvenční oblasti, v časové nemá vyjádření. Délka filtru je nekonečná, v diskrétním vyjádření je efektivní rozsah omezen. Meyerova vlnka je zobrazena na obr.1.8.

Vlastnosti - symetrická, ortogonální, nemá kompaktní nosič (používá se aproximace), vhodná pro CWT i DWT.

- **Morlet** - má tvar sinus modulovaného Gaussovým oknem. Dobře detekuje oscilace, ale není vhodná pro detekci osamocených singularit. Je schopná současné detekce amplitudy i fáze. Morletova vlnka je na obr.1.9.

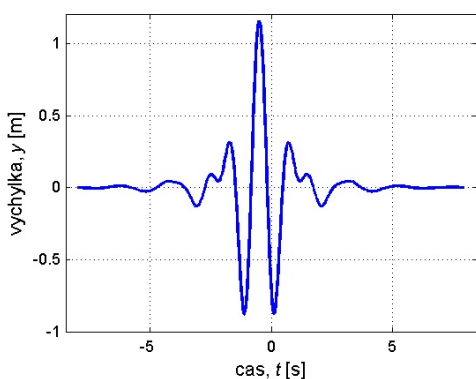


Obr. 1.6: Symplet 5. řádu

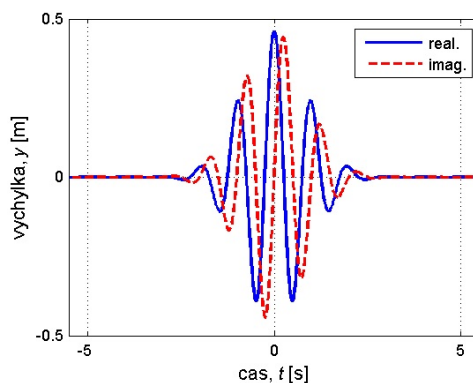


Obr. 1.7: Coiflet 2. řádu

Vlastnosti - symetrická, není ortogonální (nelze použít pro DWT), komplexní, nemá kompaktní nosič, vhodná pro CWT.



Obr. 1.8: Meyerova vlnka vlnka



Obr. 1.9: Morletova vlnka

- **Shannon** - jejím účelem je rozdělit frekvenční spektrum ostře přesně v polovině. Existuje reálná i komplexní varianta. Původně je definovaná ve frekvenční oblasti. V časové oblasti se vyjádří jako

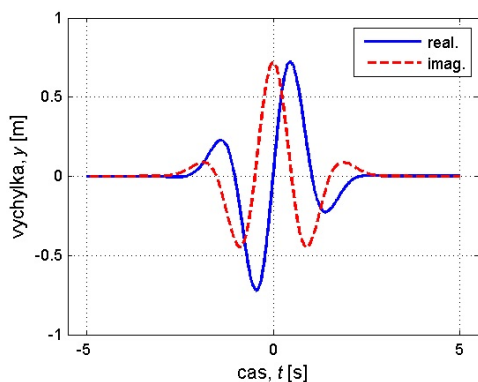
$$\psi(t) = 2 \operatorname{sinc}(2t) - \operatorname{sinc}(t). \quad (1.6)$$

Příklad Shannonovy vlnky je na obr.1.11.

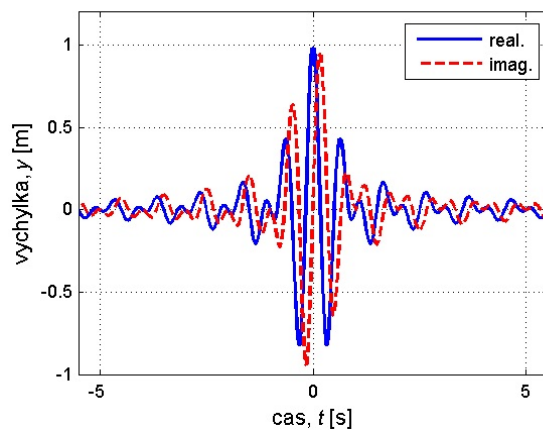
Vlastnosti - symetrická, nemá kompaktní nosič, lze použít pouze pro CWT

- **Gauss** - derivace hustoty pravděpodobnosti Gaussovy funkce. Do rodiny Gaussových vlnek náleží také vlnka Mexican Hat. Vlnka je zobrazena na obr.1.10
Vlastnosti - symetrická, pouze pro CWT, nemá kompaktní nosič
- **Mexican Hat** - náleží do Gaussových vlnek, které jsou tvořeny na základě Gaussova rozdělení. Má tvar druhé derivace Gaussova rozdělení. Má velmi dobrou rozlišovací schopnost v časové oblasti, ale malou rozlišovací schopnost ve frekvenční. Mexican Hat je na obr.1.12.

Vlastnosti - symetrická, nemá kompaktní nosič, není ortogonální (nelze použít pro DWT), vhodná pro CWT.



Obr. 1.10: Gaussova vlnka 3. řádu



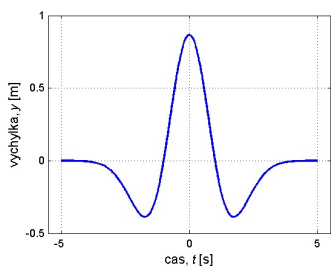
Obr. 1.11: Shannonova vlnka 1-1

- **Biortogonální spline** - nazývají se také Cohen-Daubechies-Feauveau (CDF). Jsou označovány $biorN_r.N_d$, kde N_r je řád pro rekonstrukci a N_d řád pro dekompozici. Délka filtru tvoří větší ze dvojice $2N_r$ a $2N_d$ rozšířený o 2. Kompaktní nosič má délku pro rekonstrukci $2N_r + 1$ a $2N_d + 1$ pro rozklad. vlnka je na obr.1.13.

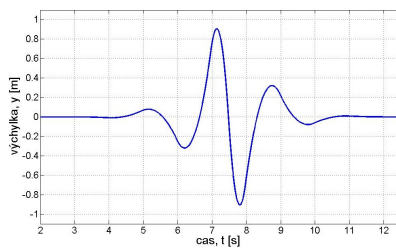
Vlastnosti - symetrická, biortogonální, má kompaktní nosič, vhodná pro CWT i DWT.

- **Reverzní biortogonální spline** - mají obdobné vlastnosti jako biortogonální spline vlnky. Označují se $rbioN_r.N_d$. Délka filtru tvoří větší ze dvojice $2N_r$ a $2N_d$ rozšířený o 2. Kompaktní nosič má délku pro rekonstrukci $2N_d + 1$ a $2N_r + 1$ pro rozklad. Příklad reverzni biortogonální vlnky je na obr.1.14.

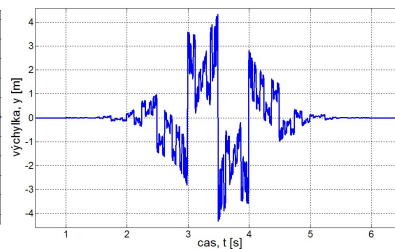
Vlastnosti - symetrická, biortogonální, má kompaktní nosič, vhodná pro CWT i DWT.[13][14]



Obr. 1.12: Vlnka Mexican hat



Obr. 1.13: Biortogonální spline 3.3 vlnka



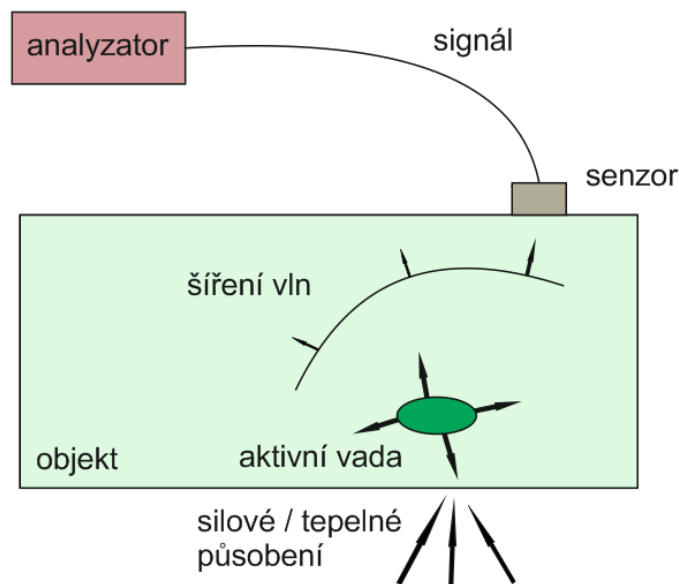
Obr. 1.14: Reverzní biortogonální spline 3.7 vlnka

2 AKUSTICKÁ EMISE

2.1 Základní princip akustické emise

Akustická emise je fyzikální jev, při němž dochází ke spontánnímu uvolnění energie v důsledku mechanickému či teplotnímu namáhání sledovaného materiálu. Pojmem akustická emise se rozumí i postup zahrnující metodu detekce AE, následně elektronické zpracování získaného signálu a výsledné hodnocení ze získaných dat. Metoda se nepoužívá jen k detekci jevů vyvolaných plastickou deformací, ale i k jiným procesům, kterými mohou být: narušování materiálů konstrukcí, netěsnost a úniky médií držených pod tlakem, tření, obrábění, svařování, různé typy výrobních postupů.[10]

Princip akustické emise je patrný z obr.2.1. Působením dynamických procesů se uvolňuje elastická energie v materiálu, která se šíří prostřednictvím elastických vln. Vlna se šíří do všech směrů stejnou rychlostí za předpokladu izotropního materiálu. Po dosáhnutí povrchu materiálu se vytvoří povrchová vlna. Kolmé složky vln k povrchu součástí vytvářejí napěťové vlny na povrchu, které je možné detekovat piezoelektrickými snímači akustické emise. Snímač převádí příchozí vlnění na elektrický signál, který je dále zesílen, filtrován, digitalizován a nakonec vyhodnocen v exportním AE systému. [3] [12]



Obr. 2.1: Schéma vzniku AE a detekce elastických vln v materiálu [3]

2.2 Událost Akustické emise

Fyzikálním jevem, který způsobuje AE, může být posun dislokace, vznik mikrotrhliny, šíření čela trhliny, fázové přeměny, třecí mechanismy a další. Tyto mechanismy vyvolávají dynamické rázy, jež označujeme jako událost AE. Ty mohou tvořit jednoduchou posloupnost (nespojité signál) a nebo překrývající se posloupnost (spojitý signál).

Nespojitá (praskavá) AE jsou to události, které jsou od sebe časově odděleny. Doba mezi těmito událostmi je v řádu milisekund až nanosekund. typickým příkladem nespojité AE je trhlina v materiálu, která se skokově mění.

Spojité AE je tvořena událostmi, které se nejsou časově odděleny. Většinou vznikají u fyzikálních jevů, kterými mohou být plastická deformace, únik kapalin, kavitace, atd.[12]

2.2.1 Parametry popisující událost AE

Parametry akustické emise nám udávají o jaký typ AE jde a kde se nachází. Parametry můžeme vybírat z časové oblasti, frekvenční oblasti nebo časově-frekvenční oblasti. Některé parametry jsou níže.

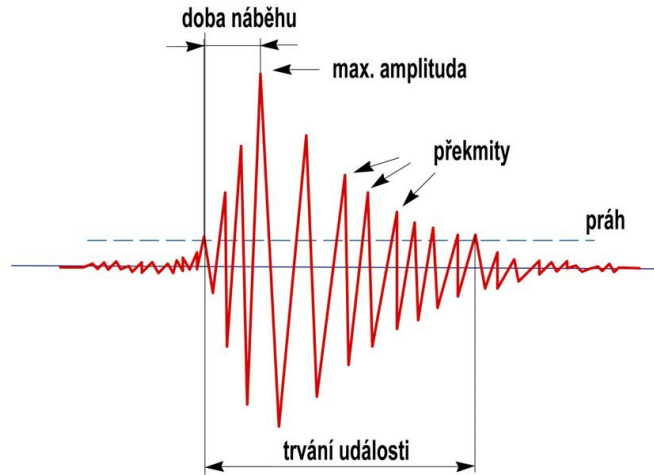
Parametry v časové oblasti

- *Práh* - nastavená hodnota, definuje začátek a konec jednotlivých emisních událostí.
- *Počet emisních překmitů* - udává počet kmitů přes nastavenou prahovou hodnotu.
- *Amplituda emisní události* - je maximální výchylka emisní události.
- *Doba náběhu* - čas mezi prvním překročením prahu a maximální výchylkou.
- *Průměrná frekvence* - poměr počtu emisních překmitů k času trvání emisní události.
- *Čas příchodu* - čas, kdy došlo k překročení prahové hodnoty.
- *časový rozdíl* - jde o časovou diferenci téže emisní události jiným snímačem.
- *Mrtvý čas* - určuje konec emisní události.[12]

Některé parametry z časové oblasti jsou zobrazeny na obr.2.2

Parametry ve frekvenční oblasti

- *Peak frequency f_{peak}* - je frekvence vrcholu.



Obr. 2.2: Událost s vybraný parametry AE z časové oblasti [8]

- *Frequency centroid [Hz]* - frekvence těžiště, která se vypočítá

$$f_{centroid} = \frac{\int f \cdot \tilde{U}(f) df}{\int \tilde{U}(f) df} \quad (2.1)$$

- *Weighted peak frequency [Hz]* - frekvence vrcholu, která se vypočítá

$$\langle f_{peak} \rangle = \sqrt{f_{peak} \cdot f_{centroid}} \quad (2.2)$$

- *Partial power 1-6 [%]* - energie pro pásmo od 0 kHz po 1200 kHz. Každé pásmo má velikost 150 kHz.

$$\frac{\int_{f_1}^{f_2} \hat{U}^2(f) df}{\int_{0kHz}^{1200kHz} \hat{U}^2(f) df} \quad (2.3)$$

- *Average frequency [Hz]* - průměrná frekvence, která se vypočítá

$$\langle f \rangle = \frac{N_{AE}}{t_{AE}}, \quad (2.4)$$

kde N_{AE} je prahová hodnota a t_{AE} je trvání události.

- *Reverberation frequency [Hz]* - je dozvuková frekvence vypočítá se

$$f_{rev} = \frac{N_{AE} - N_{peak}}{t_{AE} - t_{peak}}, \quad (2.5)$$

kde N_{peak} je prahová hodnota nejvyšší frekvence a t_{peak} je čas maximální amplitudy.

- *Initiation frequency [Hz]* - frekvence prvního překmitu, která se vypočítá [9]

$$f_{init} = \frac{N_{peak}}{t_{peak}}. \quad (2.6)$$

3 SHLUKOVÁ ANALÝZA

Shluková analýza (clusterová analýza) je statická metoda zabývající se vyšetřováním vícerozměrných objektů a jejich členěním do tříd (shluků). Snaží se uspořádat data do smysluplných struktur tak, že podobnost dvou objektů náležících do jedné skupiny je maximální, zatím co podobnost s objekty mimo tento shluk je minimální. Shlukováním je možné identifikovat spojitost mezi objekty bez jejich dalšího vysvětlení, nebo interpretace. Tedy, shluková analýza nachází strukturu mezi objekty bez vysvětlení, proč existují. Shlukovací metody se dělí podle cíle, ke kterému směřují na:

- *Hierarchické shlukování* nastává, pokud průnikem dvou podmnožin (shluků) je buď prázdná množina nebo jedna z nich. Hierarchické shlukování dělíme podle směru přístupu na *divizní* a *aglomerativní*. Divizní metoda vychází z celku, jednoho shluku, a ten dělíme. Aglomerativní vychází z jednotlivých objektů, shluků o jednom členu, a ty spojuje. Nevýhoda je, že se snaží v každém kroku dosáhnout pouze lokálně nejlepšího výsledku a nebere se ohledy na další postup.
- *Nehierarchické shlukování* tyto metody nevytvářejí hierarchickou strukturu, ale rozkládají danou množinu do podmnožin pomocí předem daného kritéria. První rozklad podmnožiny se dále nedělí. Upravuje se tak, aby se optimalizovala vzájemná vzdálenost a odlišnost shluků a aby objekty v nich byly rovnoměrně rozložené. Nevýhodou této metody je, že většinou končí pouze s lokálně optimalizovaným rozkladem.

3.1 Metody shlukování

- *metoda nejbližšího souseda (Simple linkage)* tato metoda vytváří shluk z objektů, nebo shluků, které mají mezi sebou nejmenší vzdálenost v porovnání s ostatními tříděnými objekty nebo shluky. Patří do hierarchických metod.
- *metoda nejvzdálenějšího souseda (Complete linkage)* je metoda, která oproti metodě Simple linkage bere nejvzdálenější body nebo shluky. Tato metoda patří stejně jako metoda nejbližšího souseda do hierarchických metod.
- *Centroidní metoda (Centroid linkage)* využívá euklidovskou metriku. Změří vzdálenosti těžišť shluků nebo objektů. Následně dojde ke sloučení shluků, které mají nejmenší vzdálenost mezi těžišti.
- *k-means* je metoda přiřazuje každý bod do shluků ke kterému je nejbližší. Na začátku se musí vybrat počáteční vzorové body. Body lze vybrat náhodně ze vstupní množiny objektů. Následně se berou jednotlivé objekty a přiřazují se k nejbližším vzorovým bodům.[5]

3.2 Normovací metody

Pro správné posouzení různých vstupních parametrů je nutné tyto vstupní údaje znormovat tak, aby byly porovnatelné jednotlivé vstupní vektory. Zásadní roli u shlukové analýzy tedy hrají normovací metody. Normovací metody používané u akustické emise jsou

- **var** - kvadratická odchylka hodnot je normalizována na hodnotu 0-1.
- **range** - hodnoty jsou normalizovány na interval 0-1.
- **log** - na hodnoty je aplikován přirozený logaritmus.
- **logistic** - hodnoty jsou transformovány pomocí logické funkce do intervalu $[0,1]$.
- **histD** - metoda ekvalizace histogramu, hodnoty jsou ve skále $[0,1]$.
- **histC** - aproximace ekvalizace histogramu pomocí linearizace hodnoty.[1]

3.3 Metody redukce dimenzí

Hledání vzdálenosti mezi jednotlivými daty ve mnohorozměrné oblasti je mnohdy výpočetně náročné a může vést k chybám. U shlukové analýzy se proto používají pro šesti a vícerozměrné oblasti dat redukční metody. U akustické emise se používají metody

- **Principal Component Analysis(PCA)** je rozšířená a poměrně jednoduchá metoda analýzy. Může být snadno použita pro dimenzionální redukci. Analýza hlavních komponentů je lineární transformace, která klade datové body do nového prostoru hlavních komponent. Počet těchto komponentů je stejný jako u původních proměnných. Mohou být chápány jako vektory v původním prostoru. Vektor z prvního komponentu má vždy směr maximální variability, tam je maximalizace problému. Další vektory jsou kolmé na všechny předešlé a variabilita je po nich postupně maximalizována. Vzhledem k tomu, že je lineární ortogonální transformace, jsou zachovány vzdálenosti a úhly mezi vstupními prvky. Komponenty jsou v pořadí sestupné variability, řada z nich může být tedy vynechána bez ztráty informací. Tímto způsobem je možné použít PCA jako metodu snížení dimenze.
- **Locally Linear Embedding(LLE)** je nelineární rozměrnost snížení na základě párových vzdálenostech sousedů. Je zaměřena na zachování lokální struktury datových bodů omezením na malý počet okolních bodů. LLE se snaží vytvořit nízko rozměrovou strukturu, která si ponechává lokální rozložení po-

zorovány v původním prostoru. To se provádí, zaprvé nalezením k sousedů pro každé datové body. Následně, je optimální váha matice W vytvořena minimalizací nákladové funkce. tato funkce vypočítá rekonstrukci chyby v původním prostoru. W obsahuje koeficienty pro každý bod, který popisuje vliv sousedů na jeho vlastní rekonstrukci. Nakonec, nákladová funkce je znovu minimalizována pro nové nízko rozměrové údaje a konstantní optimální W . Tímto způsobem je vzdálenost chyby mezi blízkými body minimální a jejich lokální struktura je rekonstruována. Tato metoda nebere v úvahu všechny možné vzdálenosti mezi body, tudíž se nesnaží udržet globální strukturu nebo tvar původních údajů.

- **Stochastic Neighbor Embedding (SNE)** používá pravděpodobnostní přístup. Pravděpodobnost těchto dvou bodů je založena na Gaussově rozdělení. To závisí exponenciálně na poměru rozdílů mezi dvěma body a součet všech ostatních rozdílů. SNE má nevýhodu vzhledem ke shlukové analýze. „Přitažlivé“ síly mají mezi všemi body nadvládu nad „odpudivými“, v důsledku toho, shluky, které existují v původním prostoru mají tendenci pohybovat se směrem k sobě, tento jev je také označován jako „shlukování problémů“. Tento problém je řešen metodou t-SNE, která nahrazuje Gaussovo rozdělení.
- **The method Laplacian Eigenmaps (LEM)** je založena na teorii grafů. To se přibližuje vysoko rozměrovým údajům podle grafu, kde jsou datové body blízko sebe spojeny okrajem. Kritérium spojování je buď na základě vzdálenosti nebo na n nejbližší sousedé se připojují. Po tom, váha je přiřazena ke každému okraji grafu. Váhová matice tvoří zastupující graf okraje podle váhy. Následně všeobecný vlastní vektorový problém je formulován pomocí váhy matice. Výsledné vlastní vektory se používají pro vkládání bodů v nízko rozměrové prostoru.[1][7]

4 REDUKCE ŠUMU POMOCÍ DWT

Redukce šumu je proces, který se pokouší odstranit šum ze signálu. Důležitou věcí při redukcí šumu je znalost charakteristiky šumu a typu signálu. Bez těchto znalostí není možné šum odstranit. Redukce šumu má široké uplatnění v mnoha oborech např. 1-D pro odstranění šumu v signálu nebo 2-D při redukcí šumu v obraze.

4.1 Prahování vlnkových koeficientů

Metod na redukcí šumu v signálu je spousta. Pro potlačení šumu v signálu Akustické emise byla vybrána metoda prahování vlnkových koeficientů. Tato metoda rozloží signál pomocí diskretní vlnkové transformace na koeficienty. Po rozložení je na koeficienty použito prahování (thresholding), které může být tvrdé (hard) či měkké (soft). Při obou typech prahování se koeficienty menší než je práh (λ) nahradí nulami. Velikost prahové hodnoty záleží jak na charakteru šumu tak i na použité vlnce.

Tvrdé prahování je nejjednodušší prahovací variantou s nízkou implementací náročnosti

$$\rho_{\lambda}^{hard}(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq \lambda \\ 0, & |x| < \lambda \end{cases} \quad (4.1)$$

U měkkého prahování se navíc ostatní koeficienty posunou o velikost prahu (λ) směrem k nule.

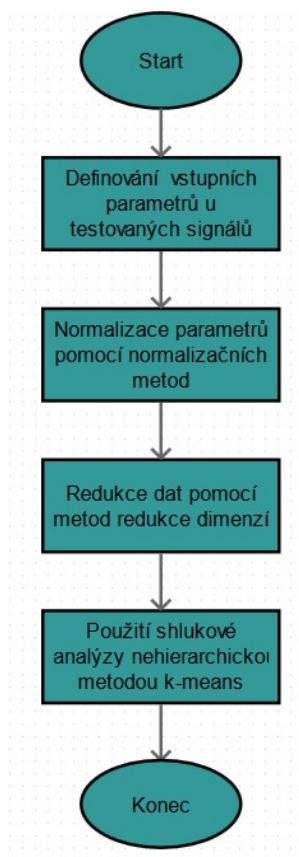
$$\rho_{\lambda}^{soft}(x) = \begin{cases} x - \lambda, & x \geq \lambda \\ x + \lambda, & x \leq -\lambda \\ 0, & |x| < \lambda \end{cases} \quad (4.2)$$

Kromě tvrdého a měkkého prahování máme ještě typy které využívají sofistikovanější postupy. Jsou to např. prahování poloměkké, hyperbolické a zobezněné.[14]

5 METODIKA VYHODNOCENI ROZLIŠITELNOSTI AE ZDROJŮ

5.1 Algoritmus shlukové analýzy pro rozlišení AE zdrojů

Na obr. 5.1 je vývojový diagram algoritmu pro výpočet shlukové analýzy. Nejprve je u zaznamenaných signálů definováno 23 vstupních parametrů, které jsou zaznamenány do tabulky. Poté jsou na tato data použity normalizační metody, které upraví velikost a střed. Po normalizaci byla vybrána data s vhodnými informacemi pomocí metod redukce dimenzí. Po redukci dat byla provedena shluková analýza a vypočtena vzdálenost jednotlivých shluků.



Obr. 5.1: Vývojový diagram shlukové analýzy v programu MATLAB

5.2 Metodika vyhodnocení

V rozlišení jednotlivých zdrojů akustické emise hraje klíčovou roli volba parametrů signálů akustické emise v časové, frekvenční a časově-frekvenční oblasti. Pro posouzení volby parametrů byla aplikována shluková analýza na soubor dat z experimentu s dvěma umělými zdroji AE. Při experimentu byly použity čtyři rezonanční AE senzory. Zaznamenáno bylo 4x32 signálů, kde prvních 8 bylo generováno laserem a zbylých 24 signálů bylo generováno zlomením tuhy. Celkový počet signálu je tedy 128.

Při testování bylo použito 23 parametrů. Podle svých vlastností jsou rozděleny do čtyřech oblastí - časová oblast, frekvenční oblast, časově-frekvenční oblast a oblast, kde byly použity všechny parametry.

Kvůli různým velikostem a jednotkám parametrů musely být použity **normovací metody**. Tyto metody upraví velikost jednotlivých parametrů a posunou jejich střed do intervalu od 0 do 1. V našem případě jsme měli šest normovacích metod var, log, logistic, range, histD a histC.

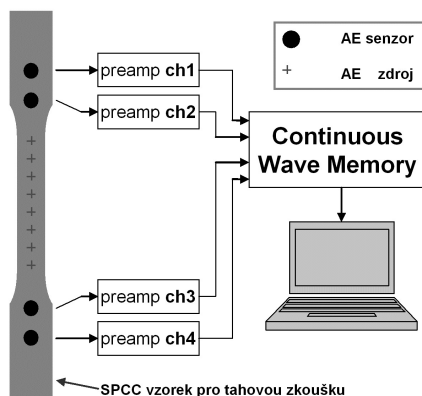
Při vícerozměrné oblasti mohou ve shlukové analýze vznikat chyby. Kvůli nim byly použity **redukční metody**, které vyberou jen potřebná data a nepotřebná zahodí. Metody, které byly použity při testování jsou PCA, LLE, t-SNE a LEM.

Pro výpočet shlukové analýzy byla vybrána metoda **k-means**. Tento nehierarchický algoritmus třídí data do shluků, na základě jejich vlastností. Pracuje tak, že každý bod přiřadí do shluku, kterému je nejbliž. Po každém přiřazení se znovu přepočítají těžiště zvětšených shluků. Po přiřazení všech bodů, jsou stávající těžiště výsledné vzorové body, přiřazování a přepočítání těžišť se provede znovu.[5]

5.3 Popis experimentu

Experiment byl proveden na vzorku z oceli, která byla válcovaná za studena. Celkové rozměry použitého vzorku byly 250x20x0.95 mm³. Ke generování události akustické emise byly použity dva umělé zdroje, zlomením tuhy (Hsu-Nielsenův zdroj), která představuje mechanické namáhání a laserovými impulzy, kde je namáhání tepelné. Události byly simulovány celkem na 8 místech, které jsou na obr. 5.2 označeny jako AE zdroj. Laserové impulzy byly emitovány pomocí Nd:YAG laseru s vlnovou délkou 532 nm (New Wave Research). Piezoelektrické rezonanční senzory (M304, Fuji Ceramics) ch1 až ch4 umístěné do jedné řady byly s povrchem vzorku spojeny pomocí dvousložkového lepidla. Signály ze sensorů byly předzesíleny o 20 dB a následně

vzorkovány s frekvencí 10 MHz 12-ti bitovým A/D převodníkem. Měřící systém (Continuous wave memory) sloužil k rozpoznávání jednotlivých emisních událostí pomocí napěťové úrovně 20 mV a ukládal tyto události o délce $200\ \mu\text{s}$ v digitalizované podobě do počítače. V počítači byla data filtrována pomocí Butterworthovi pásmové propustě 4-tého řádu s mezními frekvencemi 100 kHz a 2 MHz . Po filtraci byla data zpracována v prostředí MATLAB.[11]



Obr. 5.2: Schéma experimentálního pracoviště

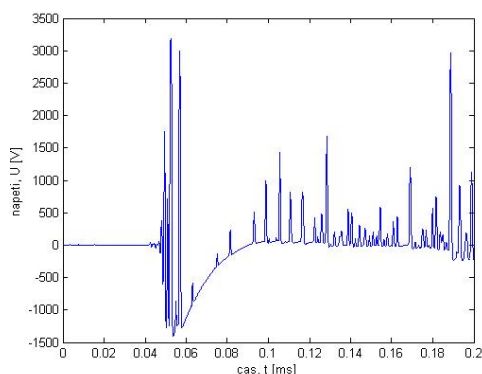
6 PARAMETRY AE UDÁLOSTI V ČASOVĚ FREKVENČNÍ OBLASTI

6.1 Vhodné mateřské vlnky

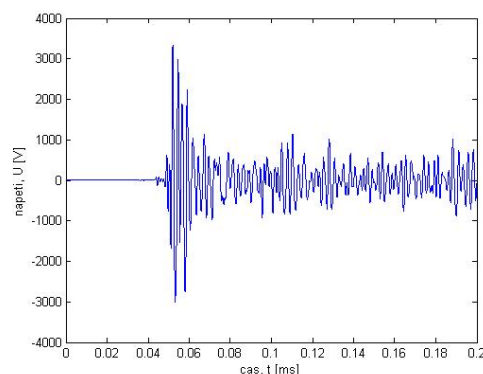
Ve **Spojité vlnkové transformaci** bylo vybíráno mezi čtyřmi mateřskými vlnkami - Gaborova vlnka, Morletova vlnka, Mexican Hat a Battle-Lemarie vlnka. Pro analýzu vyhovovaly dvě vlnky Morletova a Gaborova. Na obr. 6.1 je signál zlomení tuhy a na obr. 6.2 je signál laserový puls. Na obr. 6.3 až 6.10 vidíme, že pro Morletovu a Gaborovu vlnku jdou dobře vidět maxima, která jsou okolo 230 kHz pro zlomení tuhy a 450 kHz pro laser. U Mexican Hat a Battle-Lemairie vidíme, že není jednoznačné kde je maximum.

6.1.1 Parametry v časově-frekvenční oblasti

Použité parametry jsou frekvence globálního maxima a frekvence prvního lokálního maxima. Frekvence globálního maxima je největší frekvence v celém signálu. U Morletovy vlnky je to na obr. 6.4 okolo 450 kHz . Frekvence prvního lokálního maxima je první frekvence, která je větší nebo rovna deseti procentům maximální frekvence.



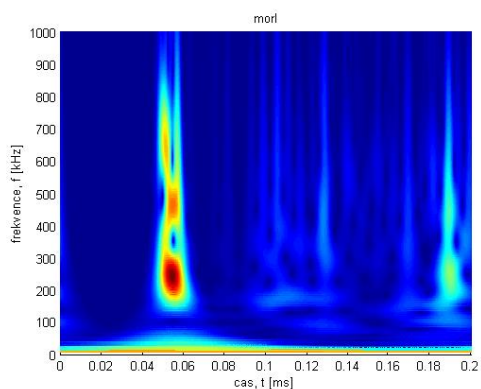
Obr. 6.1: Signál zlomení tuhy



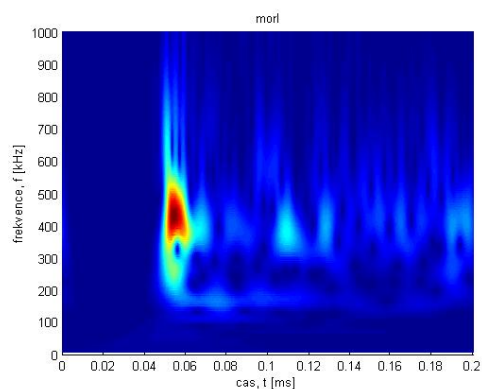
Obr. 6.2: Signál laserový puls

6.2 Definice použitých parametrů

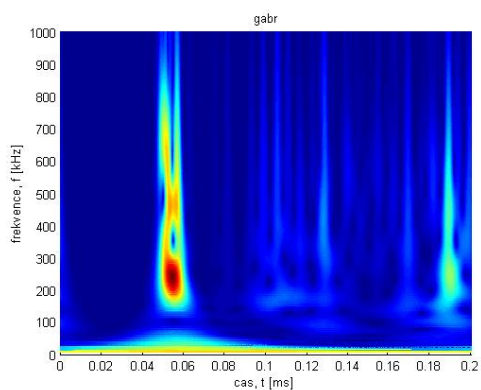
Vstupní parametry hrají klíčovou roli při identifikaci a lokalizaci události akustické emise. Parametry, které byly použity při testování jsou níže.



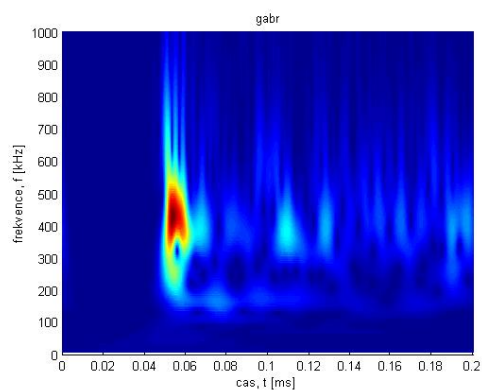
Obr. 6.3: Použití Morletovy vlnky na signál z obr.6.1



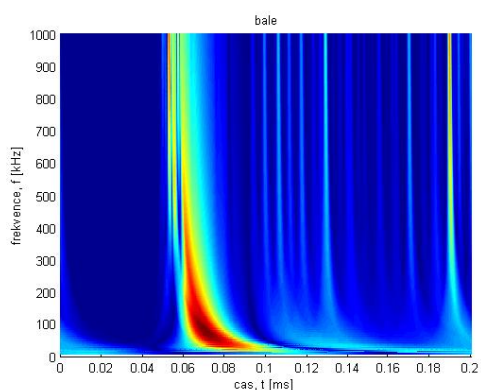
Obr. 6.4: Použití Morletovy vlnky na signál z obr.6.2



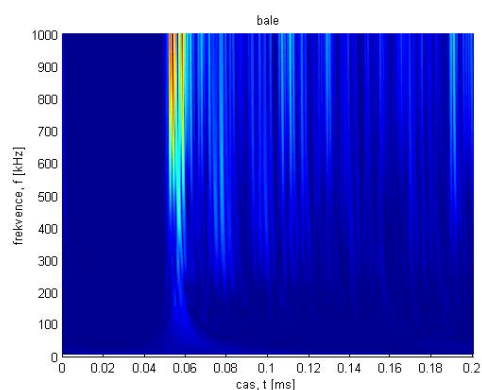
Obr. 6.5: Použití Gaborovy vlnky na signál z obr.6.1



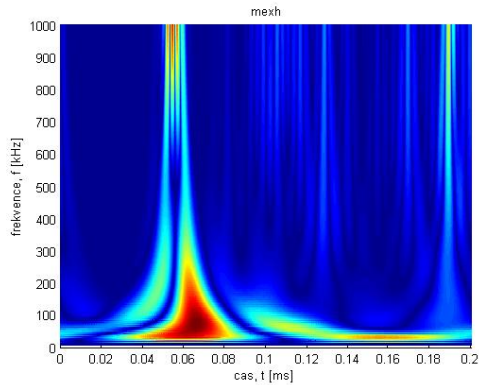
Obr. 6.6: Použití Gaborovy vlnky na signál z obr.6.2



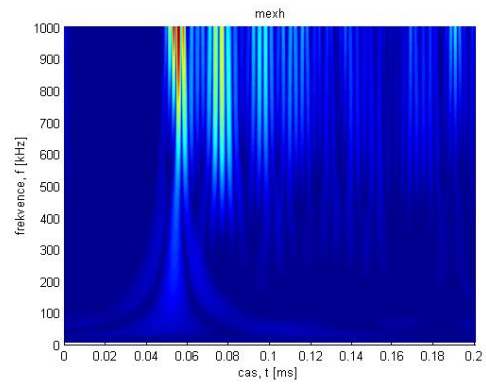
Obr. 6.7: Použití vlnky Battle-Lemarie na signál z obr.6.1



Obr. 6.8: Použití vlnky Battle-Lemarie na signál z obr.6.2



Obr. 6.9: Použití vlnky Mexican Hat na signál z obr.6.1



Obr. 6.10: Použití vlnky Mexican Hat na signál z obr.6.2

V časové oblasti se použili, následující parametry - maximální amplituda, trvání AE (*duration*), doba náběhu signálu (*rise time*), nástupní úhel (*rise angle*), velikost amplitudy prvního překmitu, časová četnost překmitů (*count*), prahová hodnota na vrcholu (*count to peak*), počet průchodů nulou, poměr hodnot počtu průchodů nulou a trvání AE, energie signálu nad úrovní, statický moment 3. řádu a statický moment 4. řádu.

U frekvenční oblasti se použili následující parametry - maximální amplituda ve frekvenční oblasti, frekvence odpovídající maximu ve frekvenční oblasti, frekvence těžiště FFT signálu, 6x energie pro pásmo od 10 *kHz* do 610 *kHz* po 100 *kHz*.

V časově-frekvenční oblasti byli, použity jenom dva vstupní parametry frekvence prvního peaku ve CWT a frekvence maximálního peaku v CWT.

6.3 Výsledky testování vstupních parametrů

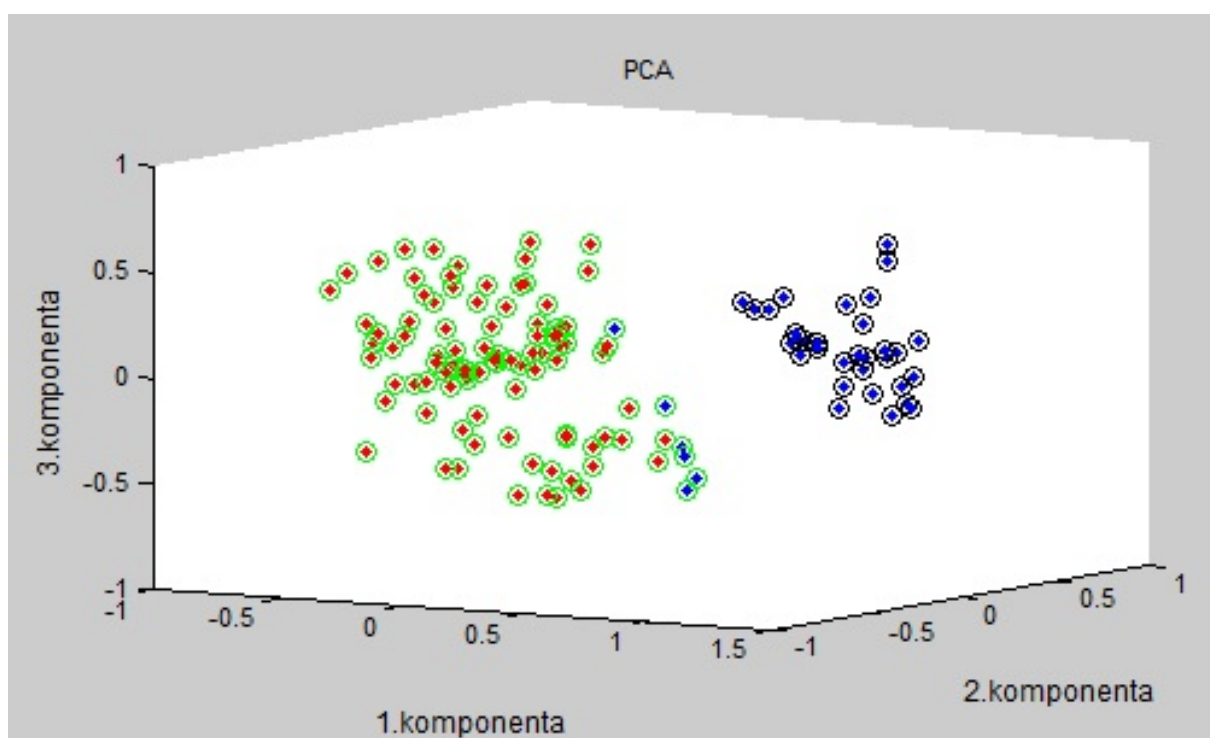
V tab. 6.1 jsou výsledky shlukové analýzy. Barevně jsou označeny hodnoty, které nejvíce vyhovují. Hodnoty jsou vybrány na základě toho, jak MATLAB vypočítal poměr vzdáleností nejbližších a nejvzdálenějších bodů a analýzy grafů, kdy se porovnávalo jestli výsledné vypočítané hodnoty programem MATLAB souhlasí s grafem, tedy jestli počet chybných bodů není příliš velký. Nulové hodnoty v tabulce značí, že příslušná metoda neprošla, protože nesplnila podmínku, že devadesát procent bodů musí být zařazeno do správného shluku, tedy chybovost musí být menší než deset procent. Nenulové hodnoty, v intervalu od 0 do 1, nám udávají vzdálenost shluků od sebe. Čím větší je hodnota, tím vzdálenější jsou shluky od sebe a tím docházíme k lepším výsledkům.

Z tabulky vidíme, že redukční metoda LEM (The method Laplacian Eigenmap) vyšla nejlépe. Nejhůře potom vyšla metoda LEE (Locally Linear Embedding), která nespĺnila u skoro žádné oblasti podmínku, že výsledné shluky se nesmí překrývat. Metoda PCA (Principal Component Analysis) a metoda t-SNE (Stochastic Neighbor Embedding) by se mohla také použít, ale nedosáhli by takového výsledku jako metoda LEM. Nejlepší hodnoty vycházeli při použití všech parametrů a použitím parametrů ve frekvenční oblasti.

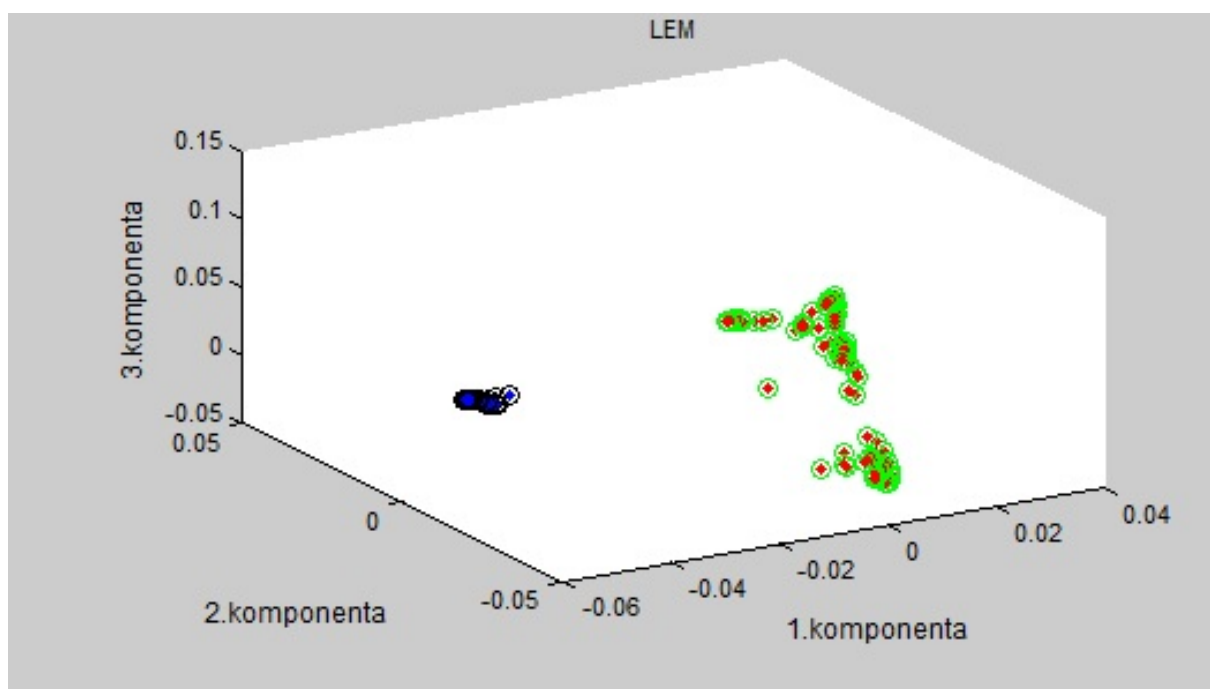
Redukční metody	PCA						t-SNE					
Normal. metody	histC	histD	var	range	logistic	log	histC	histD	var	range	logistic	log
všechny parametry	0,205	0,054	0,183	0,163	0,224	0	0,306	0,298	0,255	0,202	0,3	0
čas. oblast	0,179	0	0	0	0,156	0	0,158	0,118	0,048	0,062	0,081	0
frek. oblast	0,09	0,061	0,192	0,044	0,087	0	0,279	0,032	0,3	0	0,324	0
čas.-frek. oblast	0	0	0	0,154	0	0	0	0	0	0	0	0
Redukční metody	LLE						LEM					
Normal. metody	histC	histD	var	range	logistic	log	histC	histD	var	range	logistic	log
všechny parametry	0	0,055	0,069	0	0,021	0	0,428	0,498	0	0,404	0,595	0
čas. oblast	0	0	0	0	0	0	0,125	0,144	0,147	0,163	0,148	0,19
frek. oblast	0	0	0	0	0	0	0,448	0,507	0,651	0	0,324	0
čas.-frek. oblast	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 6.1: Výsledky shlukové analýzy pro jednotlivé metody

Na obr. 6.11 a obr. 6.12 vidíme redukční metody PCA a LEM s použitím parametrů ve frekvenční oblasti s normovací metodou histD. Barvy bodů v grafu udávají, jestli jde o signál zlomení tuhy nebo o laserový puls. Barevná kolečka okolo jednotlivých bodů značí, o který shluk jde. Pokud některé body nebyly správně zařazeny poznáme to podle toho, že barva kolečka nebude souhlasit s barvou bodu. Na příkladu z obr. 6.11 vidíme šest modrých bodů, které mají jiné kolečko než ostatní body se stejnou barvou. To nám značí, že jde o chybu.



Obr. 6.11: Shluková analýza s metodou PCA a *histD* pro frekvenční oblast

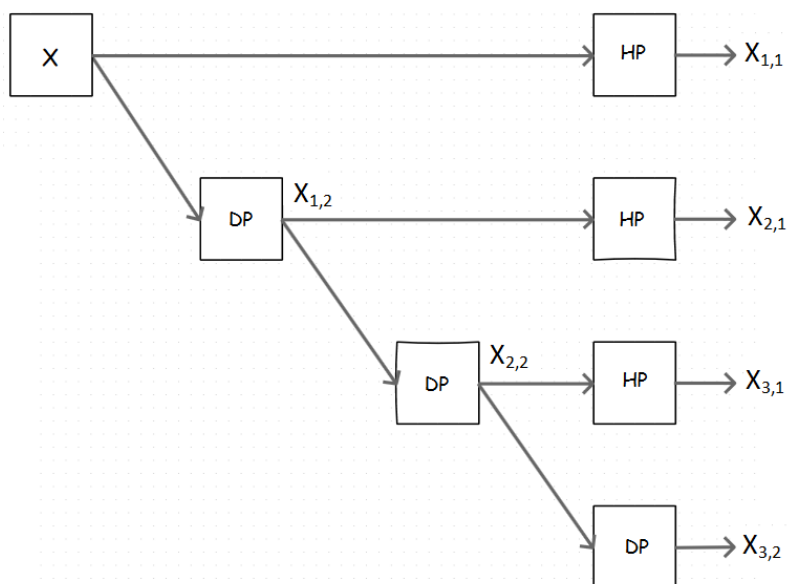


Obr. 6.12: Shluková analýza s metodou LEM a *histD* pro frekvenční oblast

7 APLIKACE DWT A WPT PRO CHARAKTERIZACI ZDROJŮ AE

Při analýze byly použity dva typy diskrétní vlnkové transformace. Prvním typem je diskrétní vlnková transformace s neúplným rozkladovým stromem, kde je rozkládáno vždy jen nízkofrekvenční pásmo. Druhým typem je diskrétní vlnková transformace s úplným rozkladovým stromem tzv. paketová vlnková transformace. U obou typů diskrétní vlnkové transformace byla použita třetí úroveň rozkladu. Testované vlnky byly vybírány z rodu Daubechies, Biortogonálních a Reverzní Biortogonálních vlnek.

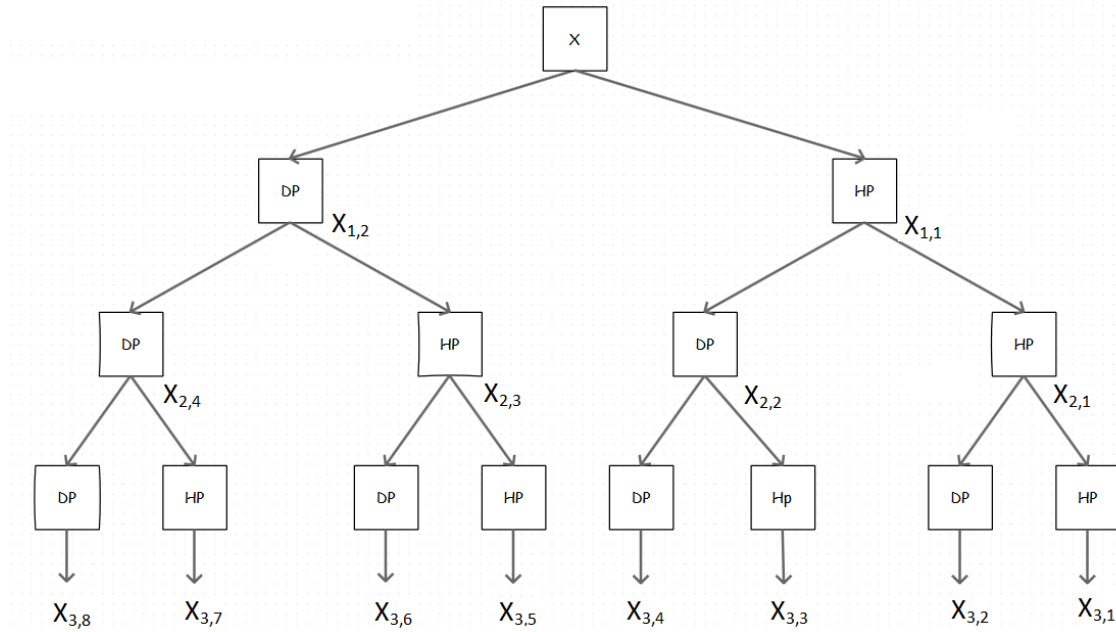
Diskrétní vlnková transformace s neúplným rozkladovým stromem dělí signál do dvou frekvenčních pásem vysokofrekvenční signál s detailními informacemi a nízkofrekvenční signál obsahující aproximační složku. Oba výstupní signály mají poloviční počet vzorků než signál vstupní. Při dalším dělení je vždy rozdělen nízkofrekvenční signál. Získáváme tedy $n + 1$ výstupních signálů, kde n je úroveň rozkladu. Dělení může být teoreticky nekonečné, ale při každém dělení mají výstupní signály poloviční počet dat než vstupní signál. Na obr. 7.1 je rozkladový strom diskrétní vlnkové transformace použitý při shlukové analýze, kde v rozkladovém stromu X označuje počáteční signál. První číslice v indexu označuje úroveň rozkladu a druhá označuje výstupní signál. DP a HP značí dolní a horní propust. Stejné označení je i u rozkladového stromu pro paketovou vlnkovou transformaci.



Obr. 7.1: Rozkladový strom DWT použitý při analýze

Paketová vlnková transformace rozkládá oba výstupní signály, jak nízkofrekvenční,

tak i vysokofrekvenční. Počet výstupních signálů je 2^n , kde n je úroveň rozkladu. Úplný rozkladový strom paketové vlnkové transformace použitý při analýze je na obr.7.2.



Obr. 7.2: Rozkladový strom WPT použitý při analýze

7.1 Popis metodiky testování jednotlivých vlnek

Pomocí DWT a WPT s vybranými vlnkami byly zaznamenané signály rozloženy do třetí úrovně rozkladu. Třetí úroveň rozkladu byla zvolena, protože v každé úrovni rozkladu je signál rozložen na dva signály (nízkofrekvenční signál s aproximační složkou a vysokofrekvenční signál s detailními informacemi) s polovičním počtem dat. U DWT při třetí úrovni rozkladu, připadá na jeden výstupní signál čtvrtina dat z celkového počtu dat před rozkladem a u WPT připadá jedna osmina dat na jeden výstupní signál. Pokud by byla zvolena vyšší úroveň rozkladu, výstupní signály by byly nevhodné pro další použití.

Po rozložení signálů bylo na každý z výstupních signálů aplikováno dvanáct vstupních parametrů akustické emise z časové oblasti. Dále byla data znormalizována šesti normalizačními metodami (var, log, logistic, range, histD a histC). Normalizační metody upravují velikost a měřítko kvůli rozdílným jednotkám a velikosti vstupních parametrů. Po normalizaci dat byly použity čtyři redukční metody (PCA,

LLE, LEM a t-SNE), které vybírají potřebná data a redundantní data zahazují. Poslední důležitou věcí před zhodnocením výsledků je roztřídit data do výsledných shluků. K tomu byla vybrána stejná metoda jako při analýze vstupních parametrů. Shlukovací metoda k-means byla použita jednotlivě na každé z výstupních frekvenčních pasem, i na všechny dohromady.

Výsledné hodnoty diskretní vlnkové transformace, pro nejvhodnější výstupní frekvenční pásmo jsou v tab. 7.4 a pro paketovou vlnkovou transformaci jsou v tab. 7.2. Ostatní tabulky pro jednotlivá výstupní frekvenční pásma jsou v příloze 1. Hodnoty získané při použití všech výstupních frekvenčních pasem, dohromady pro diskretní vlnkovou transformaci jsou v tab. 7.3 a pro paketovou vlnkovou transformaci v tab. 7.1.

7.2 Výsledky testování jednotlivých vlnek

V tabulkách jsou žlutě označeny vždy nejlepší hodnoty pro dané testování, červeně jsou potom označeny čtyři následující nejvyšší hodnoty. U diskretní vlnkové transformace došlo k lepším výsledku, při použití všech rozkladů dohromady, než-li u použití rozkladů zvlášť. Nejvíce vyhovující byla vlnka db3 (daubechies třetího řádu) s redukční metodou LEM a normovací metodou log. Vhodné vlnky by také byly bior2.2 (biortogonální spline vlnka 2.2), bior2.4, bior2.6 a rbio1.3 (reverzní biortogonální spline vlnka 1.3) s redukční metodou t-SNE a normovací metodou log. Paketová vlnková transformace by lépe vyhovovala při analýze, každého rozkladu zvlášť. Nejvyšší hodnoty dosáhla vlnka bior1.3 s redukční metodou LEM a normovací metodou HistC. Vhodná by také byla ta táž vlnka se stejnou redukční metodou LEM, ale s normovací metodou HistD.

Po porovnání všech výstupů s diskretní vlnkové transformace a paketové vlnkové transformace vyšlo, že nejvhodnější pro analýzu akustické emise je nízkofrekvenční pásmo ve třetí úrovni rozkladu. Z obou dvou testovaných diskretních vlnkových transformací vyšla lépe diskretní vlnková transformace s neúplným rozkladovým stromem a to v obou případech testování.

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0,0277	0,0384	0,0076	0,0450	0,0360	0,0337
	LLE	0,0246	0,0073	0,0142	0,0250	0,0243	0,0131
	LEM	0,0091	0,0131	0,0171	0,0183	0,0189	0,0138
	t-SNE	0,0319	0,0130	0,0484	0,0317	0,0141	0,0394

db2	PCA	0,0200	0,0272	0,0084	0,0468	0,0749	0,1041
	LLE	0,0101	0,0075	0,0390	0,0424	0,0173	0,0122
	LEM	0,0380	0,0697	0,3537	0,0670	0,0065	0,0229
	t-SNE	0,0174	0,1707	0,4697	0,0302	0,2360	0,2992
db3	PCA	0,0137	0,0780	0,0286	0,0354	0,0456	0,0777
	LLE	0,0165	0,0182	0,0069	0,0188	0,0209	0,0116
	LEM	0,0914	0,2975	0,7668	0,2975	0,1899	0,0486
	t-SNE	0,4031	0,3833	0,4663	0,4485	0,0110	0,2497
bior1.1	PCA	0,0277	0,0384	0,0076	0,0450	0,0360	0,0337
	LLE	0,0246	0,0065	0,0056	0,0253	0,0366	0,0133
	LEM	0,0091	0,0131	0,0171	0,0183	0,0189	0,0138
	t-SNE	0,0348	0,0176	0,0145	0,0200	0,0195	0,0136
bior1.3	PCA	0,0414	0,0342	0,0107	0,0661	0,0308	0,0506
	LLE	0,0114	0,0084	0,0123	0,0187	0,0202	0,0171
	LEM	0,0435	0,0372	0,0478	0,0037	0,0070	0,0226
	t-SNE	0,0168	0,0382	0,0814	0,0181	0,0190	0,0210
bior1.5	PCA	0,0269	0,0339	0,0076	0,0405	0,0358	0,0298
	LLE	0,0044	0,0069	0,0132	0,0147	0,0232	0,0276
	LEM	0,0103	0,0103	0,0158	0,0094	0,0203	0,0183
	t-SNE	0,0696	0,0136	0,0145	0,0123	0,0257	0,0206
bior2.2	PCA	0,0377	0,0771	0,0138	0,1302	0,0873	0,0285
	LLE	0,0280	0,0243	0,0084	0,0277	0,0289	0,0125
	LEM	0,0445	0,4928	0,0093	0,2453	0,0182	0,0474
	t-SNE	0,2589	0,4314	0,6760	0,5680	0,2182	0,1460
bior2.4	PCA	0,0268	0,0983	0,0180	0,0273	0,0736	0,0797
	LLE	0,0099	0,0031	0,0089	0,0042	0,0198	0,0166
	LEM	0,0584	0,1634	0,0536	0,3767	0,0528	0,1137
	t-SNE	0,0575	0,4581	0,6862	0,4769	0,2662	0,2342
bior2.6	PCA	0,0273	0,0933	0,0099	0,0410	0,0650	0,0247
	LLE	0,0090	0,0149	0,0154	0,0037	0,0192	0,0200
	LEM	0,2038	0,2970	0,1482	0,2760	0,0895	0,0516
	t-SNE	0,2129	0,5330	0,6155	0,5051	0,2494	0,1763
bior2.8	PCA	0,0534	0,1249	0,0100	0,0780	0,0408	0,0574
	LLE	0,0036	0,0325	0,0092	0,0065	0,0135	0,0309
	LEM	0,1924	0,4782	0,1693	0,5324	0,0662	0,0103
	t-SNE	0,4391	0,5933	0,5614	0,5280	0,3163	0,2618
rbio1.1	PCA	0,0277	0,0384	0,0076	0,0450	0,0360	0,0337
	LLE	0,0246	0,0064	0,0083	0,0253	0,0316	0,0130
	LEM	0,0091	0,0131	0,0171	0,0183	0,0189	0,0138

	t-SNE	0,0173	0,0173	0,0150	0,0182	0,0231	0,0180
rbio1.3	PCA	0,0177	0,0152	0,0241	0,0377	0,0326	0,0774
	LLE	0,0077	0,0086	0,0092	0,0288	0,0214	0,0298
	LEM	0,1172	0,0395	0,2710	0,1099	0,1024	0,1375
	t-SNE	0,0135	0,3047	0,6471	0,3602	0,0126	0,0198

Tab. 7.3: Shluková analýza všech výstupních signálů při použití DWT

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0,0933	0,0795	0	0,0814	0	0
	LLE	0,0419	0,1233	0	0	0	0
	LEM	0,2571	0,1769	0,3229	0,1243	0	0
	t-SNE	0,1090	0,1891	0	0,1800	0	0
db2	PCA	0,0504	0,1367	0,0176	0,0638	0	0
	LLE	0	0	0	0	0,0604	0
	LEM	0,1727	0,1362	0,3435	0,1530	0,0487	0
	t-SNE	0	0,0556	0,0658	0	0	0
db3	PCA	0,0876	0,0352	0	0,0227	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,7303	0,0856	0	0,0287	0	0
	t-SNE	0,0478	0	0	0,1446	0	0
bior1.1	PCA	0,0933	0,0795	0	0,0814	0	0
	LLE	0,0417	0,1207	0	0	0	0
	LEM	0,2571	0,1769	0,3229	0,1243	0	0
	t-SNE	0,2024	0,0324	0	0,1793	0	0
bior1.3	PCA	0,0815	0,0553	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,0481	0	0,1506	0	0	0,0358
	t-SNE	0	0,0581	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,0901	0	0	0,2152	0,0804	0,0336
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
	PCA	0,0820	0	0	0	0	0

bior2.2

	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,0686	0	0,2013	0	0,0794	0
	t-SNE	0	0	0	0	0,0899	0
bior2.4	PCA	0	0,0979	0,0131	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0,0550	0
	LEM	0,0849	0,1550	0,1634	0,1994	0	0
	t-SNE	0	0	0,0484	0	0	0
bior2.6	PCA	0,1012	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,3723	0,0991	0,1706	0,2339	0,3030	0,3925
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.8	PCA	0,0837	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,6107	0,2933	0,0984	0,6111	0,3691	0,3288
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0,0933	0,0795	0	0,0814	0	0
	LLE	0,0364	0,1239	0	0	0	0
	LEM	0,2571	0,1769	0,3229	0,1243	0	0
	t-SNE	0,1914	0,0915	0	0,1671	0,0451	0
rbio1.3	PCA	0,0494	0,0616	0	0,0661	0,0583	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,1318	0,1489	0,2447	0,0487	0	0,0510
	t-SNE	0,0525	0,0643	0	0,0485	0	0

Tab. 7.4: Shluková analýza při DWT pro signál $X_{3,2}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0,0165	0,0427	0,0114	0,0186	0,0146	0,0186
	LLE	0,0028	0,0033	0,0065	0,0130	0,0107	0,0132
	LEM	0,0083	0,0367	0,0208	0,0142	0,0017	0,0146
	t-SNE	0,0100	0,2903	0,0170	0,1913	0,0112	0,0089
bior1.1	PCA	0,0165	0,0427	0,0114	0,0186	0,0146	0,0186
	LLE	0,0027	0,0028	0,0085	0,0130	0,0107	0,0193
	LEM	0,0083	0,0367	0,0208	0,0142	0,0017	0,0146
	t-SNE	0,0539	0,2823	0,1238	0,1593	0,0114	0,0130
bior1.3	PCA	0,0287	0,0327	0,0077	0,0155	0,0164	0,0236
	LLE	0,0027	0,0113	0,0035	0,0047	0,0067	0,0112
	LEM	0,0064	0,0288	0,0365	0,0073	0,0072	0,0061
	t-SNE	0,0210	0,0037	0,0164	0,0117	0,0132	0,0107
bior1.5	PCA	0,0250	0,0204	0,0107	0,0121	0,0188	0,0267
	LLE	0,0056	0,0054	0,0036	0,0126	0,0075	0,0114
	LEM	0,0035	0,0033	0,0108	0,0040	0,0047	0,0117
	t-SNE	0,0140	0,0086	0,3302	0,0208	0,0133	0,0177
rbio1.1	PCA	0,0165	0,0427	0,0114	0,0186	0,0146	0,0186
	LLE	0,0027	0,0033	0,0064	0,0130	0,0107	0,0144
	LEM	0,0083	0,0367	0,0208	0,0142	0,0017	0,0146
	t-SNE	0,0107	0,2819	0,0175	0,1747	0,0116	0,0125

Tab. 7.1: Shluková analýza všech výstupních signálů při použití WPT

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0695	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0695	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0,5193	0,5340
	t-SNE	0,0542	0	0	0,0544	0	0,0614
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0991	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0695	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. 7.2: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,8}$

8 REDUKCE ŠUMU POMOCÍ DWT A VLIV NA SHLUKOVÁNÍ

Pro redukci šumu v signálu akustické emise byla vybrána metoda prahování vlnkových koeficientů. Důležitými parametry při metodě prahování vlnkových koeficientů je výběr typu prahování, zvolení vhodné vlnky a úroveň rozkladu diskretní vlnkové transformace. Vybráno bylo celkem 18 druhů vlnek vhodných pro diskretní vlnkovou transformaci. Po shlukové analýze bylo vybráno šest vlnek, které dosahovaly nejlepších výsledků. Vybrány byly následující vlnky - dvě biortogonální vlnky (bior3.5, bior3.9), dvě rodu daubechies (db8, db9), jedna rodu coifletů (coif3) a diskretní meyerova vlnka (dmey). Vybrané vlnky byly dále testovány.

8.1 Popis metodiky

Jako první bylo potřeba vytvořit signály s určitým šumem. K tomu byl vygenerován programem MATLAB bílý šum o určitých velikostech, který byl přidán do zaznamenaných signálů akustické emise. Následně byl šum potlačen metodou prahování vlnkových koeficientů. Byla zvolena čtvrtá úroveň rozkladu diskretní vlnkové transformace a pro prahování koeficientů bylo vybráno měkké (soft) prahování. Čtvrtá úroveň rozkladu byla zvolena na základě počtu výstupních dat. Větší úroveň rozkladu nebyla možná, kvůli malému počtu dat při dalším rozkladu. Typ prahování byl vybrán pomocí programu MATLAB funkcí *ddencmp*, která poskytuje výchozí hodnoty spojené s redukcí šumu, v signálu pomocí diskretní vlnkové transformace.

Po redukci šumu byla provedena shluková analýza metodou k-means s normalizační metodou *logistic* a redukční metodou LEM. Poslední věcí bylo určit chybu, která vznikla zavedením šumu a jeho redukcí. Chyba se vypočetla rozdílem mezi výslednou hodnotou kde šum zaveden nebyl a výslednou hodnotou shlukové analýzy u které byla zavedena určitá úroveň šumu. Hodnota bez šumu byla získána z předcházejícího testování parametrů akustické emise. Jedná se o hodnotu při použití stejných vstupních parametrů a stejné redukční a normalizační metody.

8.2 Výsledky testování jednotlivých vlnek

Výsledné hodnoty shlukové analýzy s redukční metodou LEM a normalizační metodou *logistic* pro všechny vlnky jsou v tab. 8.1. Žlutě je označeno šest vlnek s nejlepšími výsledky. Pro těchto šest vlnek byla následně vypočtena chyba odhadu

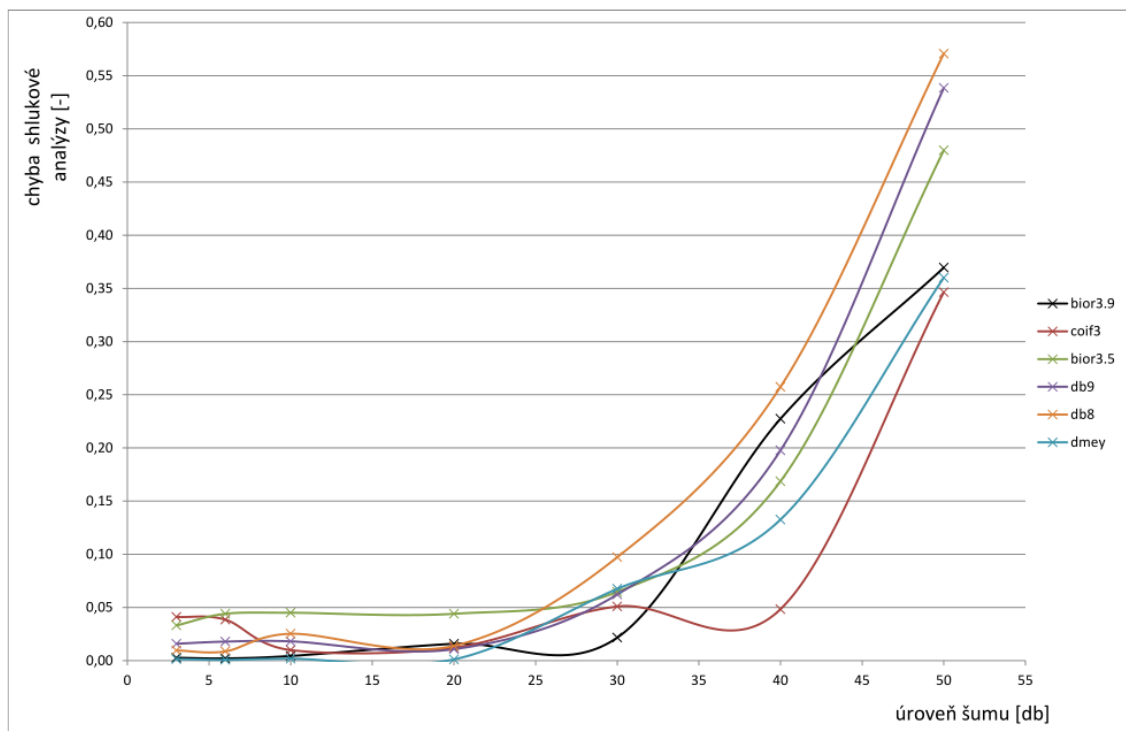
shlukové analýzy. Hodnoty byly zaznamenány v tab. 8.2. Z vybraných vlnek dosahovala nejlepších výsledků biortogonální spline vlnka 3.9 (bior3.9). Vlnka je v grafu 8.1 označena černou barvou a v tab.8.2 je vyznačena žlutou barvou. Po překročení 30 dB už vlnky dosahovaly velkých chyb kromě vlnky coiflet 3. řádu (coif3), která i při úrovni šumu 40 dB dosahovala pořád malé chyby. Vlnka je v grafu 8.1 a v tab. 8.2 znázorněna červenou barvou. Při nižší úrovni šumu byla lepší biortogonální spline vlnka 3.9 (bior3.9) a při vyšší vlnka coiflet 3. řádu (coif3).

Úroveň šumu [dB]	Typ vlnky					
	db3	db5	db7	db8	db9	db10
3	0,5569	0,3975	0,3931	0,6045	0,5791	0,4534
6	0,5538	0,3893	0,3949	0,6037	0,5772	0,4523
10	0,4395	0,4051	0,3854	0,6202	0,5769	0,4617
20	0,3566	0,5093	0,3838	0,6089	0,5843	0,4548
30	0,3697	0,5583	0,4292	0,4978	0,5328	0,3683
40	0,3014	0,3101	0,2993	0,3375	0,3972	0,3500
50	0,0900	0,2529	0,0000	0,0242	0,0565	0,1127
	sym4	sym6	sym8	coif1	coif3	ciof5
3	0,4379	0,3792	0,4090	0,4722	0,5539	0,3539
6	0,4767	0,3860	0,4185	0,4703	0,5565	0,3487
10	0,4528	0,3931	0,4207	0,0000	0,5851	0,3576
20	0,4154	0,5036	0,4555	0,4722	0,5828	0,3212
30	0,5041	0,3473	0,3346	0,4579	0,5441	0,3532
40	0,2355	0,1158	0,1144	0,3515	0,5466	0,4049
50	0,0000	0,0000	0,0000	0,1274	0,2485	0,0456
	bior2.2	bior2.4	bior2.8	bior3.5	bior3.9	dmey
3	0,5349	0,4936	0,5240	0,5619	0,5976	0,5964
6	0,4556	0,4968	0,5235	0,5510	0,5971	0,5943
10	0,5201	0,5025	0,5264	0,5500	0,5993	0,5932
20	0,4123	0,4844	0,5246	0,5510	0,5792	0,5961
30	0,4215	0,3110	0,6033	0,5303	0,5734	0,5275
40	0,1836	0,3299	0,4870	0,4263	0,3676	0,4624
50	0,1215	0,1004	0,1126	0,1152	0,2254	0,2349

Tab. 8.1: Všechny testované vlnky pro redukci šumu v AE signálu

Úroveň šumu [dB]	Typ vlnky					
	bior3.9	coif3	bior3.5	db10	dmey	db8
3	0,0026	0,0411	0,0331	0,0159	0,0014	0,0095
6	0,0021	0,0385	0,0440	0,5772	0,0007	0,0087
10	0,0043	0,0099	0,0450	0,5769	0,0018	0,0252
20	0,0158	0,0122	0,0440	0,5843	0,0011	0,0139
30	0,0216	0,0509	0,0647	0,5328	0,0675	0,0972
40	0,2274	0,0484	0,1687	0,3972	0,1326	0,2575
50	0,3696	0,3465	0,4798	0,0565	0,3601	0,5708

Tab. 8.2: Vybrané vlnky pro redukci šumu v AE signálu



Obr. 8.1: Graf závislosti šumu na chybě shlukové analýzy

9 ZÁVĚR

Cílem této práce je studium vlnkové transformace a její využití pro charakterizaci signálů akustické emise pro shlukovou analýzu. V práci jsem stručně shrnul dosavadní metody vlnkové transformace a stručně popsal akustickou emisi jako metodu pro nedestruktivní testování. Dále jsme popsal některé parametry v časové a frekvenční oblasti pro charakterizaci signálů akustické emise.

Nejdříve jsem se zaměřil na parametry, získané ze spojitě vlnkové transformace a otestoval je na základě dat, získaných pomocí dvou „umělých“ zdrojů AE. Jedná se o zdroje laserový puls a lom tuhou. Použity byly čtyři redukční metody PCA, t-SNE, LLE a LEM. Metody PCA a t-SNE dosahovaly dobrých výsledků, ale nejlepších výsledků dosahovala metoda LEM. U normalizačních metod nejhorší výsledky podávala metoda *log*, která neprošla ve skoro žádném z výpočtů kritériem chybovosti maximálně deset procent. Nejlepších hodnot bylo dosaženo při použití všech vstupních parametrů a při použití vstupních parametrů ve frekvenční oblasti. Při použití všech vstupních parametrů vyšla jako nejvhodnější metoda *logistic*. Pro frekvenční oblast dosahovala nejlepších hodnot normalizační metoda *var*. Pokud by jsme tedy použily všechny vstupní parametry byla by nejvhodnější redukční metoda LEM a normalizační metoda *logistic*. Parametry použité v časové a časově-frekvenční oblasti nedosahovaly takových výsledků, jako při použití všech vstupních parametrů a vstupních parametrů ve frekvenční oblasti.

V navazující bakalářské práci jsem se zaměřil na využití diskrétní vlnkové transformace pro nalezení vhodné mateřské vlnky, popisující signálové parametry akustické emise a na nalezení vhodné mateřské vlnky pro redukci šumu v signálu akustické emise pomocí metody prahování vlnkových koeficientů.

Pro nalezení vhodné mateřské vlnky popisující parametry akustické emise byly použity dva typy diskrétní vlnkové transformace. Prvním typem byla diskrétní vlnková transformace s neúplným rozkladovým stromem. V každé úrovni se rozkládala pouze nízkofrekvenční signál s aproximační složkou. Druhým typem byla diskrétní vlnková transformace s úplným rozkladovým stromem nazývaná také jako paketová vlnková transformace.

Pomocí DWT a WPT byl signál rozložen do třetí úrovně rozkladu. Z každého rozloženého signálu nám vznikly čtyři výstupní signály pro DWT a osm signálů pro WPT. U těchto signálů byly definovány vstupní parametry pro shlukovou analýzu.

Z testovaných vlnek, při použití všech výstupních signálů dohromady, byla pro diskrétní vlnkovou transformaci s neúplným rozkladovým stromem nejlepší vlnka Daubechies třetího řádu (db3) s redukční metodou LEM a normalizační metodou

log. Při analýze každého výstupu zvlášť byla také nejlepší vlnka Daubechies třetího řádu (db3) s redukční metodou LEM, ale s normalizační metodou *var*.

Pro paketovou vlnkovou transformaci, při analýze všech výstupních signálu dohromady, byla nejlepší Biortogonální spline 1.5 vlnka (bior1.5) s redukční metodou t-SNE a normalizační metodou *log*. Pokud byly výstupní signály analyzovány zvlášť, tak nejvhodnější vlnka byla Biortogonální spline 1.3 vlnka (bior1.3) s redukční metodou LEM a s normalizační metodou *histC*.

Při hledání vhodné vlnky, pro redukcí šumu v signálu akustické emise, byl do zaznamenaných signálů ze dvou umělých zdrojů přidán bílý šum o určitých velikostech generovaný programem MATLAB. Z těchto signálů byl následně šum odstraněn pomocí metody prahování vlnkových koeficientů. Po redukcí šumu byla provedena shluková analýza s redukční metodou LEM a normalizační metodou *logistic*. Po výpočtu shlukové analýzy byla vypočtena chyba oproti výsledkům, kde šum zaveden nebyl.

Testováno bylo celkem osmnáct typů vlnek. Z těchto vlnek bylo po shlukové analýze vybráno šest nejlepších, se kterými se dále pracovalo. U vybraných vlnek byla vypočtena chyba, která nám udávala, jak je vlnka vhodná pro redukcí šumu v signálu akustické emise. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu 8.1. Z vybraných vlnek vyšla nejlépe biortogonální spline vlnka 3.9 (bior3.9) pro nižší úroveň šumu a vlnka coiflet 3. řádu (coif3) pro vyšší úroveň šumu.

LITERATURA

- [1] Cséfalay, G. *Dimensionality reduction methods for classification of acoustic emission sources* [online]. 2011. Dostupné z URL: <<http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2011/sbornik/03-Doktorske%20projekty/05-Teoreticka%20elektrotechnika,%20fyzika%20a%20matematika/04-xcsefa00.pdf>>.
- [2] Hora, P. *Vlastnosti spojité waveletové transformace* [online]. 18.3.2001. Dostupné z URL: <http://www.cdm.cas.cz/publications/hora/ph_turb2000.pdf>.
- [3] Hort, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek* [online]. 2011. Dostupné z URL:
- [4] Kozumplík, J. *Vlnkové transformace a jejich využití pro filtraci signálů EKG* [online]. 2004. Dostupné z URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace.html>>.
- [5] Kučera, J. *Shluková analýza* [online]. [cit. 1. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://is.muni.cz/th/172767/fi_b/5739129/web/web/main.html>.
- [6] Loviška, D. *Detekce QRS Komplexu s využitím vlnkové transformace* [online]. 2010. Dostupné z URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace.html>>.
- [7] Meloun, M. Militký J. *Statistická analýza experimentálních dat - Statistical Analysis of Experimental Data*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [8] PREDITEST *Akustická emise obecně* [online]. Dostupné z URL: <http://www.preditest.cz/epe/download.php?m=content&i=353&f=akusticka_emise_obecne.pdf>.
- [9] Pattern Recognition Letters. *Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals*. 2012, volume 33. DOI: 10.1016/j.patrec.2011.09.018.
- [10] Scruby, C., B. *An introduction to accoustic emission. Journal of Physics E: Scientific Instruments.*, 1987, roč. 20, s 946-953. ISSN: 00223735
- [11] SEDLÁK, P.; ENOKI, M. *Lokalizační metoda akustické emise založena na Akaikeho informačním kritériu. Jemná mechanika a optika*, 2010, roč. 55, č.3, s. 82-84. ISSN: 0447- 6441.

- [12] Stein, P. *KATEGORIZACE SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE PŘI CYKLICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ DÍLCŮ* [online]. 2010. Dostupné z URL: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1173>.
- [13] Šmíd, R. *Úvod do vlnkové transformace* [online]. poslední aktualizace 11. 1. 2001 [cit. 2. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/smid/wavelets/wavelet-intro-html.html>>.
- [14] Valouch, L. *Implementace vlnkové transformace v jazyku C++* [online]. 2011. Dostupné z URL: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39485>.
<http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1572>.

A PŘÍLOHA 1

A.1 Výslední tabulky pro pro shlukovou analýzu při aplikaci DWT a WPT

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.4	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0

	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.6	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.8	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0,0666	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.1: Shluková analýza při DWT pro signál $X_{1,1}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0

	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.4	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.6	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.8	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0,0228	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.2: Shluková analýza při DWT pro signál $X_{2,1}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
db3	PCA	0,0313	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0,0870	0	0	0,1134	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0,0557	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.2	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.4	PCA	0,1367	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior2.6	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

bior2.8	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0888	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.3	PCA	0	0,2988	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,1313	0,0934	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.3: Shluková analýza při DWT pro signál $X_{3,1}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0,1106
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0,1106
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0,1106
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.4: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,7}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.5: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,6}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0603	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0,0433	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.6: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,5}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.7: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,4}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.8: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,3}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.9: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,2}$

Typ vlnky	Redukční metody	Normalizační metody					
		var	range	log	logistic	histD	histC
db1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.3	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
bior1.5	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0
rbio1.1	PCA	0	0	0	0	0	0
	LLE	0	0	0	0	0	0
	LEM	0	0	0	0	0	0
	t-SNE	0	0	0	0	0	0

Tab. A.10: Shluková analýza při WPT pro signál $X_{3,1}$