



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Ђорђе М. Дамњановић

ПРИМЕНА ТАЛАСИЋА НА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈУ АУДИО СИГНАЛА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2021.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Đorđe M. Damnjanović

APPLICATION OF WAVELETS TO DE- NOISING AND PARAMETERIZATION OF AUDIO SIGNALS

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2021.

Захвалница

Велику захвалност дугујем свом ментору, професору Дејану Ћирићу на указаном поверењу и стрпљењу које је имао током научног истраживања и креирања ове дисертације. Његови пријатељски савети и помоћ су били од великог значаја.

Захвалио бих се својим професорима код којих сам стицао неопходна знања као студент и као сарадник, а која су ми дала основ за реализацију истраживања и писања ове дисертације.

Највећу захвалност дугујем породици на подршци која није изостала ни у једном тренутку. Захвалан сам Богу на свему пруженом у животу.

Дисертацију посвећујем супрузи Милени, ћерци Татјани и једном малом бебицу.

*„Ново, ново,
најновије,
нови каријериста...“
Атомско склониште*

Аутор

Подаци о ментору и члановима комисије

ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ				
Број одлуке НСВ о именовању Комисије				
Датум именовања Комисије				
Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис	
1.		ментор		
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)		
2.				
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)		
3.				
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)		
4.				
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)		
5.				
	(Научна област)	(Установа у којој је запослен)		
Датум и место: _____ . године, Ниш				

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:

Проф. др Дејан Ћирић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Електронски факултет

Наслов:

Примена таласића на отклањање шума и параметризацију аудио сигнала

Резиме:

Методе за анализу сигнала се последњих неколико деценија све више и више развијају. Реализацијом нових и надгледњом већ постојећих алгоритама постижу се значајни резултати у обради сигнала, поготово ако се акценат стави на процес отклањања шума из сигнала или параметризацију. Велики број аналогних и дигиталних филтара је данас заступљен у многим научним областима, а техника обраде сигнала која је све више у употреби заснива се на таласићима. Декомпозиција таласића на коефицијенте детаља и апроксимације је техника која се све више примењује као метода за отклањање шума из сигнала, као и издвајање обележја из сигнала.

У овој дисертацији је приказана употреба таласића у процесу отклањања шума и смањењу негативних ефеката шума код синтетизованих и мерених импулсних одзива просторије, како у широкопојасној анализи, тако и у фреквенцијским опсезима октава и терци. Испитани су утицаји свих параметара таласића како би се дошло до оптималног скупа параметара који дају најбоље резултате. Сви резултати су посматрани под утицајем белог и розе шума на импулсни одзив просторије и криве опадања добијене из импулсних одзива просторије. Две мере које су коришћене за квантификацију остварених резултата употребе таласића су повећање динамичког опсега кривих опадања и смањење прага шума. Метода употребе таласића у процесу отклањања шума из импулсних одзива просторије је поређена са другим методама које се користе у овој области.

Одређивање места колена код кривих опадања добијених из импулсних одзива просторије је још једна метода обраде сигнала за коју је могуће употребити таласиће у поређењу са методама из литературе.

Значајан задатак када је реч о тек произведеним индустријским производима, као што су мотори једносмерне струје, је пронаћи процедуре и алгоритаме који ће омогућити одвојање мотора који у свом раду имају неку грешку од оних који је немају. Један од поступака се односи на примену таласића на аудио сигнале који садрже звук рада мотора. Методом декомпозиције таласића је могуће издвојити коефицијенте детаља који представљају аудио обележја и у којима се виде поменуте разлике између мотора. Остварени резултати су потврђени и уведеном нумеричком мером разлике коефицијената детаља на одређеним нивоима.

Научна област:

Електротехничко и рачунарско инжењерство (Телекомуникације)

Научна
дисциплина:

Обрада аудио сигнала

Кључне речи:

Таласићи, Коефицијенти детаља, Коефицијенти апроксимације, Импулсни одзиви просторије, Отклањање шума, Колено, Издвајање обележја.

УДК:

ЦЕРИФ
класификација:

T121 – Обрада сигнала

Тип лиценце
Креативне
заједнице:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

PhD Dejan Ćirić, full professor
University of Niš, Faculty of Electronic Engineering

Title:

Application of wavelets to de-noising and parameterization of audio signals

Abstract:

Methods for signals analysis have been developing more and more in last few decades. By discovering new ones or by upgrading the existing algorithms, results of signal processing have been significantly improved, especially if the emphasis is on the process of removing noise from the signal or signal parameterization. A number of analog and digital filters are present in many scientific fields nowadays, and a technique that is more and more in use is the one based on wavelets. Wavelet decomposition to its detail and approximation coefficients is the method that provides significant results in removing noise from the signal as well as in signal parameterization.

This thesis presents the results of applying wavelets for the reduction of noise and its negative effects in synthesized and measured room impulse responses. Analysis is done with signals in full frequency range (broadband signals) and signals filtered in octave and third-octave bands. Different sets of wavelet parameters are analyzed with the aim of finding the optimal set of parameters that will give the best results. White and pink noises are used in the whole research observing their influences on room impulse responses and energy decay curves generated from these responses. Two used measures that quantify the achieved results are the dynamic range improvement of the decay curves and noise floor reduction. Other standard methods for noise removal and reducing noise effects in room impulse responses are used for the purpose of comparison with results achieved with wavelets.

Besides the method of noise removal, wavelets have also found their place in the knee detection in energy decay curves obtained from room impulse responses. The obtained results are also compared with the standard methods from literature.

An important task when it comes to newly manufactured industrial products, such as direct current motors, is to find procedures and algorithms that will separate non-faulty and faulty motors. Method that can be used for this purpose is related to application of wavelets to audio signals containing sound generated by analyzed motors. The detail coefficients obtained by the wavelet decomposition process representing wavelet-based audio features may show the mentioned differences between motors at certain levels of decomposition. The achieved results are confirmed by applying the introduced numerical measure called feature difference of the detail coefficients at certain levels.

Scientific
Field:

Electrical and Computer Engineering (Telecommunications)

Scientific
Discipline:

Audio signal processing

Key Words:

Wavelets, Detail coefficients, Approximation coefficients, Room impulse responses, Noise removal, Knee, Feature extraction.

UDC:

CERIF
Classification:

T121 – Signal processing

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND

САДРЖАЈ

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА	v
СПИСАК СЛИКА	vii
СПИСАК ТАБЕЛА.....	xvii
1. УВОД.....	1
1.1. Предмет и циљ истраживања	2
1.2. Преглед научне литературе	4
1.3. Организација дисертације.....	7
2. УВОД У ТАЛАСИЋЕ	9
2.1. Фуријеова анализа	10
2.1.1. Краткотрајна Фуријеова трансформација	13
2.2. Дефиниција таласића.....	15
2.2.1. Континуална трансформација таласића.....	16
2.2.2. Дискретна трансформација таласића	17
2.3. Фамилије таласића.....	22
2.3.1. <i>Haar</i> таласић.....	23
2.3.2. <i>Daubechies</i> фамилија таласића.....	23
2.3.3. <i>Coiflets</i> фамилија таласића	24
2.3.4. <i>Symlets</i> фамилија таласића	25
2.3.5. Биортогонална фамилија таласића.....	26
2.3.6. Дискретни <i>Meyer</i> таласић.....	26
2.4. Примена таласића у процесу отклањања шума у сигналу	27
3. ИМПУЛСНИ ОДЗИВИ ПРОСТОРИЈЕ	32
3.1. Време реверберације и време почетног опадања	34

3.2. Енергетска крива опадања	35
3.3. Методе за смањење утицаја шума код кривих опадања генерисаних из импулсних одзива просторије	37
3.3.1. Место колена и одсецање импулсних одзива просторије за добијање кривих опадања	39
3.4. Врсте синтетизованих импулсних одзива просторије	40
4. МЕТОДЕ ЗА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА ПРИМЕНОМ ТАЛАСИЋА.....	42
4.1. Коришћене <i>Matlab</i> функције	43
4.2. Дефинисање параметара за приказ резултата.....	45
4.3. Примена таласића над широкопојасним импулсним одзивима за отклањање шума.....	48
4.3.1. Врсте шума	48
4.3.2. Испитивање утицаја промене параметара таласића примењених за отклањање шума код широкопојасних импулсних одзива просторије	50
4.3.3. Додавање розе шума синтетизованим импулсним одзивима.....	57
4.3.4. Ефекат промене нивоа шума.....	63
4.3.5. Ефекат промене фамилије таласића.....	65
4.3.6. Ефекат промене импулсног одзива просторије	71
4.4. Примена таласића над ускопојасним импулсним одзивима за отклањање шума. 73	
4.4.1. Октавни и терцни филтри	73
4.4.2. Дефинисање параметара за приказ резултата	74
4.4.3 Испитивање утицаја промене параметара таласића примењених за отклањање шума код ускопојасних импулсних одзива просторије	75
4.4.4. Синтетизовани ускопојасни импулсни одзиви са розе шумом	81
4.4.5. Испитивање ефеката промене нивоа декомпозиције и нивоа шума код примене таласића на различите врсте импулсних одзива просторије у опсегу октава и терци	86
4.4.6. Ефекат промене фамилије таласића.....	92

4.5. Поређење методе примене таласића са другим методама за смањење ефеката шума на криве опадања добијене из импулсних одзива просторије	95
4.6. Примена таласића на мерене импулсне одзиве за смањење утицаја шума	98
4.6.1. Утицај таласића на широкопојасне мерене импулсне одзиве	98
4.6.2. Утицај таласића на ускопојасне мерене импулсне одзиве.....	100
4.7. Дискусија резултата	103
5. ОДРЕЂИВАЊЕ КОЛЕНА У ИМПУЛСНИМ ОДЗИВИМА ПРОСТОРИЈЕ	104
5.1. Дефинисање параметара таласића за одређивање колена у импулсним одзивима просторије.....	105
5.1.1. Место колена на месту стрмог пада криве опадања.....	106
5.1.2. Место колена код стрмог пада криве опадања када се јавља међу-регион...	107
5.1.3. Место колена код стрмог пада криве опадања када се јавља више међу-региона	108
5.1.4. Место колена код стрмог пада криве опадања након места колена одређеног нелинеарним моделом опадања.....	109
5.1.5. Одређивање колена код других сигнала.....	110
5.2. Дискусија резултата	111
6. ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА АУДИО СИГНАЛА.....	112
6.1. Примењене методе	113
6.2. Резултати издвајања обележја	117
6.2.1. Издвајање обележја код читавих сигнала.....	117
6.2.2. Издвајање обележја код сегментираних сигнала.....	119
6.2.3. Ефекат промене врсте таласића.....	123
6.3. Специфични случајеви издвајања обележја.....	125
6.3.1. Јасне разлике између мотора снимљених у погону.....	125
6.3.2. Минималне разлике између мотора снимљених у погону.....	128
6.4. Испитивање сигнала мотора снимљених у лабораторији	131
6.4.1. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији	132

6.4.2. Минималне разлике између мотора снимљених у лабораторији.....	135
6.4.3. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији у коефицијентима деталја али са минималним разликама у спектру	138
6.4.4. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији на различитим деловима посматрајући коефицијенте деталја и спектре сигнала.....	141
6.4.4.1. Примена филтра пропусника опсега	144
6.5. Варијације између мотора са грешком и мотора без грешке	145
6.6. Дискусија резултата	147
7. ЗАКЉУЧАК.....	148
ЛИТЕРАТУРА.....	154
БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	165
ИЗЈАВЕ АУТОРА	166

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА

DWT – Discrete Wavelet Transform – дискретна трансформација таласића

ВФ – високопропусни филтар

НФ – нископропусни филтар

A – коефицијенти апроксимације

Д – коефицијенти детаља

A – Amplitude – амплитуда

LTI – Linear Time Invariant – линеарни временско инваријантни

dB – decibel – децибел

Hz – Herz – херц

рел. јединица – релативна јединица

t – time – време

s – second – секунда

MLS – Maximum Length Sequence – *MLS* техника за мерење импулсних одзива просторије

IRS – Inverse Repeated Sequence – *IRS* техника за мерење импулсних одзива просторије

ISM – Image Source Model – синтетизовани импулсни одзив просторије добијен *ISM* методом

ED – Exponential Decay – синтетизовани импулсни одзив просторије добијен *ED* методом

IIDC – Integrated Impulse Decay Curve – интеграљена крива опадања

L – Level – ниво

EDC – Energy Decay Curve – енергетска крива опадања

f – frequency – фреквенција

DR – Dynamic Range – динамички опсег

DL – Decomposition Level – ниво декомпозиције

DRI – Dynamic Range Improvement – повећање динамичког опсега

NFD – Noise Floor Difference – смањење прага шума

Sub-Trun-Corr – Subtraction-Truncation-Correction – одузимање-одсецање-корекција („Одузимање средње квадратне вредности шума, одсецање одзива и корекција одсецања“)

TT WD – Truncation Time Wavelet De-noising – време одсецања применом таласића

TT DM – Truncation Time Nonlinear Decay Model – време одсецања применом нелинеарног модела

D – Details – детаљи (ознака за коефицијенте детаља на сликама)

Fd – Feature differences – разлике између обележја

dl – decomposition level – ниво декомпозиције таласића

Fv – Features values – вредности обележја

ts – time segments – временски сегменти

BP – Bandpass filter – филтар пропусник опсега

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1. Константна резолуција у временско-фреквенцијској равни	14
Слика 2.2. Раван време-скала код таласића	17
Слика 2.3. Декомпозиција сигнала таласићима	19
Слика 2.4. Реконструкција сигнала таласићима.....	21
Слика 2.5. Декомпозиција сигнала таласићима у односу на фреквенцију сигнала.....	22
Слика 2.6. <i>Haar</i> таласић.....	23
Слика 2.7. <i>Daubechies 2</i> таласић	24
Слика 2.8. <i>Coiflet 3</i> таласић	25
Слика 2.9. <i>Symlet 2</i> таласић	25
Слика 2.10. Биортогонални таласићи: (а) <i>biorthogonal 2.8</i> , (б) <i>reverse biorthogonal 6.8</i> .	26
Слика 2.11. Дискретни <i>Meyer</i> таласић.....	27
Слика 2.12. Методе постављања прага са нивоом прага $T=0.5$: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага	29
Слика 3.1. Мерени импулсни одзив просторије у временском домену	33
Слика 3.2. Крива опадања импулног одзива просторије са Сlike 3.1: пуна линија у црној боји – оригиналан приказ; испрекидана линија у црвеној боји – приказ коришћењем команде <i>smooth</i>	35
Слика 3.3. Интеграљена крива опадања импулног одзива просторије са Сlike 3.1	36
Слика 3.4. Место колена код интеграљене криве опадања импулног одзива просторије са Сlike 3.3.....	39
Слика 4.1. Синусни сигнал у процесу отклањања шума: (а) сигнал без шума (б) сигнал са шумом (в) сигнал након употребе таласића.....	43
Слика 4.2. Рачунање повећања динамичког опсега као разлика између динамичких опсега кривих опадања са шумом пре и након употребе таласића	46
Слика 4.3. Блок дијаграм обраде импулсних одзива просторије применом таласића	47

Слика 4.4. Спектрална престава: (а) белог шума, (б) розе шума.....	49
Слика 4.5. Примена <i>Haar</i> таласића за отклањање шума код синтетизованог импулсног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара таласића при нивоу декомпозиције 1: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања	50
Слика 4.6. Ефекат промене правила избора прага (<i>sqtwolog</i> , <i>rigsure</i> , <i>heursure</i> , <i>minimaxi</i>) приликом примене <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са присутним белим шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 1: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага.....	51
Слика 4.7. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 2, 3, 4, 7) и различитих правила избора прага код примене <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) <i>sqtwolog</i> , (в) и (г) <i>rigsure</i> , (д) и (ђ) <i>heursure</i> , (е) и (ж) <i>minimaxi</i>	53
Слика 4.8. Разлике синтетизованог импулсног одзива просторије са белим шумом нивоа -50 dB у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене <i>Haar</i> таласића при нивоима декомпозиције: (а) 2, (б) 3, (в) 4, (г) 7.....	55
Слика 4.9. Ефекти на криве опадања примене <i>Haar</i> таласића за сва 4 правила избора прага са различитим нивоом декомпозиције (<i>sqtwolog</i> и ниво 2, <i>rigsure</i> и ниво 2, <i>heursure</i> и ниво 2, <i>minimaxi</i> и ниво 3) на синтетизовани импулсни одзив просторије са белим шумом нивоа -50 dB: (а) <i>one</i> ре-скалирање (б) <i>sln</i> ре-скалирање	56
Слика 4.10. Примена <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара, при нивоу декомпозиције 1: (а) временски домен иза колена, (б) фреквенцијски домен, в) криве опадања.....	57
Слика 4.11. Ефекат промене правила избора прага (<i>sqtwolog</i> , <i>rigsure</i> , <i>heursure</i> , <i>minimaxi</i>) код кривих опадања приликом примене <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 1 за: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага	58
Слика 4.12. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 10, 12, 14, 15) и различитих правила избора прага код примене <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB: (а), (в), (д) и (е) са	

финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi*..... 59

Слика 4.13. Разлике синтетизованог импулсног одзива просторије са розе шумом нивоа -50 dB у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 10, (б) 12, (в) 14, (г) 15 61

Слика 4.14. Ефекти промене правила избора прага са различитим нивоом декомпозиције (*sqtwolog* и ниво 12, *rigsure* и ниво 12, *heursure* и ниво 10, *minimaxi* и ниво 15) код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизован импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB: (а) *one* ре-скалирање (б) *sln* ре-скалирање..... 62

Слика 4.15. Ефекат промене нивоа белог шума код примене *Haar* таласића са оптималним скупом параметара на синтетизовани импулсни одзив у отклањању шума: (а) криве опадања и (г) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -40 dB; (б) криве опадања и (д) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -60 dB; (в) криве опадања и (ђ) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -70 dB 64

Слика 4.16. Ефекат промене нивоа розе шума код примене *Haar* таласића са оптималним скупом параметара на синтетизовани импулсни одзив у отклањању шума: (а) криве опадања и (г) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -70 dB; (б) криве опадања и (д) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -60 dB; (в) криве опадања и (ђ) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -40 dB 65

Слика 4.17. Ефекат примене различитих врста таласића: (а) *Daubechies* 2, (б) *Coiflet* 5, (в) *biorthogonal* 3.3, (г) дискретни *Meyer* на синтетизовани импулсни одзив просторије са белим шумом нивоа -50 dB, при чему су колонама приказани временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања, респективно 68

Слика 4.18. Ефекат примене различитих врста таласића: (а) *Daubechies* 2, (б) *Coiflet* 5, (в) *biorthogonal* 3.3, (г) *reverse biorthogonal* 1.1, на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB, при чему су колонама приказани временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања, респективно 70

Слика 4.19. Ефекат примене *Haar* таласића на различите врсте синтетизованих импулсних одзива просторије са белим шумом различитог нивоа; (а), (б) и (в) *ISM*

импульсни одзиви, (г), (д) и (ђ) *ED* импульсни одзиви са белим шумом нивоа: (а) -50 dB, (б) -60 dB, (в) -70 dB, (г) -50 dB, (д) -60 dB, (ђ) -70 dB 71

Слика 4.20. Ефекат примене *Haar* таласића на различите врсте импульсних одзива просторије са розе шумом различитог нивоа; (а), (б) и (в) *ISM* импульсни одзиви, (г), (д) и (ђ) *ED* импульсни одзиви са розе шумом нивоа: (а) -50 dB, (б) -60 dB, (в) -70 dB, (г) -50 dB, (д) -60 dB, (ђ) -70 dB 72

Слика 4.21. Примена *Haar* таласића за отклањање шума код синтетизованог импульсног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара таласића при нивоу декомпозиције 1 и терцног филтра централне фреквенције 1 kHz: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања 75

Слика 4.22. Ефекат промене правила избора прага (*sqtwolog*, *rigrsure*, *heursure*, *minimaxi*) приликом примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импульсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz применом нивоа декомпозиције 1 за: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага 77

Слика 4.23. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 3, 4, 5 и 6) и различитих правила избора прага код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импульсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigrsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi* 78

Слика 4.24. Разлике синтетизованог импульсног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 3, (б) 4, (в) 5 и (г) 6 80

Слика 4.25. Ефекат *one* и *sln* ре-скалирања код примене *Haar* таласића на синтетизовани импульсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz при нивоу декомпозиције 5: (а) *minimaxi* (б) *sqtwolog* 81

Слика 4.26. Примена *Haar* таласића (са иницијалним скупом параметара таласића) за отклањање шума код синтетизованог импульсног одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања 82

Слика 4.27. Ефекат промене правила избора прага (<i>sqtwolog</i> , <i>rigrsure</i> , <i>heursure</i> и <i>minimaxi</i>) приликом примене <i>Haar</i> таласића при нивоу декомпозиције 1 у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага	82
Слика 4.28. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 3, 4, 5 и 6) и различитих правила избора прага код примене <i>Haar</i> таласића у отклањању шума на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) <i>sqtwolog</i> , (в) и (г) <i>rigrsure</i> , (д) и (ђ) <i>heursure</i> , (е) и (ж) <i>minimaxi</i>	83
Слика 4.29. Разлике синтетизованог импулног одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене <i>Haar</i> таласића при нивоима декомпозиције: (а) 3, (б) 4, (в) 5 и (г) 6	85
Слика 4.30. Ефекат <i>one</i> и <i>sln</i> ре-скалирања применом <i>Haar</i> таласића и терцног филтра централне фреквенције 1 kHz на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 5 и <i>minimaxi</i> правила избора прага: (а) фино постављање прага (б) грубо постављање прага	86
Слика 4.31. Ефекат промене централне фреквенције октавних (прва колона) и терцних (друга колона) филтара на 10 врста синтетизованих импулсних одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB и -60 dB: (а) и (б) ниво декомпозиције, (в) и (г) повећање динамичког опсега, (д) и (ђ) смањење прага шума.....	88
Слика 4.32. Ефекат промене централне фреквенције октавних (прва колона) и терцних (друга колона) филтара на 10 врста синтетизованих импулсних одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB и -60 dB: (а) и (б) ниво декомпозиције, (в) и (г) повећање динамичког опсега, (д) и (ђ) смањење прага шума.....	89
Слика 4.33. Ефекат промене вредности амплитуда у времену белог шума нивоа -50 dB (прва врста) и -60 dB (друга врста) генерисаног у 10 понављања приликом примене <i>Haar</i> таласића на два синтетизована импулсна одзива просторије: (а) и (в) <i>ISM</i> . (б) и (г) <i>ED</i> , са поменутиим белим шумом у опсегу терце на 1 kHz	90

Слика 4.34. Ефекат промене вредности амплитуда у времену белог и розе шума нивоа - 50 dB генерисаног у 10 понављања приликом примене <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ISM</i> импулсни одзив просторије са поменутиим белим и розе шумом у опсегу терци на: (а) 125 Hz (б) 250 Hz (в) 500 Hz (г) 1 kHz (д) 2 kHz и (ђ) 4 kHz	91
Слика 4.35. Ефекат промене врсте таласића: (а) <i>Daubechies</i> 2, (б) <i>Daubechies</i> 15 и (в) <i>biorthogonal</i> 3.3 примењених на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz, при чему су у горњем реду приказани импулсни одзиви у временском домену, а у доњем реду криве опадања.....	94
Слика 4.36. Ефекат промене врсте таласића: (а) <i>Daubechies</i> 2, (б) <i>Daubechies</i> 15 и (в) <i>biorthogonal</i> 3.3 примењених на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz, при чему су у горњем реду приказани импулсни одзиви у временском домену, а у доњем реду криве опадања.....	94
Слика 4.37. Смањења ефеката шума применом три методе на ускопојасним синтетизованим импулсним одзивом просторије са додатим белим шумом нивоа -60 dB у опсегу терце централне фреквенције: (а) 250 Hz и (б) 2 kHz.....	96
Слика 4.38. Поређења три методе за смањење ефеката шума код кривих опадања, односно одређивања времена реверберације на основу ових кривих: (а) времена реверберације, (б) релативна грешка времена реверберације у процентима, (в) средња вредност релативне грешке времена реверберације у процентима.....	96
Слика 4.39. Ефекат промене таласића: (а) <i>Haar</i> , (б) <i>Daubechies</i> 2, (в) <i>biorthogonal</i> 1.5, на широкопојасни мерени импулсни одзив просторије, при чему су у првој врсти (горе) дате криве опадања, а у другој врсти (доле) спектри	100
Слика 4.40. Ефекат примене <i>Haar</i> таласића са оптималним скупом параметара на мерени импулсни одзив филтриран терцним филтром централне фреквенције: (а) 125 Hz, (б) 250 Hz, (в) 500 Hz и (г) 1 kHz.....	101
Слика 4.41. Ефекат промене врсте таласића: (а) <i>Daubechies</i> 4, (б) <i>biorthogonal</i> 1.1, (в) <i>biorthogonal</i> 3.3, код кривих опадања мереног импулсног одзива просторије у опсегу терце централне фреквенције 125 Hz.....	102
Слика 5.1. Одређивање колена импулног одзива просторије синтетизованог <i>ISM</i> методом у опсегу терце на 2 kHz применом <i>Haar</i> таласића: (а) импулсни одзиви у временском домену иза колена и (б) криве опадања.....	106

Слика 5.2. Одређивање колена применом <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ISM</i> импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 315 Hz, када се јавља стрми пад у кривој опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања.....	107
Слика 5.3. Одређивање колена применом <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ISM</i> импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 100 Hz када се јавља стрми пад и међу-регион у кривој опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања	108
Слика 5.4. Одређивање колена применом <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ISM</i> импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 315 Hz, када се јавља стрми пад и више међу-региона: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања.....	109
Слика 5.5. Одређивање колена применом <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ISM</i> импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 1.25 kHz, када се јавља стрми пад криве опадања након колена које је одређено нелинеарним моделом опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања	110
Слика 5.6. Одређивање колена применом <i>Haar</i> таласића на синтетизовани <i>ED</i> импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 100 Hz, када се јавља стрми пад у кривој опадања на месту колена: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања.....	111
Слика 6.1. Приказ поставке за снимање звука мотора једносмерне струје.....	114
Слика 6.2. Блок дијаграм обраде аудио сигнала мотора једносмерне струје.....	116
Слика 6.3. Аудио сигнали мотора једносмерне струје у смеру ротације 1 без грешке (плаво) и са грешком (црвено) у: (а) временском домену, (б) фреквенцијском домену	117
Слика 6.4. Апсолутне вредности коефицијената детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на цео сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8.....	118
Слика 6.5. Коефицијенти детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру	

ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената..... 121

Слика 6.6. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација биполарних вредности коефицијената детаља из сегмената 122

Слика 6.7. Средње квадратне вредности апсолутних вредности коефицијената детаља након примене (а) *Haar*, (б) *Symlet 8*, (в) *Coiflet 5*, (г) *biorthogonal 2.2*, (д) *reverse biorthogonal 1.5*, (ђ) дискретног *Meyer* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 4 124

Слика 6.8. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су изражене разлике између мотора..... 126

Слика 6.9. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су изражене разлике између мотора..... 127

Слика 6.10. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције 127

Слика 6.11. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су разлике између мотора минималне..... 129

Слика 6.12. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су разлике између мотора минималне..... 130

Слика 6.13. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције 130

Слика 6.14. Аудио сигнали мотора једносмерне струје снимљени у лабораторији у смеру ротације 1 без грешке (плава крива) и са грешком (црвена крива) у: (а) временском домену, (б) фреквенцијском домену	132
Слика 6.15. Коефицијенти детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су изражене разлике између мотора снимљених у лабораторији	133
Слика 6.16. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су изражене разлике између мотора снимљених у лабораторији.....	134
Слика 6.17. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције	134
Слика 6.18. Коефицијенти детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су разлике између мотора минималне.....	136
Слика 6.19. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су разлике између мотора минималне.....	137
Слика 6.20. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора са грешком и мотора без грешке по нивоима декомпозиције када су разлике између мотора минималне.....	137
Слика 6.21. Коефицијенти детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља у случају када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља	139
Слика 6.22. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља.....	140

Слика 6.23. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља	140
Слика 6.24. Коефицијенти детаља након примене <i>Daubechies 2</i> таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 2 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља у случају када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља	142
Слика 6.25. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 2 у случају када постоје разлике између мотора.....	143
Слика 6.26. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља	143
Слика 6.27. Средње квадратна вредност сегмената сигнала филтрираних пропусницима опсега када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља.....	145
Слика 6.28. Варијације између коефицијената детаља мотора са грешком (црвена крива) и 11 мотора без грешке (плаве криве) на нивоу декомпозиције: (а) 1, (б) 2	146
Слика 6.29. Варијације између коефицијената детаља мотора са грешком (црвена крива) и 11 мотора без грешке (плаве криве) на нивоу декомпозиције: (а) 3, (б) 4	146

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.7, где импулсни одзив садржи бели шум нивоа -50 dB.....	54
Табела 4.2. Приказ повећања динамичког опсега за све комбинације параметара таласића са Сlike 4.12 када се <i>Naar</i> таласић примени на синтетизовани импулсни одзив са розе шумом нивоа -50 dB.....	60
Табела 4.3. Приказ повећања динамичког опсега после примене таласића на импулсни одзив просторије када одзив садржи бели и розе шум нивоа -40 dB, -60 dB и -70 dB....	63
Табела 4.4. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића када импулсни одзив садржи бели и розе шум нивоа -50 dB.....	66
Табела 4.5. Централне фреквенције октавних и терцних филтара.....	74
Табела 4.6. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.23, где импулсни одзив садржи бели шум нивоа -50 dB и филтриран је терцним филтром централне фреквенције 1 kHz.....	79
Табела 4.7. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.28, где импулсни одзив у опсегу терце на 1 kHz садржи розе шум нивоа -50 dB.....	84
Табела 4.8. Повећање динамичког опсега синтетизованих импулсних одзива са додатим белим и розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz применом различитих врста таласића.....	92
Табела 4.9. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића на широкопојасни мерени импулсни одзив.....	99
Табела 4.10. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића на ускопојасни мерени импулсни одзив у опсегу терце на 125 Hz.....	102
Табела 6.1. Веза нивоа декомпозиције и фреквенцијских опсега коефицијената детаља.....	119

Табела 6.2. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.10.	127
Табела 6.3. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.13.	130
Табела 6.4. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.17.	134
Табела 6.5. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.20.	137
Табела 6.6. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.23.	140
Табела 6.7. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.26.	143

1. УВОД

Напредак алгоритама за обраду сигнала у последњих неколико деценија довео је до значајних резултата у разним областима. Многе стандардне методе које су постављене у науци давно, сада су само основа неких нових алгоритама или предмет теоретских разматрања. Све комплекснији захтеви анализе сигнала довели су до тога да се тежи ка усавршавању нових алгоритама како би се постигли што бољи резултати. Било да је реч о аудио или видео сигнаlima, многи алгоритми налазе и универзалну примену па је њихова заступљеност све већа и већа [1–4].

Један од основних проблема када је реч о аудио сигнаlima, односно говорним сигнаlima, представља шум. Готово да нема реалног сигнала на кога у мањој или већој мери не утиче нека врста шума. Овакви сигнали су посебно интересантни за анализу и обраду. Шум се може јавити у сигналу из разних разлога, као што су грешке и несавршености опреме за снимање, спољни негативни утицаји, несавршеност система за обраду и пренос и друго [5–7]. Када је реч о врстама шума које постоје у сигнаlima, ту се могу разматрања поставити на много нивоа. Две врсте шума које су доминантне у акустици су бели и розе шум [5–8].

Како би се утицај шума свео на минимум у сигналу, примењују се разне методе за отклањање шума из сигнала, као што су аналогни и дигитални филтри, филтри коначног импулсног одзива (енгл. *Finite Impulse Response – FIR*) и филтри бесконачног импулсног одзива (енгл. *Infinite Impulse Response – IIR*), оптимални и адаптивни филтри и други [1–3, 9–13]. Важно је такође напоменути да обрада сигнала поменутих филтрима не би била потпуна да се пре сваке обраде не изврши детаљна анализа сигнала, а то се и дан данас са великим успехом постиже Фуријеовом анализом и алгоритмима који су настали из основних Фуријеових алгоритама [11, 14].

Једна метода која се све више примењује и привлачи све већу пажњу последњих деценија је базирана на примени таласића (енгл. *Wavelets*). Настанак и примена таласића датира још са почетка 20. века како би се превазишли одређени проблеми у примени краткотрајне Фуријеове трансформације за решавање одређених проблема [15, 16]. Један од њих се односи на временску и фреквенцијску резолуцију [16]. Касније се

дошло до закључка да декомпозиција таласића на своје коефицијенте може да реши више проблема, пре свега у обради сигнала [17]. Данас је употреба таласића веома распрострањена, али се фокус највише ставља на обраду сигнала, отклањање шума из сигнала као и на издвајање обележја из сигнала и каснију класификацију.

Предност примене таласића у односу на неке друге алгоритме (пре свега Фуријеову трансформацију) навео је и аутора ове дисертације да се дубље посвети истраживањима везаним за таласиће и њихову употребу. Основна идеја примене таласића у обради сигнала је проистекла из чињенице да су се они врло мало користили у делу акустике просторија у контексту импулсних одзива просторије где је утицај шума од великог значаја и где ствара озбиљне проблеме. Иницијална истраживања су се бавила само смањењем утицаја шума код импулсних одзива просторије применом разних врста таласића, односно испитивањем утицаја параметара таласића на ефикасност њихове примене при генерисању енергетских кривих опадања. Како се истраживање ширило, одређени резултати су указали на вишеструке могућности примене таласића као што је одређивање места „колена криве опадања“ (енгл. *Knee*) и издвајања обележја из аудио сигнала. Издвајање обележја директно је везано за декомпозицију сигнала таласићима на коефицијенте детаља и апроксимације. Све поменуте примене таласића детаљно су презентоване у овој дисертацији.

За реализацију поменутих истраживања и обраду резултата коришћен је софтверски пакет *Matlab*, са одговарајућим додатним алатима.

1.1. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања ове дисертације се може поделити у три целине: отклањање шума применом таласића, одређивање колена криве опадања и издвајање обележја из аудио сигнала.

У првој целини, таласићи су употребљени као метода за отклањање шума из синтетизованих и мерених импулсних одзива просторије који у себи садрже шум (бели или розе шум код синтетизованих одзива, односно амбијенталну буку и електронски шум опреме код мерених одзива). У истраживању које се односи на ову целину, акценат је стављен на испитивање утицаја параметара таласића укључујући и врсту таласића. Различитом комбинацијом параметара остварени су различити резултати, па

је сходно томе главни задатак био пронаћи оптималан скуп параметара који ће у највећој мери отклонити шум из импулсних одзива просторије, а да се при томе деградација криве опадања сведе на минимум. Као мере које указују колико су скуп одабраних параметара и врста таласића утицали на процес отклањања шума, дефинисани су повећање динамичког опсега криве опадања и смањење прага шума одзива.

Приликом анализе примене таласића у отклањању шума из импулсних одзива просторије, дошло се до закључка да се исти поступак може надоградити у циљу проналажења места колена код кривих опадања. Под коленом се подразумева место где се секу реверберантно опадање криве опадања и ниво шума. Параметри таласића који се примењују за ову намену такође захтевају одређена испитивања како би се дошло до оптималних резултата. Наиме, и овде различите поставке параметара таласића доводе до различитих резултата, па је неопходно доћи до оптималног скупа параметара који води до најбољих резултата одређивања колена криве.

У трећој целини акценат је стављен на издвајање обележја из аудио сигнала који садрже звук генерисан приликом рада мотора једносмерне струје. Издвојена обележја, која су добијена методом декомпозиције сигнала таласићима на коефицијенте детаља и апроксимације, коришћена су ради упоредног приказа и детектовања одређених разлика између мотора који раде без грешке и мотора који имају неку грешку у свом раду. Како би резултати упоређивања били што валиднији, дефинисана је и мера разлике између обележја.

Циљ овог научног истраживања је испитивање капацитета примене аутоматизоване методе за отклањање шума код импулсних одзива просторија базиране на таласићима и побољшања квалитета импулсних одзива просторије. Такође, циљ је увести и нову методу за одређивање места колена код кривих опадања која може да парира стандардним методама у овој области које су представљене у литератури. Последњи циљ је везан за издвајање обележја из аудио сигнала применом таласића и њиховом припремом за каснију класификацију.

Сагледавајући описани предмет и појединачне циљеве истраживања ове дисертације, може се рећи да је генерални циљ истраживања испитивање могућности примене таласића за специфичну обраду акустичких сигнала (импулсних одзива

просторије) која се односи на отклањање шума и естимацију одређених параметара сигнала, као и издвајање параметара сигнала ради њихове анализе и класификације.

1.2. Преглед научне литературе

Ради успешног остваривања постављеног циља, велика број научно-истраживачких радова је прочитан и анализиран. Ако би се акценат ставио само на таласиће, постоји много радова на ту тему, чак и ако се избор ограничи на њихову употребу у процесу отклањања шума из сигнала или параметризацију.

Употреба филтара је широко распрострањена када је реч о обради сигнала [1–3, 9, 10, 12, 13, 18, 19]. Било да је реч о аудио сигнаlima (музици или говору), слици и другим сигнаlima, филтри се сматрају једном од неизоставних компоненти. Процес отклањања шума из сигнала јесте у већини случајева главни мотив, када су филтри у фокусу, али то не мора увек да буде тако. Филтри се могу у одређеној мери користити и за отклањање еха из аудио сигнала (говора), идентификацију непознатог система, контролу шума и др [1, 2, 10, 20–23]. Употреба таласића у поменутих сегментима обраде сигнала добија све већу примену.

Ако се таласићи разматрају са теоретског аспекта, главна литература за аутора ове дисертације била је књига професорке Десанке П. Радуновић [24], у којој су детаљно описани математички модели таласића. Неисцрпни извори информација везаних за таласиће такође се могу наћи у већини публикација које је објавио *David L. Donoho* (неке од кључних за ову дисертацију су [25, 26]), а једна публикација која се највише истиче и готово да се увек цитира у разним истраживањима названа је „*Ten Lectures of Wavelets*“ ауторке *Ingrid Daubechies* [27]. Не треба занемарити и друге ауторе, чија литература је са великим успехом увела аутора дисертације у свет таласића, а нека истраживања од њих су дата у [16, 28, 29].

Главни мотиви ове дисертације и одабира таласића су били ти што се таласићи у литератури не помињу када је реч о отклањању шума из импулсних одзива просторије и њихове одређене предности у односу на стандардне Фуријеове алгоритме. Управо у радовима [15, 28, 30] су описане предности таласића у односу на Фуријеову трансформацију и проблеми које су таласићи својом појавом решили. У раду [31] је показано како се декомпозиција таласића може употребити и за анализу сигнала, а не

само за обраду. Као што је поменуто генерално за филтре у обради сигнала, и таласићи се могу употребити у различитим областима на различите сигнале. На пример, у радовима [32, 33] примена таласића је приказана у областима биомедицинског инжењеринга, док се у раду [34] таласићи употребљавају у сензорима за отклањање шума из сигнала мале снаге. Доста радова се може пронаћи који описују употребу таласића у обради слике [35–37] и доста њих се везује за отклањање шума из слике. Ако је реч о обради говора (отклањању шума из говора, препознавању говора, отклањању еха и др.) такође таласићи заузимају високо место, а неке од употреба описане су у [38–41].

Ако се употреба таласића ограничи само на аудио сигнале, највећи број радова везан је за отклањање шума [42–44]. У раду означеном референцом [43], један од аутора је *Stephane Mallat*, чији су радови већ цитирани као литература за теоретске основе таласића. У том раду је употребљена комплексна форма таласића. Треба напоменути да у свим наведеним радовима аутори такође стављају акценат на израду аудио апликација које би аутоматизовале процес отклањања шума. И сам аутор ове дисертације је са групом аутора своја почетна истраживања везана за аудио сигнале и таласиће представио у раду [4] где су помоћу софтверских пакета *Matlab* и *LabVIEW* применом таласића отклањани шумови из аудио сигнала. На Едимбуршком Универзитету у Шкотској представљен је извештај пројекта под називом „*Performance and Comparative Analysis of Wavelet Transform in Denoising Audio Signal from Various Realistic Noise*“ који детаљно описује перформансе и анализу таласића у процесу отклањања шума из аудио сигнала [45].

Као специјална група акустичких (аудио) сигнала, у овој дисертацији употребљени су импулсни одзиви просторије код којих је анализиран утицај шума. Опис мерења и добијања ових сигнала детаљно је описан у стандарду ISO 3382 [46], а већина параметара и метода које се користе у обради импулсних одзива просторије могу се наћи у [5, 47–54]. Ако је акценат на отклањању шума из поменутих импулсних одзива просторије, таласићи готово да се не појављују у литератури. Сходно томе, објављен је одређен број радова у којима је један од аутора и аутор ове дисертације [55–59]. У свим радовима приказана су истраживања везана за декомпозицију и параметре таласића у процесу отклањања шума и детекцији места колена код синтетизованих и мерених импулсних одзива просторије, што је детаљно представљено у дисертацији.

Таласићи се такође са успехом могу користити и за неке друге намене, а једна од њих је параметризација сигнала, то јест издвајање обележја из сигнала и њихова припрема за даљу класификацију. И овде треба напоменути да се обележја применом таласића могу издвајати у различитим областима, из различитих врста сигнала. Тако, на пример, у раду [60] таласићи су употребљени у области биомедицинског инжењеринга, специјално за електромиографске сигнале или у раду [61] где је фокус на електрокардиограму. У раду [62] се детектује и издваја писак (енгл. *Wheeze*) који се јавља услед тегоба са респираторним системом, а сличан принцип је објашњен у [63].

Ако се посматрају аудио сигнали, треба издвојити извештај [64], где је аутор *Michelle Daniels* детаљно описао поступак коришћења таласића у издвајању обележја и класификацији. Поред наведеног извештаја, радови који детаљно приказују поменути методу су [65, 66], а генерални преглед анализе обележја у аудио сигнаlima је приказан у [67].

Доста радова је фокусирано на издвајање обележја из звука мотора и детекцију одређених грешака у њиховом раду и кварова. Постоје многе методе за издвајање обележја и класификацију, а када се то чини из звука мотора, онда таласићи заузимају значајно место. Научник *Adam Glowacz* је у радовима [68, 69] јасно показао да се таласићи могу употребити у анализи грешака у раду мотора једносмерне струје. У раду [70] акценат је на грешкама које изазива ротор мотора и њиховој детекцији, при чему је поред таласића употребљена и брза Фуријеова трансформација ради упоредног приказа резултата и што боље анализе. У поменутом раду [70] аутор истиче да је употреба таласића у процесу издвајања обележја веома једноставна, брза и лака метода. Поред поменутих радова, треба истаћи да је и аутор дисертације имао публикације на исту тему [71–73].

Поред таласића, односно издвајања обележја из звука мотора и каснију класификацију, за детекцију стања мотора користе се и друге методе у које спадају: мониторинг вибрација, анализа струје мотора (енгл. *Motor Current Signature Analysis – MCSA*), мониторинг електромагнетног поља, мерење температуре мотора, мерења заснована на *infrared* технологији [67, 74]. Машинско и дубоко учење [75, 76] је све популарнији приступ који се може употребити и овде, а у [77] се помиње да машинско учење често иде у комбинацији са неком другом техником за издвајање обележја, а то могу да буду таласићи.

Постоји још много радова који описују употребу таласића у процесу отклањања шума из сигнала и издвајању обележја, а за потребе краћег прегледа стања у литератури, овде је наведен само одређени број.

1.3. Организација дисертације

Дисертација је организована у 8 поглавља.

Прво поглавље садржи уводна разматрања и мотивацију аутора за истраживање таласића као методе за смањење утицаја шума из аудио сигнала, као и њихову употребу у процесу параметризације аудио сигнала. Представљен је преглед научне литературе која је аутору омогућила постављање основе како у теоретском, тако и у практичном делу дисертације.

У другом поглављу су представљене теоретске основе обраде сигнала кроз Фуријеову анализу као увод у теорију о таласићима. Акценат је стављен на предности које таласићи имају у односу на Фуријеове алгоритме. Описана је декомпозиција таласића на коефицијенте детаља и апроксимације као основ за њихову употребу у отклањању шума у сигнаlima и издвајању обележја из сигнала. Представљене су неке од основних фамилија таласића које су употребљене у овој дисертацији као и основни параметри таласића.

Када је реч о процесу отклањања шума из сигнала, импулсни одзиви просторије су били у фокусу у овој дисертацији. Треће поглавље описује, са аспекта теорије, основе импулсних одзива просторије као и врсте одзива коришћене у овој дисертацији, енергетске криве опадања које се добијају из импулсних одзива просторије, и стандардне методе за отклањање шума које се користе у литератури.

У четвртом поглављу детаљно су описани резултати анализе примене таласића у процесу отклањања шума из импулсних одзива просторије који садрже две врсте шума: бели и розе шум. Почетна анализа вршена је над широкопојасним синтетизованим импулсним одзивима просторије. Након тога применом филтара у опсегу октаве и терце, анализа је извршена над ускопојасним синтетизованим импулсним одзивима просторије. Коришћени су такође и мерени импулсни одзиви, чији су резултати након примене таласића приказани одмах иза синтетизованих импулсних одзива просторије.

Две мере које су коришћене за квантификацију постигнутих резултата у овом поглављу су повећање динамичког опсега кривих опадања и смањење прага шума одзива. На крају су дата поређења између стандардних метода за отклањање шума и методе базиране на таласићима.

Један од битних аспеката обраде импулсних одзива просторије и добијања кривих опадања везана је за одређивање места колена кривих. Процес отклањања шума одзива применом таласића је показао да је могуће користити таласиће и за одређивање места колена кривих. Резултати ове анализе приказани су у петом поглављу.

Шесто поглавље приказује резултате примене таласића за издвајање обележја из аудио сигнала мотора једносмерне струје. Анализирани примери су показали да обележја која се везују за коефицијенте детаља могу дати значајне разлике између мотора без грешке и мотора који имају неку грешку у свом раду. Анализирани су мотори чији је рад сниман у погону фабрике и лабораторијским условима. Уведена је мера која је названа мера разлике између обележја, која ближе указује на конкретне или минималне разлике између анализираних мотора.

У седмом поглављу дат је закључак целокупног истраживања и приказаних резултата, представљен је допринос дисертације научној заједници као и смернице за даља истраживања.

2. УВОД У ТАЛАСИЋЕ

Појам таласића датира још из 1909. године када је мађарски математичар *Alfred Haar* увео појам таласића кроз теорију ортогоналних функција из којих је настала прва фамилија таласића под називом *Haar* [16, 78]. Сагледавајући годину настанка, може се рећи да је прошло и више од 100 година када су таласићи први пут поменути након функција које су у математичком смислу тада биле постављене као основ за обраду сигнала. Наиме, француски математичар *Joseph Fourier* је још 1807. године је објавио Фуријеове редове који су и данас основ за обраду сигнала [16]. Развијањем Фуријеових алгоритама деценијама касније настали су многи нови алгоритми који су и дан данас у широкој употреби. На пример, један од њих је Брза Фуријеова трансформација (енгл. *Fast Fourier Transform – FFT*) која је настала знатно касније (1965. године), чији алгоритми су готово незаменљиви у креирању разних „подлога“ за обраду сигнала [79].

Међутим, многи алгоритми који се заснивају на Фуријеовој трансформацији нису успели да реше одређене проблеме, поготово ако се ради о обради нестационарних сигнала. Првенствено из тих разлога настали су алгоритми који ће те проблеме решити, а таласићи су једни од њих [15, 28, 30] који су и предмет истраживања овог рада.

Сам назив таласић је утврђен доста касније од стране научника *Alexander Grossmann*-а и *Jean Morlet*-а 80-тих година прошлог века [24]. Поред њих многи научници су деценијама уназад изучавали таласиће креирајући потпуно нове алгоритме за различите намене. Неки од њих су *Stephane Mallat*, *Yves Meyer*, *Ingrid Daubechies*, *Ronald Raphael Coifman*, *Ronald A. DeVore* и други [24]. Већина таласића је и добила име по научницима који су их открили док постоји и група таласића који су настали као надградња на већ постојеће таласиће [15, 16].

Таласићи су данас готово незаменљиви у многим областима и даље су предмет истраживања и усавршавања. Као што је већ поменуто највећу примену су нашли у обради сигнала, али су такође доста заступљени и у математици, телекомуникацијама, биомедицинском инжењерингу, акустици [4, 16, 17, 29, 32, 33, 80], па и у наукама које нису инжењерске, као што су економија и финансије [81]. Њихова употреба је доста

развијена за отклањање шума из сигнала (било да се ради о звучном сигналу, говору, слици или неком другом) и за анализу поменутих сигнала, одређивање и стабилизацију фокуса у видео сигнаlima, детекцију покрета и праћење објеката у видео сигналу, базичне модулације код телекомуникационог преноса, математичку анализу, компресију слике и аудио сигнала, издвајање обележја и класификацију, препознавање говора, идентификацију система и за многе друге намене [16, 17, 40, 60, 62, 64, 80, 82, 83].

2.1. Фуријеова анализа

Један од основних метода у проучавању сигнала јесте представљање сигнала његовим фреквенцијским садржајем. За једну одређену групу сигнала може се применити декомпозиција на фреквенцијске компоненте сигнала, при чему су те компоненте представљене синусоидалним сигнаlima [14, 84]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \theta_k), -\infty < t < \infty \quad (2.1)$$

где је N – позитиван цео број, A_k – амплитуде синусоида, ω_k – кружна фреквенција синусоида, θ_k – фаза синусоида. Компоненте $A_k \cos(\omega_k t + \theta_k)$ представљају хармонике сигнала $x(t)$.

У случају да је претходно дефинисан сигнал периодичан са основном периодом T , тада се он може представити у општем случају као бесконачна сума синусоидалних сигнала [14, 84]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)), -\infty < t < \infty \quad (2.2)$$

Сигнал дефинисан изразом 2.2 се назива тригонометријски Фуријеов ред периодичног сигнала $x(t)$, при чему је $\omega_0 = 2\pi/T$. Коефицијенти a_k и b_k се израчунавају на било којем целом интервалу T [14, 84]:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega_0 t) dt, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega_0 t) dt, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

У тригонометријском Фуријеовом реду се појављује и једносмерна компонента a_0 која се може израчунати као:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.5)$$

Да би се Фуријеови редови могли израчунати, то јест да би се сигнал могао представити претходно описаним поступком, потребно је да буду испуњени Дирихлеови услови [14, 84, 85]:

1. Функција $x(t)$ мора бити интеграбилна дуж целе периоде:

$$\int_0^T |x(t)| dt < \infty \quad (2.6)$$

2. Функција $x(t)$ мора да има коначан број минимума и максимума дуж било које периоде.
3. Функција $x(t)$ мора да има коначан број дисконтинуитета дуж било које периоде.

Главни проблем Фуријеових редова се јавља ако сигнал није периодичан. Тада Фуријеови редови нису од користи за представљање сигнала његовим фреквенцијским садржајем и треба се окренути другим модификованим функцијама. У случају да је сигнал $x(t)$ апериодична функција, фреквенцијски садржај сигнала $x(t)$ се може преставити Фуријеовом трансформацијом [14, 84]:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt, -\infty < \omega < \infty \quad (2.7)$$

где је ω континуална фреквенција. Самим тим може се рећи да је и спектар апериодичног сигнала $x(t)$ континуалан. Треба приметити да у израчунавању функције $X(j\omega)$ фигурише комплексна променљива $e^{-j\omega t}$, што значи да је и функција $X(j\omega)$ комплексна. Примењујући ово својство Фуријеове трансформације $X(j\omega)$, може се израчунати амплитудски и фазни спектар сигнала $x(t)$ као $|X(j\omega)|$ и $\arg\{X(j\omega)\}$ респективно [14].

Апериодична функција $x(t)$ има Фуријеову трансформацију ако су испуњени Дирихлеови услови [14, 84]:

1. Функција $x(t)$ мора бити интеграбилна:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (2.8)$$

2. Функција $x(t)$ мора да има коначан број минимума и максимума на сваком коначном интервалу времена.
3. Функција $x(t)$ мора да има коначан број дисконтинуитета на сваком коначном интервалу времена.

Оригинални сигнал $x(t)$ се може израчунати из сигнала $X(j\omega)$ инверзном Фуријеовом трансформацијом [14, 84]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.9)$$

Ако се узме у обзир да су се временом све више развијале и користиле технологије које у свом раду користе дигиталне сигнале, Фуријеова трансформација дискретног сигнала је налазила све већу примену [11, 14]. Овде се пре свега мисли на дискретну Фуријеову трансформацију (eng *Discrete Fourier Transform*). Њен облик у фреквенцијском домену је дефинисан као [11, 14, 84]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) e^{-2\pi n k / N}, k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.10)$$

при чему коефицијенти $X(k)$ представљају комплексне коефицијенте дискретне Фуријеове трансформације дискретног сигнала $x(n)$ генерисане у N одмерака. Дискретни сигнал $x(n)$ је настао процесом одмеравања континуалног сигнала $x(t)$ у

еквидистантним временским тренуцима са периодом одмеравања T . У литератури се често период одмеравања сигнала изоставља у дискретној секвенци $x(nT)$, па се она често пише као $x(n)$ подразумевајући да је аргумент временске функције временски тренутак једнак целом умношку периоде одмеравања T [14]. Аналитичка релација, дефинисана изразом 2.10, даје могућност израчунавања одмерака сигнала $x(n)$ у временском домену помоћу одмерака спектра применом инверзне дискретне Фуријеове трансформације [14, 84]:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{\infty} X(k) e^{2\pi n k / N}, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.11)$$

Почетна релација за израчунавање дискретне Фуријеове трансформације креће од одмеравања континуалног сигнала $x(t)$, али без обзира на то, дискретна Фуријеова трансформација се израчунава над само N одмерака почетног континуалног сигнала, што подразумева да се ови одмерци могу само периодично понављати са основном периодом N [14, 84].

2.1.1. Краткотрајна Фуријеова трансформација

Постоји велика група сигнала код које се спектар мења у току времена што представља велики проблем при употреби Фуријеове трансформације у класичном смислу [16]. Да би се превазишао овај проблем код нестационарних сигнала, мора се употребити нова, напреднија метода. Краткотрајна Фуријеова трансформација (енгл. *Short Time Fourier Transform – STFT*) се уводи као решење за поменути проблем и дефинисана је као [16, 86, 87]:

$$X_{STFT}(\tau, j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h^*(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (2.12)$$

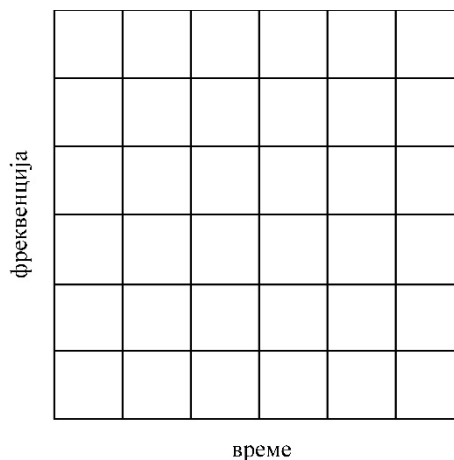
За разлику од Фуријеове трансформације у класичном смислу, *STFT* садржи још један додатни елемент, а то је прозорска функција $h^*(t - \tau)$. Самим тим, сигнал који је потребно анализирати посматра се кроз део фиксне дужине (прозор) и у том делу се сматра да је сигнал стационаран [16, 86]. Другачије речено, *STFT* израчунава Фуријеову трансформацију дела сигнала унутар прозора, при чему се прозор помера дуж

временске осе сигнала [16]. Оператор * указује на коњуговано комплексну вредност прозорске функције.

Основни проблем који се јавља у *STFT* је временска и фреквенцијска резолуција. За брзе промене у сигналу и њихову анализу, ширина прозора мора да је што мања што се позитивно одражава на временску резолуцију. Међутим, ако се тежи да ширина прозора буде што мања, добиће се негативан утицај на фреквенцијску резолуцију [16, 86]. Кратко речено, добра временска резолуција не може дати и добру фреквенцијску резолуцију и обратно. Ова тврдња је у литератури позната као Хајзенбергова неједнакост (енгл. *Heisenberg inequality*) и дефинисана је са [16]:

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (2.13)$$

где Δt представља параметар који описује временску резолуцију, а Δf фреквенцијску резолуцију. Параметри Δt и Δf код *STFT* су фиксне дужине, па је временско-фреквенцијска равна подељена на блокове исте дужине као што је приказано на Слици 2.1 [16, 86]:



Слика 2.1. Константна резолуција у временско-фреквенцијској равни

Генерално закључак би био да одабир прозорске функције игра значајну улогу у реализацији краткотрајне Фуријеове трансформације. Неке од прозорских функција које могу бити употребљене су: правоугаона прозорска функција (енгл. *Rectangular window*), Ханова прозорска функција (енг. *Hann window*), Барлетова прозорска функција (енгл. *Bartlett window*), Хамингова прозорска функција (енгл. *Hamming window*), Блекманова прозорска функција (енгл. *Blackman window*) и др [88].

Поменути проблем временске, то јест фреквенцијске резолуције код краткотрајне Фуријеове трансформације је могуће решити, а један од алгоритама којим се то постиже су таласићи [16]. У наредним редовима биће описан појам и дефиниција таласића, врсте и примена.

2.2. Дефиниција таласића

Као што је већ поменуто у уводу ове секције, таласићи су се развијали са циљем да унапреде постојеће алгоритме за обраду сигнала и реше одређене недостатке [15, 16, 86]. Проблем временске и фреквенцијске резолуције код краткотрајне Фуријеове трансформације навео је многе научнике да пронађу нови алгоритам који ће решити овај недостатак. Упркос чињеници да се *STFT* и таласићи заснивају на готово истом принципу – множење основне функције прозорском функцијом код *STFT* или основне функције таласићем код таласића, разлика између ове две методе је очигледна [16, 86].

У најједноставнијој форми, таласић преставља таласну функцију лимитираног трајања чија је просечна вредност нула [15, 17, 24, 89]. Базична функција таласића, такозвана „мајка“ функција (енгл. „Mother“ wavelet), се може дефинисати као [24, 27, 89]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0 \quad (2.14)$$

при чему је a параметар скалирања који служи за модификацију основног таласића, а b параметар транслације (помераја) помоћу кога се таласић транслира дуж временске осе. Параметар $1/\sqrt{a}$ у изразу 2.14 представља величину која врши нормализацију енергије у различитим скалама [28]. У зависности од вредности поменутих параметара, сегменти испитане функције се могу представити са високом или ниском резолуцијом, што ће зависити од облика и намене функције у даљој обради.

Из осцилаторне природе таласића $\psi(t)$ може се рећи да је он мали талас који осцилује унутар одговарајућих граница, то јест:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.15)$$

Другачије речено, просечна вредност таласића у временском домену мора бити једнака нули [27, 28]. Врло је важно напоменути и услове под којима је функција таласића постојана. Да би се функција $\psi(t)$ могла користити у даљој обради, морају бити испуњени одређени услови поред наведене осцилаторне природе таласића [16, 27]:

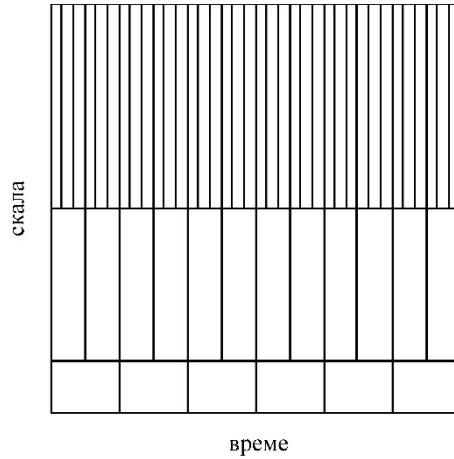
- коначна енергија таласића $E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$;
- услов допустивости таласића који ће бити дефинисан у следећој секцији;
- за комплексне функције таласића, фреквенцијски домен таласића мора бити реална и непрекидна функција за негативне фреквенције.

2.2.1. Континуална трансформација таласића

Основа истраживања теорије таласића креће од континуалне трансформације таласића (енгл. *Continuous Wavelet Transform – CWT*). Због своје природе, она није погодна ако се дискретни сигнали и слике обрађују, али може бити врло корисна у многим сегментима. Уз помоћ ове функције, подаци и функције се разлажу на различите фреквенцијске компоненте. Даљи процес подразумева анализирање сваке компоненте са резолуцијом која одговара њеној скали. Целокупна анализа се заснива на следећем изразу [24, 27, 90]:

$$CWT_f(a, b) = (f, \psi_{a,b}) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.16)$$

Дефинисана функција $CWT_f(a, b)$ у изразу 2.16 представља скаларни производ основне функције и базичне функције таласића и она се често у литератури помиње као функција која израчунава коефицијенте таласића. Овде је важно такође напоменути да се временско-фреквенцијска равна код таласића често назива и равна време-скала јер се врши скалирање по фреквенцији сигнала [29, 91]. Пример равни време-скала представљен је на Слици 2.2.



Слика 2.2. Раван време-скала код таласића

Ако се посматра фреквенцијски домен, за претходни израз важи Парсевалова (енгл. *Parseval*) једнакост [24, 92]:

$$CWT_f(a, b) = (f, \psi_{a,b}) = \frac{1}{2\pi} (\hat{f}, \hat{\psi}_{a,b}) \quad (2.17)$$

при чему су $\hat{f}$ и $\hat{\psi}_{a,b}$ основна функција и базична функција таласића у фреквенцијском домену, респективно.

Ако је испуњен услов допустивости таласића [24, 92]:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2.18)$$

тада се може израчунати и инверзна континуална функција таласића [24, 92]:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (2.19)$$

2.2.2. Дискретна трансформација таласића

У многим апликацијама континуална трансформација таласића није дала добре резултате или једноставно њен облик није применљив увек, поготово ако је фокус на дискретном домену [92]. Како би се превазишли недостаци у применљивости континуалне трансформације, француски математичар *Stéphane Mallat* је 1989. године

предложио декомпозицију таласића на коефицијенте детаља и апроксимације (енгл. *Detail* и *Approximation*) чији би еквивалент био пропуштање сигнала кроз високопропусни и нископропусни филтар, респективно [93]. Овакав начин декомпозиције таласића је могућ ако се примени дискретна трансформација таласића (енгл. *Discrete Wavelet Transform – DWT*). Основно својство ове трансформације је да се параметар скале a и translације b мењају у дискретним корацима како је описано у наредним редовима.

Како би се дошло до дискретне трансформације таласића, потребно је прво извршити одмеравање у равни време-скала, а то би значило да је потребно увести нове параметре у трансформацију таласића и то [27, 89, 92]:

$$a = a_0^i \quad (2.20)$$

$$b = ja_0^i b_0 \quad (2.21)$$

при чему су a_0 и b_0 кораци одмеравања по скали и времену респективно, а i и j су цели бројеви. Кораци a_0 и b_0 одређују ширење и померање таласића дуж сигнала. На основу нових уведених величина, дискретан облик таласића је [27, 31, 89, 92]:

$$\psi_{i,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^i}} \psi\left(\frac{t - ja_0^i b_0}{a_0^i}\right) = a_0^{-i/2} \psi(a_0^{-i} t - j b_0), a_0 > 1 \quad (2.22)$$

Ако се, на пример, узме да је $a_0 = 2$ и $b_0 = 1$, функција у изразу 2.22 постаје:

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i} t - j) \quad (2.23)$$

Овај специјалан случај (често назван и базични таласић или базични облик таласића [24]) указује на то да је фактор скалирања a облика 2^i , што значи да при сваком кораку i фактор скалирања има двоструко већу вредност, чиме се таласић шири. Ова форма се често назива и диадичка форма. Резолуција се при том смањује [24, 78, 90]. Пошто параметар i може да иде у бесконачно, а да би се овај случај избегао, примењује се додатна функција скалирања која карактерише базично скалирање таласићима, такозвана „отац“ функција (енгл. „*Father*“ *wavelet*). Функцију скалирања је први увео *Stephane Mallat*, при чему спектар ове функције подсећа на спектар нископропусног филтра, па се често у литератури помиње као филтар за усредњавање

[28]. Ако се узме у обзир специјалан случај представљен изразом 2.23, рекурзивна „отац“ функција је у том облику дата са [27, 92]:

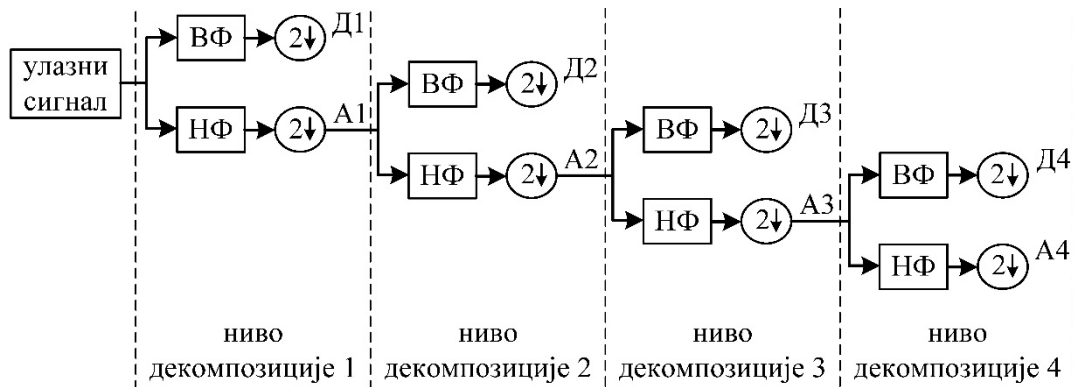
$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2}\varphi(2^{-i}t - j) \quad (2.24)$$

Насупрот функцији скалирања која има нископропусно својство, функција таласића има високопропусно својство, па је генерални израз разлагања функције дискретним обликом таласића [24, 27, 92]:

$$f(t) = \sum_j a_{N,j} 2^{-N/2} \varphi(2^{-N}t - j) + \sum_{i=1}^N \sum_j d_{i,j} 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - j) \quad (2.25)$$

при чему су $a_{N,j}$ и $d_{i,j}$ вектори апроксимације и детаља, а N број нивоа декомпозиције или број ишчезавајућих момената (енгл. *Vanishing moments*) функције $f(t)$.

Претходно дефинисане функције представљају и једну од најбитнијих одлика код дискретног облика таласића, то јест декомпозицију на нивое, при чему се на сваком нивоу декомпозиције израчунавају коефицијенти детаља и апроксимације [17, 24, 28, 30, 89, 91]. На Слици 2.3 је приказан блок дијаграм декомпозиције сигнала применом таласића до нивоа 4.



Слика 2.3. Декомпозиција сигнала таласићима

На сваком нивоу декомпозиције врши се филтрирање сигнала помоћу високопропусног ВФ филтра и нископропусног НФ филтра. Излази из филтара иду у блок „downsampling“ (означен кружићем са стрелицом надоле на Слици 2.3) који врши одмеравање сигнала нижом фреквенцијом одмеравања него што је уобичајено, у овом случају фактор је 2. То би значило да се на сваком нивоу декомпозиције добијају

коэффициенти детаља - Д и коэффициенти апроксимације - А који имају дупло мање коэффицијената него на претходном нивоу. За коэффицијенте апроксимације се поступак понавља све до последњег нивоа декомпозиције, то јест добијени коэффицијенти апроксимације улазе у ВФ и НФ филтар на сваком следећем нивоу, па у блок „downsampling“ и тако даље све до последњег нивоа. Узимајући у обзир Слика 2.3, потребно је дефинисати шта се дешава на сваком нивоу декомпозиције и математички. Ако је, на пример, $x(n)$ улазни дискретан сигнал са Сlike 2.3, а $g(n)$ и $h(n)$ импулсни одзиви ВФ и НФ филтра респективно, тада је [16, 28, 92]:

$$y_{ВФ}(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k) \quad (2.26)$$

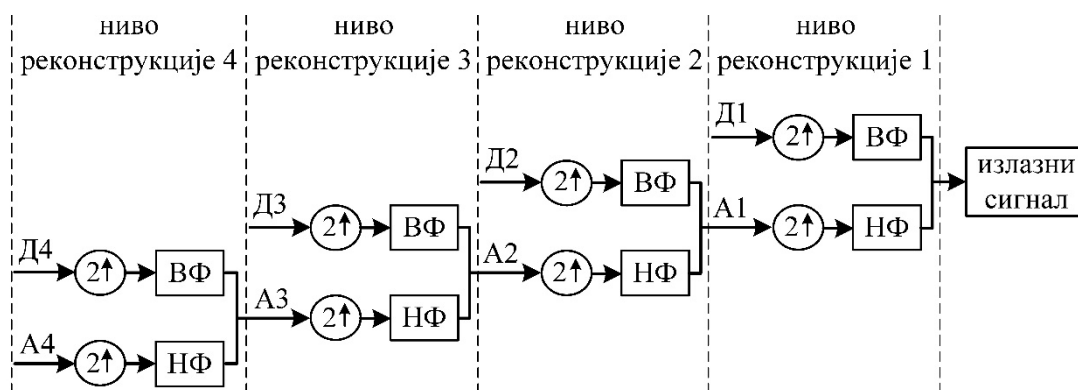
$$y_{НФ}(n) = x(n) * g(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)g(n-k) \quad (2.27)$$

то јест излази филтара са Сlike 2.3 се израчунавају као конволуција улазног сигнала и импулсних одзива филтара. Даљом обрадом, односно одмеравањем са двоструком нижом фреквенцијом одмеравања („downsampling“), добијају се коэффицијенти детаља и апроксимације. На пример, на нивоу декомпозиције 2, након обраде сигнала у ВФ и НФ филтрима и блоковима за „downsampling“ на нивоу декомпозиције 1, претходни изрази сада се дефинишу као [16, 28, 92]:

$$y_{ВФ}(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(2n-k) \quad (2.28)$$

$$y_{НФ}(n) = x(n) * g(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)g(2n-k) \quad (2.29)$$

Овако разложен сигнал по нивоима декомпозиције може се реконструисати што би био супротан поступак декомпозицији и тај поступак је приказан на Слици 2.4 [17, 24, 28, 30, 89, 91].

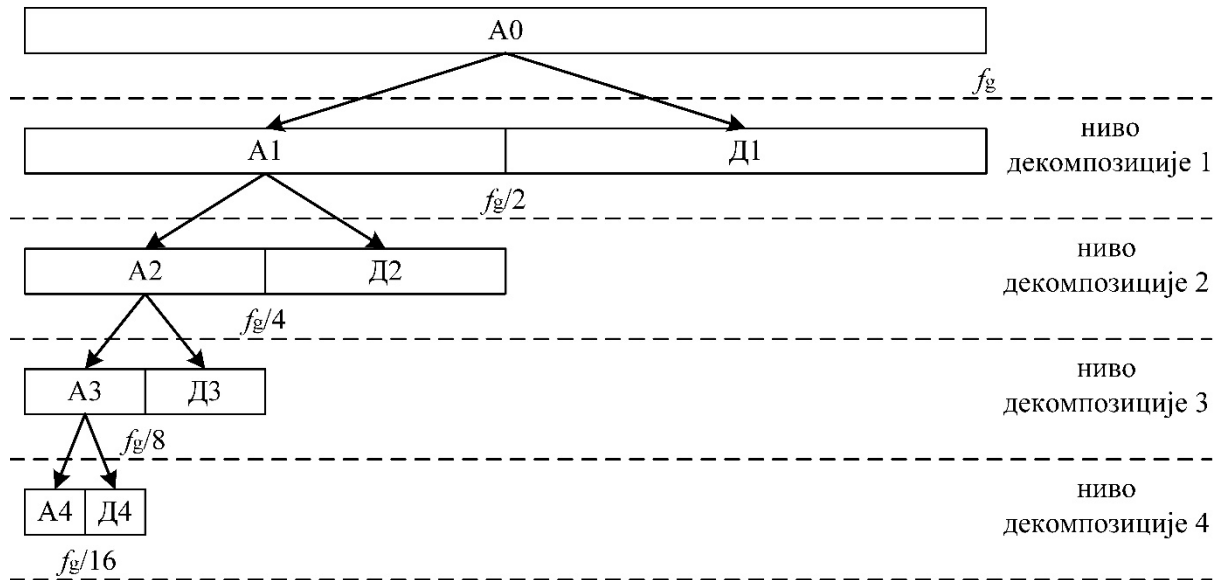


Слика 2.4. Реконструкција сигнала таласићима

У поступку реконструкције креће се од последње употребљеног нивоа декомпозиције па уназад све до првог нивоа декомпозиције. Такође се користе НФ и ВФ филтри с тим што је блок „*downsampling*“ замењен блоком „*upsampling*“ (приказан кружићем са стрелицом нагоре) код кога се користи виша фреквенција одмеравања од оне код сигнала на улазу у блок. У случају реконструкције таласићима са Сlike 2.4 ова метода се врши такође фактором 2 (два пута се повећава фреквенција одмеравања). Након сваког нивоа реконструкције добијају се коефицијенти детаља и апроксимације који имају дупло више коефицијената него на претходном нивоу.

Пошто се у претходним објашњењима декомпозиције и реконструкције помиње и одмеравање нестандартним приступом, важно је и напоменути шта се дешава и са фреквенцијом сигнала. Цео поступак најбоље осликава блок дијаграм са Сlike 2.5 [28, 63, 90]. Улазни сигнал има фреквенцију од 0 Hz до f_g , где је f_g гранична, то јест максимална фреквенција у сигналу. Сигнал је одмераван фреквенцијом f_s која је дупло већа од граничне фреквенције. На првом нивоу за коефицијенте детаља и апроксимације, дефинише се половина фреквенцијског опсега, то јест опсег од 0 Hz до $f_g/2$ припада коефицијентима апроксимације А1, а опсег од $f_g/2$ до f_g коефицијентима детаља Д1. На другом нивоу декомпозиције фреквенцијски опсег се скраћује на пола и креће се од 0 Hz до $f_g/2$. У том скраћеном опсегу дефинише се половина фреквенцијског опсега, то јест $f_g/4$, па опсег од 0 Hz до $f_g/4$ припада коефицијентима апроксимације А2, а опсег од $f_g/4$ до $f_g/2$ коефицијентима детаља Д2. На трећем нивоу

декомпозиције поступак се понавља, фреквенцијски опсег такође иде на пола, то јест креће се од 0 Hz до $f_g/4$, па опсег од 0 Hz до $f_g/8$ припада коефицијентима апроксимације A3, а опсег од $f_g/8$ до $f_g/4$ коефицијентима детаља Д3, и тако даље.



Слика 2.5. Декомпозиција сигнала таласићима у односу на фреквенцију сигнала

2.3. Фамилије таласића

У уводу овог поглавља већ је поменуто да постоје многе врсте (фамилије) таласића које су се развијале временом и чија примена је широка у многим областима. Данас постоји велики број таласића који је у употреби, а неки од њих су [94]: *Haar*, *Daubechies*, *Mexican hat*, *Morlet*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal*, *Cohen-Daubechies-Feauveau*, *Meyer*, *Shannon*, *frequency B-spline*, *Hermitian*, *Fejer-Korovkin* и др. Од свих наведених фамилија таласића, посредством софтверског пакета *Matlab*, у овом раду приказани су резултати само неких од њих и то: *Haar*, *Daubechies*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* и дискретни *Meyer*, који ће бити описани у наредним редовима.

2.3.1. Haar таласић

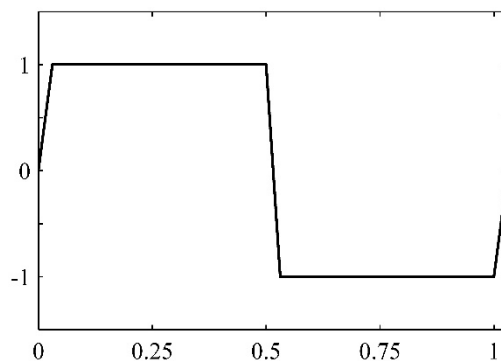
Без обзира што су се нека својства таласића помињала још у Фуријеовим списима, зачетником теорије таласића може се сматрати *Alfred Haar*. По њему је и први таласић добио име, *Haar* таласић. Овде је такође битно нагласити да не треба *Haar* таласић повезивати са појмом фамилије таласића, јер се овде ради само о једном таласићу, док, на пример, *Daubechies* таласића постоји велики број (45 у софтверском пакету *Matlab*) па су груписани у *Daubechies* фамилију таласића. Аналитичка форма *Haar* таласића дата је са [16, 29]:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \in [0 \quad 0.5] \\ -1 & \text{за } t \in [0.5 \quad 1] \\ 0 & \text{за } t \notin [0 \quad 1] \end{cases} \quad (2.30)$$

при чему је његова скалирајућа функција:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \in [0 \quad 1] \\ 0 & \text{за } t \notin [0 \quad 1] \end{cases} \quad (2.31)$$

Функција *Haar* таласића приказана је на Слици 2.6.

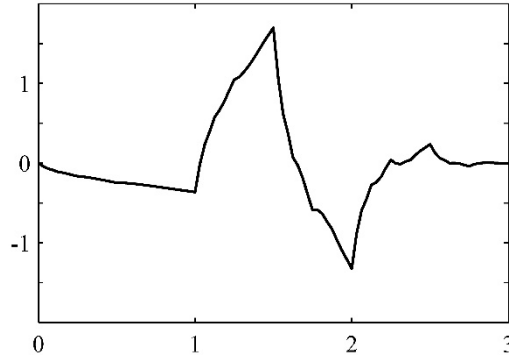


Слика 2.6. *Haar* таласић

2.3.2. *Daubechies* фамилија таласића

Daubechies фамилија таласића је данас доста распрострањена у разним апликацијама, а може се чак и рећи да је и највише коришћена фамилија таласића. Далеко је сложенија од *Haar* таласића, иако *Daubechies* 1 (основни *Daubechies* таласић) је исти као и *Haar* таласић [16, 29]. Настао је од стране белгијске физичарке и

математичарке *Ingrid Daubechies*. Аналитички је врло тешко описати више редове *Daubechies* фамилије таласића. Често уз скраћену ознаку таласића *db* стоји број (у опшем случају N) који управо означава о ком *Daubechies* таласићу је реч (на пример, *db2* говори да се ради о *Daubechies 2* таласићу). Осим већ поменутог *Daubechies 1* таласића, остали немају неки посебан израз. Сви су одређени *Daubechies* филтрима [16, 24, 27, 29]. На Слици 2.7 приказана је функција *Daubechies 2* таласића.



Слика 2.7. *Daubechies 2* таласић

2.3.3. *Coiflets* фамилија таласића

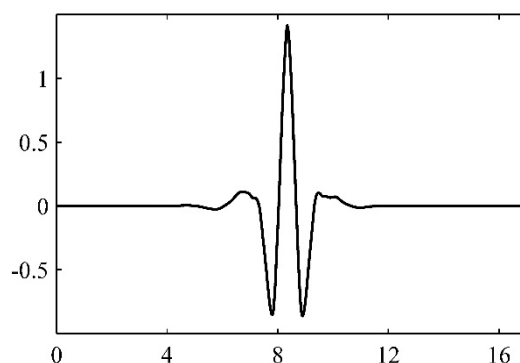
Фамилија таласића у чијем креирању је такође активно учествовала *Ingrid Daubechies* је *Coiflets* фамилија. *Ronald Raphael Coifman* је дошао на идеју да се креира ортогонални таласић са највећим бројем исчезавајућих момената не само за функцију таласића $\psi(t)$, већ и за скалирајућу функцију $\varphi(t)$ [16, 24, 27]. Да би се ово остварило, пожељно је одабрати такве функције таласића и скалирања да буду испуњени следећи услови [24, 27]:

$$\int t^k \psi(t) dt = 0, \quad \text{за } k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.32)$$

$$\int \varphi(t) dt = 1, \int t^k \varphi(t) dt = 0, \quad \text{за } k = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.33)$$

при чему је N број исчезавајућих момената. Функције представљене изразима 2.32 и 2.33 показују да су моменти функција таласића и функције скалирања једнаки нули и на вишим редовима, осим нултог момента функције скалирања који је једнак јединици

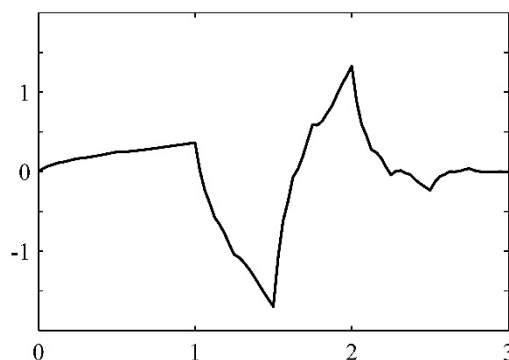
(видети израз 2.33). Што су претходна два израза остварљивија за веће k , то је грешка мања. На Слици 2.8 приказана је функција *Coiflet 3* таласића.



Слика 2.8. *Coiflet 3* таласић

2.3.4. *Symlets* фамилија таласића

Daubechies таласићи су такође врло познати по својој асиметричности, изузимајући *Daubechies 1* таласић. Да би се поправила асиметрија, конструисани су нови таласићи названи *Symlets*, који представљају модификоване *Daubechies* таласиће [24]. Кључну модификацију претрпео је *Daubechies* филтар, где се добија филтар веће симетрије који одређује *Symlet* таласић. Како би се све остале особине *Daubechies* таласића задржале и код *Symlets* таласића, они нису скроз симетрични, већ скоро симетрични [16, 24]. На Слици 2.9 приказана је функција *Symlet 2* таласића.



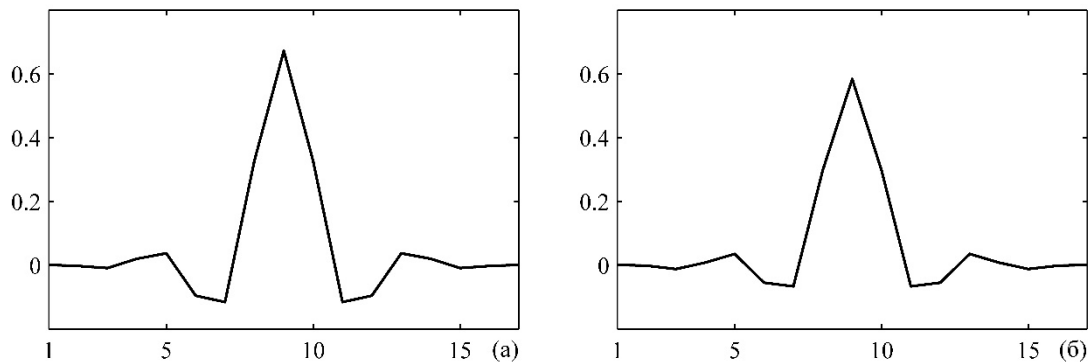
Слика 2.9. *Symlet 2* таласић

Упоредјујући слике 2.7 и 2.9 види се велика сличност између *Daubechies* и *Symlets* таласића. Битно је нагласити да и код *Symlets* таласића уз скраћену ознаку

таласића sym стоји број (у општем случају N) који управо означава о ком *Symlets* таласићу је реч (на пример, $sym2$ говори да се ради о *Symlet 2* таласићу).

2.3.5. Биортогонална фамилија таласића

Таласићи из биортогоналне фамилије припадају групи симетричних базиса таласића. Ови таласићи су у основи конструисани филтрима коначног импулсног одзива линеарне фазе, који омогућавају симетрију [16, 24]. У овом раду коришћене су две врсте биортогоналних таласића: *biorthogonal* и *reverse biorthogonal*, чије су функције представљене на Слици 2.10.



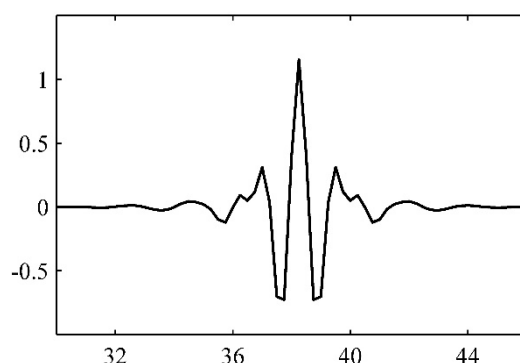
Слика 2.10. Биортогонални таласићи: (а) *biorthogonal 2.8*, (б) *reverse biorthogonal 6.8*

Biorthogonal таласић користи одвојене функције таласића и функције скалирања за анализу и синтезу сигнала, док *reverse biorthogonal* таласић за анализу користи функције намењене синтези и обрнуто, због чега и стоји овај префикс „*reverse*“ у имену. То би значило да сваки таласић има по две функције таласића и две функције скалирања [16, 24].

2.3.6. Дискретни *Meyer* таласић

Француски математичар *Yves Meyer* је творац овог таласића који спада у групу ортогоналних таласића, где се налазе и *Daubechies*, *Coiflets* и *Symlets*. Форма функције таласића и скалирајуће функције је представљена у фреквенцијском домену у чијој основи доминирају тригонометријске функције [24, 95]. Још једна карактеристика која одликује овај таласић је та да је он бесконачно диференцијабилна функција. Често се

користи у адаптивним системима за филтрирање, разним класификацијама, обради слике и др [95]. На Слици 2.11 приказана је функција дискретног *Meyer* таласића.



Слика 2.11. Дискретни *Meyer* таласић

2.4. Примена таласића у процесу отклањања шума у сигналу

Поред разних примена таласића које су већ поменуте у уводу овог поглавља, једна од честих је и отклањање шума у сигналу, а нека од најзначајних истраживања у овој области вршили су научници *David L. Donoho* и *Iain M. Johnstone* [96]. Постоји неколико кључних корака у процесу отклањања шума из сигнала применом таласића:

- избор таласића и нивоа декомпозиције N . Процес декомпозиције је објашњен на Слици 2.3, при чему се на сваком нивоу декомпозиције добијају коефицијенти детаља и апроксимације;
- за сваки ниво у декомпозицији таласићима, коефицијенти детаља се модификују тако што се на њих примењује изабрани ниво прага (енгл. *Thresholding*);
- добијени модификовани коефицијенти детаља, заједно са коефицијентима апроксимације, улазе у процес реконструкције (Слика 2.4) како би се добио оригиналан сигнал без шума.

Пошто је процес декомпозиције детаљно објашњен раније, овде ће акценат бити стављен на модификацију коефицијената детаља изабраним нивоом прага. Овде је важно напоменути и зашто се модификација врши на коефицијентима детаља, док се коефицијенти апроксимације у овом случају занемарују. Високофреквентни шум који се налази у сигналу који треба обрадити налази се управо у коефицијентима детаља па

је из тог разлога фокус на њима [24, 96–98]. Наравно да постоје случајеви у којима треба извршити и модификације над коефицијентима апроксимације али се у том случају најчешће врши декомпозиција сигнала пакетском трансформацијом таласића [16]. Описаном процедуром из сигнала се отклања високофреквентни шум, док се шум на ниским фреквенцијама (ако постоји) и даље налази у сигналу и након реконструкције. Израз 2.25 сада у модификованом облику постаје [24]:

$$\hat{f}(t) = \sum_j a_{N,j} 2^{-N/2} \varphi(2^{-N}t - j) + \sum_{i=1}^N \sum_j \hat{d}_{i,j} 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - j) \quad (2.34)$$

при чему је $\hat{f}(t)$ сада реконструисана функција (сигнал) у којој фигурирају модификовани коефицијенти детаља $\hat{d}_{i,j}$.

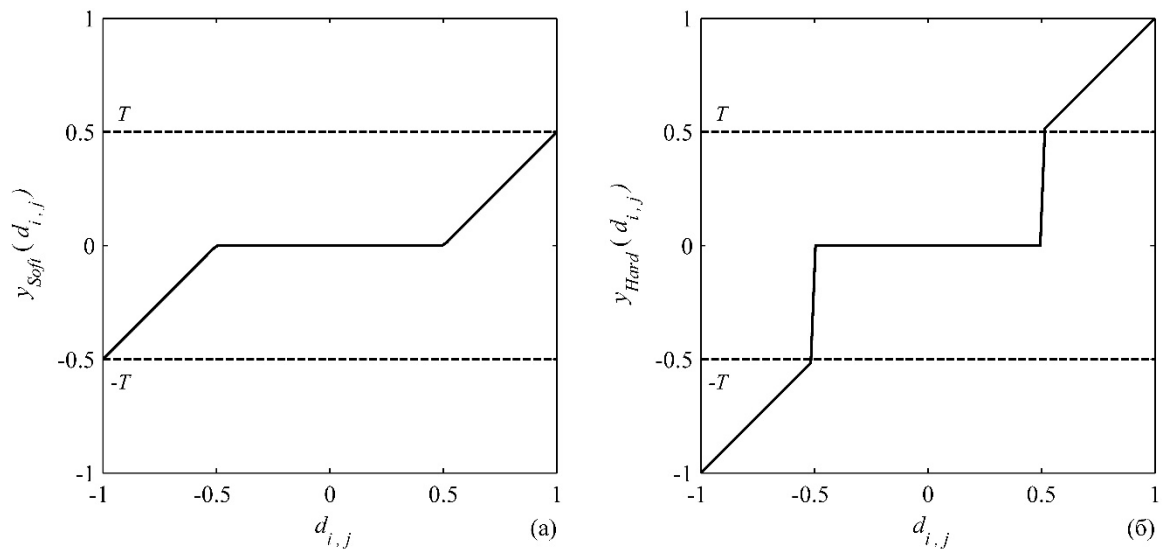
Модификовање коефицијената детаља изабраним нивоом прага може довести до одређених деформација у сигналу, па се мора водити рачуна да се приликом реконструкције добије оригиналан сигнал из кога су у што већој мери отклоњене компоненте шума, а користан део сигнала остао исти. Наравно, ниво прага није једини параметар о коме треба водити рачуна у овом процесу. Избор фамилије таласића, то јест врсте таласића и одабир нивоа декомпозиције су подједнако важне ставке приликом отклањања шума из сигнала.

Постоје две методе када је реч о избору прага: фино постављање прага (енгл. *Soft thresholding*) и грубо постављање прага (енгл. *Hard thresholding*) [17, 29, 89, 96]:

$$\begin{aligned} y_{Soft}(d_{i,j}) &= d_{i,j} - T, & \text{ако је } d_{i,j} > T \\ y_{Soft}(d_{i,j}) &= d_{i,j} + T, & \text{ако је } d_{i,j} < -T \\ y_{Soft}(d_{i,j}) &= 0, & \text{ако је } |d_{i,j}| \leq T \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} y_{Hard}(d_{i,j}) &= d_{i,j}, & \text{ако је } |d_{i,j}| > T \\ y_{Hard}(d_{i,j}) &= 0, & \text{ако је } |d_{i,j}| \leq T \end{aligned} \quad (2.36)$$

У изразима 2.35 и 2.36 представљени су математички модели финог и грубог постављања прага респективно. Параметар T означава изабрану вредност прага или ниво прага (енг *Thresholding value* или *Level of thresholding*). На Слици 2.12 приказане су графичке представе финог и грубог постављања прага у односу на коефицијенте детаља са изабраним нивоом прага $T=0.5$.



Слика 2.12. Методе постављања прага са нивоом прага $T=0.5$: (а) fino постављање прага, (б) грубо постављање прага

Процедура постављања прага подразумева поређење коефицијената са изабраним прагом [17, 29, 96]. Циљ овог поређења је да се установи да ли коефицијенти чине пожељан део оригиналног сигнала или не. Главна разлика између финог и грубог постављања прага је та да коефицијенти финог постављања прага нису директно једнаки са коефицијентима детаља изнад дефинисаног нивоа прага што није случај код грубог постављања прага [17, 89]. Али треба нагласити да је грубо постављање прага осетљивија метода када се дешавају чак и ситне промене у сигналу. Такође, код грубог постављања прага се може десити да се неке компоненте шума „провуку“ до реконструкције и у реконструисаном сигналу прикажу као пикови, то јест као усамљене компоненте. Ово се догађа најчешће код мањег односа сигнал-шум [92]. Временом су се ове две методе мењале и унапређивале, па данас постоје и друге представе финог и грубог постављања прага [99].

Из описаног се може закључити и велика предност таласића у односу на стандардне нископропусне филтре, ако је фокус на отклањању високофреквентног шума. Нископропусни филтри отклањају све компоненте након дефинисане граничне фреквенције пропусног опсега, док код таласића то није случај. Код таласића, као што је већ објашњено, само коефицијенти чија је вредност мања од дефинисаног нивоа прага се отклањају [92].

Након правилног одабира методе постављања прага, треба одредити вредност нивоа прага, то јест параметар T . Врло је битно одабрати праву вредност нивоа прага како би се утицај шума у сигналу свео на минимум. Најпознатија метода коју је предложио *Donoho* подразумева универзално постављање вредности нивоа прага, која је представљена изразом 2.37 [26, 29, 96]:

$$T = \sigma \sqrt{\log_e L} \quad (2.37)$$

где је σ стандардна девијација шума, а L број одмерака. Да би се одредила стандардна девијација, потребно је одредити медијану апсолутне вредности коефицијената детаља, што је приказано изразом 2.38 [17, 29, 96]:

$$\sigma = \frac{\text{mediana}(|d_{N-1,j}|)}{0.6745}, j = 0, 1, 2, \dots, 2^{N-1} - 1 \quad (2.38)$$

У изразу 2.38 именилац представља фактор скалирања који зависи од дистрибуције коефицијената детаља $d_{i,j}$. Ради подсећања, N представља ниво декомпозиције.

Поред универзалне методе одређивања вредности нивоа прага, постоје и друге које су такође доста заступљене у истраживањима. Две методе које ће се и у овом раду примењивати су: *sure* (енгл. *Stein's unbiased risk estimate*) и *minimax*. *Sure* метода (израз 2.39), за разлику од универзалне методе, се препоручује код сигнала код којих је шум мање заступљен [92]:

$$Sure(T) = N + a(T)(T^2 + 2) + \sum_{k=a(T)-1}^N d_k^2 \quad (2.39)$$

при чему су $a(T)$ број коефицијената чија је вредност мања или једнака вредности нивоа прага T , а d_k коефицијенти таласића организовани у растућем поретку. Две врсте *sure* методе које се могу применити посредством програмског пакета *Matlab* су *rigrsure* (често називан *SureShrink*) и *heursure* (настао комбинацијом *rigrsure* и универзалне методе) [45, 100].

Minimax методу је предложио *David L. Donoho* у својим истраживањима као оптималну у поређењу са већ поменутим методама. Фиксна вредност нивоа прага је одабрана тако да даје минимум максималне средње квадратне грешке примењених функција [26, 96, 101]:

$$T_{minimax} = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.10829 \log_2 L), & \text{за } L > 32 \\ 0, & \text{за } L < 32 \end{cases} \quad (2.40)$$

где је L дужина сигнала.

Последњи корак у процесу отклањања шума у сигналу је ре-скалирање прага. Ако се сагледају опције у софтверском пакету *Matlab*, онда се могу изабрати 3 врсте ре-скалирања. *One* ре-скалирање је базичан, основни модел који у ствари не врши ре-скалирање. *Sln* ре-скалирање користи естимацију нивоа шума на основу коефицијената првог нивоа, док трећа опција ре-скалирања – *mln*, користи естимацију нивоа шума која зависи од нивоа коефицијената [100, 102].

Правилним одабиром свих поменутих метода везаних за *thresholding* долази се до процеса отклањања шума из сигнала. Посебно треба усмерити пажњу на комбинацију поменутих метода, јер неће свака комбинација пружити добре резултате, што и јесте један од предмета истраживања ове дисертације. Последњи корак је реконструкција сигнала, где се сви коефицијенти добијени применом таласића реконструишу у оригиналан сигнал.

3. ИМПУЛСНИ ОДЗИВИ ПРОСТОРИЈЕ

Импульсни одзиви просторије (често у литератури називани акустички одзиви просторије) су дефинисани као функција одзива притиска у времену на месту пријемника у просторији као резултат побуде просторије импулсом (*Dirac*-овом делта функцијом) [5, 54]. У том смислу просторија се посматра као преносни систем, при чему је улаз система на месту извора побудног импулса, а излаз система је на месту пријема (микрофона у одређеном делу просторије) [5, 54, 103]. Пошто се просторија у литератури третира као линеарни временски инваријантни систем, скраћено *LTI* (енгл. *Linear Time Invariant*), за одређену побуду таквог система $x(t)$, излазни сигнал $y(t)$ се може добити као [54]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau = x(t) * h(t) \quad (3.1)$$

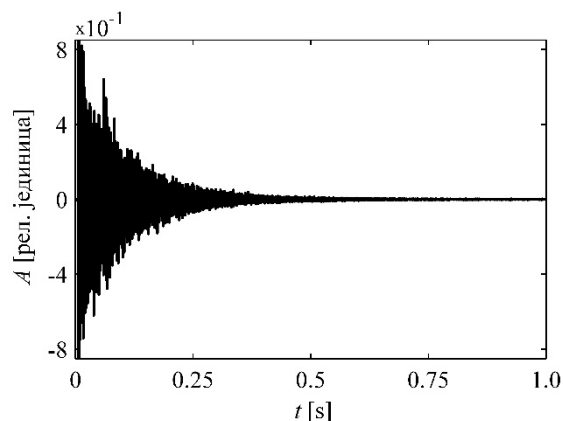
при чему је $h(t)$ импулсни одзив система, а израз 3.1 представља конволуцију функција $x(t)$ и $h(t)$ (* - знак за конволуцију). У реалним ситуацијама овакав систем не реагује док се на улазу не појави неки сигнал, па се доња граница интеграције у изразу 3.1 може заменити са нулом.

Пошто је у овом истраживању акценат на импулсним одзивима просторије, из претходног изрази се може издвојити функција $h(t)$ и израчунати као конволуција излазног сигнала и улазног сигнала инвертованог у времену [54]:

$$h(t) = y(t) * x(-t) \quad (3.2)$$

Поред временског домена, импулсни одзив се може приказати и анализирати у фреквенцијском домену применом Фуријеове трансформације. Битно је напоменути да конволуциони изрази 3.1 и 3.2 у континуалном домену се могу изразити и у дискретном домену.

Један пример импулсног одзива просторије приказан је на Слици 3.1. Ради се о мереном импулсном одзиву снимљеном у лабораторији.



Слика 3.1. Мерени импулсни одзив просторије у временском домену

Импулсни одзиви просторије се састоје из три дела које треба размотрити при њиховој анализи: директни звук (инцидентни звук који долази директно из извора), ране рефлексије и део везан за реверберацију [54, 104]. Врло важни параметри на које треба обратити посебну пажњу су време реверберације и време почетног опадања, који ће бити описани у наставку.

Мерење импулсних одзива просторије може се обавити на више начина, а неке од најпознатијих техника су: *MLS* техника (енгл. *Maximum Length Sequence*), *IRS* техника (енгл. *Inverse Repeated Sequence*), *Swept Sine* техника и др [46, 48]. Заједнички проблем који се овде јавља је шум који се налази у сваком мереном импулсном одзиву просторије, који се још и назива укупни или позадински шум (енгл. *Background noise*) и он се састоји од нежељеног звука који постоји у окружењу (амбијентална бука) и електронског шума мерне опреме. Шум генерално може бити стационарни, али и транзијентни [54, 104].

Како шум представља основну сметњу у импулсним одзивима просторије, од посебног значаја су методе за смањење утицаја шума. Постоје стандардне методе које се користе у области акустике просторије, као што су, на пример, одсецање импулсног одзива (енгл. *Truncation*) [53], одузимање средње квадратне вредности шума, као и комбинација ове две методе уз корекцију одсецања (енгл. *Subtraction-Truncation-Correction*) [49]. Треба напоменути да су у последње време све више у фокусу и друге методе које се генерално користе за смањење утицаја шума из акустичких сигнала, а ту спадају разне врсте оптималних и адаптивних филтара, филтри бесконачног и коначног импулсног одзива и други. У овој дисертацији се посебан акценат ставља на појам и употребу таласића који и јесу главни алат за обраду сигнала.

Поред мерених импулсних одзива, све чешће се користе и синтетизовани импулсни одзиви, реализовани софтверски. Две врсте одзива које су коришћене у овој дисертацији су одзиви добијени применом модела извора као лика у огледалу (енгл. *Image Source Model – ISM*) [52, 105] и одзиви просторије добијени методом експоненцијалног опадања (енгл. *Exponential Decay – ED*). Ове две методе ће бити описане у наставку.

3.1. Време реверберације и време почетног опадања

Време реверберације се дефинише као време потребно да јачина звука у просторији ослаби 10^6 пута након искључења побуде [5, 54, 104, 106], то јест ако то сагледамо у децибелима, то је време за које се јачина звука смањи за 60 dB. Амерички физичар *Wallace Clement Sabine* [107] је увео ову величину као једну од најзначајнијих у акустици просторија. У литератури се обележава са T_{60} , али се поред ове ознаке могу сусрести и ознаке T_{30} или T_{15} , понекад и T_{10} . Наиме, и поред коришћења побудног сигнала високог нивоа, време реверберације је понекад тешко измерити до тренутка када јачина звука опадне за 60 dB, па се онда време реверберације мери до тренутка када је јачина звука опала за 30 dB, 15 dB, односно 10 dB у односу на ниво у стационарном стању, пре искључења побуде. Времена реверберације T_{30} , T_{15} и T_{10} се множе константама 2, 4 и 6, респективно.

Са теоријског аспекта, време реверберације T_{60} се може израчунати на следећи начин [5, 104]:

$$T_{60} = 0.163 \left[\frac{s}{m} \right] \frac{V}{\bar{\alpha} S} \quad (3.3)$$

где је $0.163 \left[\frac{s}{m} \right]$ константа, V запремина просторије, $\bar{\alpha}$ средњи коефицијент апсорпције звука у просторији и S површина просторије.

Још један параметар који је важно размотрити је време почетног опадања које се добија праћењем почетног дела стрмине криве опадања, односно првих 10 dB опадања и множењем фактором 6. Тиме се постиже да и ово време буде у опсегу опадања звука од 60 dB, као и време реверберације [5, 104].

3.2. Енергетска крива опадања

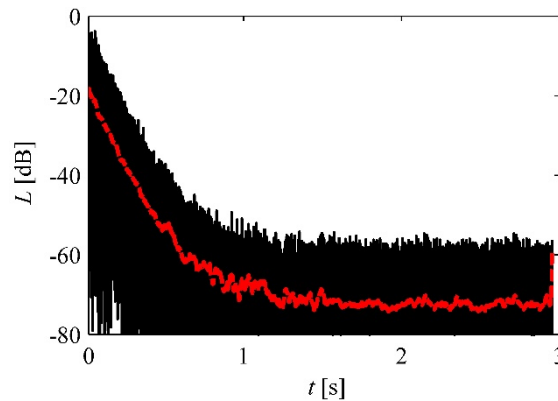
Претходно поменути крива опадања се може добити из импулсног одзива просторије адекватном обрадом одзива. Један од облика криве опадања се добија из квадрата импулсног одзива у логаритамској размери [54, 108]:

$$d_{dB}(t) = 10 \log_{10} h^2(t) \quad (3.4)$$

при чему је нормализована форма дата са:

$$d_{dBn}(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{h^2(t)}{\max(h^2(t))} \right) \quad (3.5)$$

Користећи израз 3.5, на Слици 3.2 је приказана крива опадања импулсног одзива просторије:



Слика 3.2. Крива опадања импулсног одзива просторије са Сlike 3.1: пуна линија у црној боји – оригиналан приказ; испрекидана линија у црвеној боји – приказ коришћењем команде *smooth*

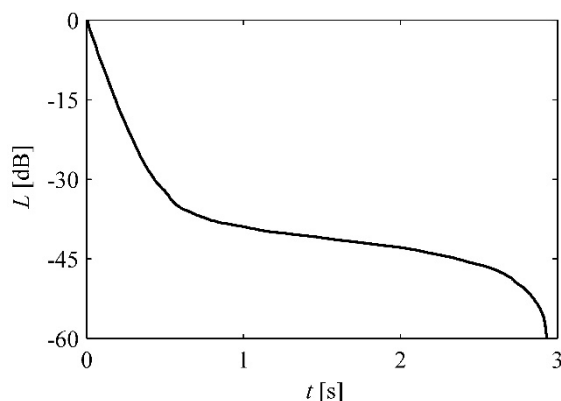
Ради лакше представе и анализе, немачки физичар *Manfred Robert Schroeder* је дефинисао начин за добијање криве опадања интеграљењем импулсног одзива просторије. Оваква крива се због тога још и назива интеграљена крива опадања (енгл. *Integrated Impulse Decay Curve – IIDC*) [54, 108, 109]:

$$d_c(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

Ако се изврши нормализација, тада је:

$$d_{cn}(t) = \frac{\int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (3.7)$$

Као и у изразима 3.4 и 3.5, ако се жели употребити логаритамска скала, потребно је на изразе 3.6 и 3.7 применити $10\log_{10}$. Пример криве опадања добијене *Schroeder*-овом интеграцијом, дефинисаном претходним изразима на логаритамској скали, је приказан на Слици 3.3 при чему је употребљен исти импулсни одзив просторије.



Слика 3.3. Интеграљена крива опадања импулсног одзива просторије са Сликe 3.1

Често се у литератури за интеграљену криву опадања, као и за друге криве опадања базиране на енергији сигнала, користи израз енергетска крива опадања (енгл. *Energy Decay Curve – EDC*) или само крива опадања, па ће се последњи краћи термин користити и у наставку. Математичка представа криве опадања у изразима 3.6 и 3.7 у континуалном домену се може заменити представом у дискретном домену. Недостатак који је изражен код кривих опадања добијених на претходно описан начин, је тај да се приликом интеграљења врши кумулативно сабирање шума од краја одзива до конкретног временског тренутка [49, 103, 104, 110].

Добијена крива опадања, приказана на Слици 3.3 се састоји из три дела [104]:

- почетни део – део у коме крива опадања експоненцијално опада (у дифузном звучном пољу) са нагибом који је дефинисан временом реверберације;
- средишњи део – у овом делу крива опадања има доста блажу стрмину него што је то случај у почетном делу, овај део криве одговара делу одзива где је доминантан шум, а блага стрмина опадања је последица поменутог

кумулятивног сабирања шума од краја одзива до конкретног временског тренутка;

- крајњи део – у крајњем делу се појављује закривљење и нагли пад криве опадања који је последица коначне горње границе интеграције.

3.3. Методе за смањење утицаја шума код кривих опадања генерисаних из импулсних одзива просторије

Стандардне методе често коришћене у литератури за смањење утицаја шума код кривих опадања које су генерисане из импулсних одзива просторије су:

- одсецање импулсног одзива (енгл. *Truncation*);
- одузимање средње квадратне вредности шума (енгл. *Subtraction*);
- одузимање средње квадратне вредности шума, одсецање одзива и корекција одсецања (енгл. *Subtraction-Truncation-Correction*).

Одсецање импулсног одзива је често коришћена метода за смањење утицаја шума код криве опадања генерисане изразом 3.6. Ако се сагледа израз 3.6, види се да горња граница интеграла у изразу иде у бесконачност. Код интегралења одзива у пракси, ова граница интеграције мора имати неку коначну вредност, што је и најбоље описано стандардом ISO 3382 [46]. Самим тим би израз 3.6 постао [49, 53]:

$$d_c(t) = \int_t^{t_i} h^2(\tau) d\tau \quad (3.8)$$

Код реалних импулсних одзива ова граница се може поистоветити са крајем импулсног одзива. Међутим, она се генерално може поставити било где дуж одзива. Правилан избор вредности t_i у претходном изразу је од суштинског значаја за добијање криве опадања која има актуелну стрмину опадања, односно чије се опадање поклапа са актуелним опадањем у тој конкретној просторији. Горња граница интеграла је уједно и тачка одсецања импулсног одзива. Како би се остварили што бољи резултати применом одсецања одзива, потребно је добити што дужу криву опадања, а да се при том минимизује утицај шума. Проблем се огледа у томе што у непосредној близини дефинисане тачке одсецања, крива опадања тежи ка минус бесконачности, и ово

представља недостатак (нежељени ефекат) методе одсецања одзива. Још један нежељени ефекат је да се део енергије одзива који се налази иза тачке одсецања губи одсецањем одзива.

Како би се нежељени ефекти методе одсецања криве опадања смањили, предложена је метода у којој се енергија одзива која се налази у делу који је одсечен поново рачуна (даље означена са C_{comp}) и додаје интегралу који је дефинисан изразом 3.8. Тада је [49, 53]:

$$d_c(t) = \int_t^{t_i} h^2(\tau) d\tau + C_{comp} \quad (3.9)$$

На овај начин се добија метода која је базирана на одсецању одзива и компензацији енергије одзива иза тачке одсецања.

Друга метода поменути овде односи се на одузимање средње квадратне вредности шума, коју је дефинисао *W. T. Chu* у раду [111] као:

$$d_c(t) = \int_t^{t_{IR}} (h^2(\tau) + N_{est}^2) d\tau \quad (3.10)$$

при чему је N_{est} израчунати ниво шума (средње квадратна вредност шума), а t_{IR} дужина читавог анализираног импулсног одзива. Овде треба напоменути да се ниво шума израчунава из дела импулсног одзива просторије где је шум доминантан, и одузима се од квадрираног импулсног одзива пре *Schroeder*-ове интеграције.

Ако се обједине изрази 3.8, 3.9 и 3.10, добија се коначан израз за трећу методу - одузимање средње квадратне вредности шума, одсецање одзива и корекција одсецања [49, 112]:

$$d_c(t) = \int_t^{t_i} (h^2(\tau) + N_{est}^2) d\tau + C_{comp} \quad (3.11)$$

Метода дефинисана изразом 3.11 даје боље резултате по питању смањења утицаја шума тако да су грешке и евентуални проблеми, који се јављају у претходним методама сведени на минимум.

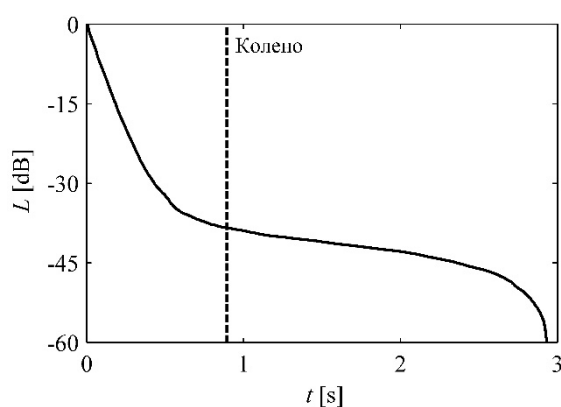
3.3.1. Место колена и одсецање импулсних одзива просторије за добијање кривих опадања

Један од највећих проблема код импулсних одзива просторије је постојање шума, независно од врсте шума. Шум у овом случају има велики утицај на криву опадања, то јест утиче директно на смањење динамичког опсега (опсег опадања криве опадања) чиме се и утиче и на израчунавање времена реверберације и осталих акустичких параметара просторије. Динамички опсег се код кривих опадања рачуна као разлика максималне вредности криве опадања и места колена [47].

Колено се у литератури помиње као место пресека (реверберационе) стрмине опадања криве опадања и прага шума (нивоа шума). Оптимална тачка одсецања, односно оптимално време одсецања одзива (енгл. *Truncation time*) се налази на месту колена [47, 53, 113]. Међутим, одређивање времена одсецања на месту колена није једноставно у пракси, и у неким случајевима се може добити место одсецања и пре или иза места колена, што доводи до одређених одступања новодобијене криве опадања, па се применом унапређених метода врши прецизније одређивање времена одсецања. Пошто је место колена узето као оптимално време одсецања у литератури, оно се теоријски може израчунати следећим изразом [50, 54]:

$$t_k = \frac{(-T_{60} 10 \log a)}{60} \quad (3.12)$$

при чему је a праг шума. Место колена код криве опадања приказане на Слици 3.3, приказано је на следећој слици:



Слика 3.4. Место колена код интегралне криве опадања импулсног одзива просторије са Слике 3.3

У претходним редовима је апострофиран негативан утицај шума на импулсни одзив просторије, поготово приликом израчунавања криве опадања. Смањење утицаја шума при обради импулсних одзива просторије је једна од важних тема данас у акустици па се у складу са тим и ова дисертација бави применом нове методе (таласића) за отклањање шума односно његових негативних ефеката при обради импулсног одзива просторије. Резултати добијени применом таласића у процесу отклањања шума из импулсних одзива просторије су упоређивани са постојећим методама које су публиковане у литератури, а укратко презентоване и овде.

3.4. Врсте синтетизованих импулсних одзива просторије

У овој дисертацији су коришћене две врсте импулсних одзива просторија, мерени и синтетизовани. Већ су поменуте методе којима се добијају мерени импулсни одзиви просторије (више у вези њих се може пронаћи у датој литератури). Што се тиче синтетизованих импулсних одзива, они се добијају дефинисаним математичким алгоритмом који их описује. За потребе ове дисертације две врсте синтетизованих импулсних одзива су коришћене, чији ће алгоритми генерисања бити описани у наредним редовима.

ISM импулсни одзив просторије је један од симулираних импулсних одзива за чију синтезу се користи метода заснована на моделу виртуелних извора звука добијених применом лика у огледалу [105]. Ово је доста коришћен импулсни одзив, пре свега због једноставности своје имплементације у разним апликацијама. Ова метода се помиње још од 1979. године када су је научници *Jont B. Allen* и *David A. Berkley* описали у свом раду као метода за симулацију импулсних одзива просторије [52]. Преносна функција *ISM* синтетизованог импулсног одзива просторије се израчунава као:

$$h(t) = \sum_{u=0}^1 \sum_{l=-\infty}^{\infty} A(u, l) \delta[t - \tau(u, l)] \quad (3.13)$$

при чему је A фактор слабљења, δ је Дираков импулс, τ је временско кашњење, а параметри $u(u, v, w)$ и $l(l, n, m)$ служе за контролу виртуелних извора (енгл. *Image*

sources) у свим димензијама. Фактор слабљења и временско кашњење су дефинисани као:

$$A(\mathbf{u}, \mathbf{l}) = \frac{\beta_{x,1}^{|l-u|} \beta_{x,2}^{|l|} \beta_{y,1}^{|m-v|} \beta_{y,2}^{|m|} \beta_{z,1}^{|n-w|} \beta_{z,2}^{|n|}}{4\pi d(\mathbf{u}, \mathbf{l})} \quad (3.14)$$

$$\tau(\mathbf{u}, \mathbf{l}) = \frac{d(\mathbf{u}, \mathbf{l})}{c} \quad (3.15)$$

где $d(\mathbf{u}, \mathbf{l})$ представља раздаљину од извора звука до пријемника, са β су означени рефлексioni коефицијенти, а c је означена брзина пропагације звука.

Код другог модела за синтезу импулсних одзива просторије, *ED*, базираног на примени класичног експоненцијалног опадања, импулсни одзив се добија применом следеће математичке формулације [50]:

$$h(t) = \text{sgn}(n_1(t)) \left[e^{-\frac{kt}{2T}} r(t) + \sqrt{a} n_2(t) \right] \quad (3.16)$$

при чему је $r(t)$ мултипликативни јединични случајни процес, a је снага шума, $n_1(t)$ и $n_2(t)$ су јединичне варијансе шума, T време реверберације и k константа једнака 13.81551. Сигнум функција (sgn) у изразу 3.16 може имати две вредности: -1 ако је $n_1(t) < 0$ и 1 ако је $n_1(t) \geq 0$.

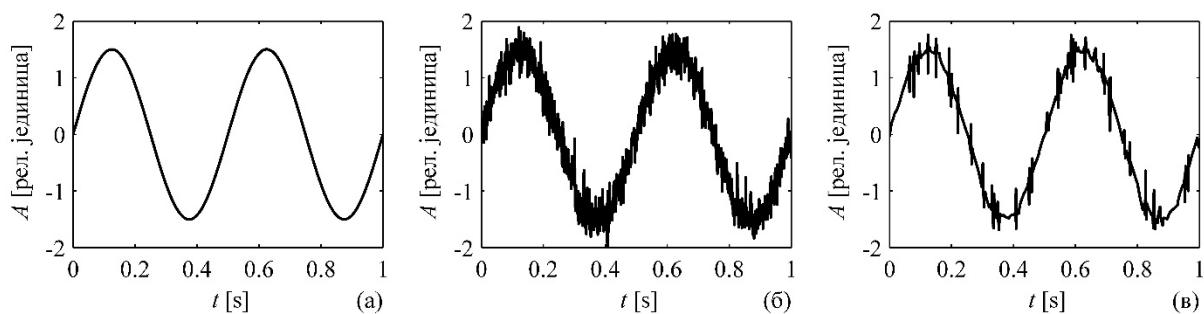
4. МЕТОДЕ ЗА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА ПРИМЕНОМ ТАЛАСИЋА

Таласићи налазе велику примену током задњих неколико деценија у пољу обраде сигнала, поготово ако се ради о отклањању шума из сигнала. Шум може да изазове многе проблеме ако се прати неки сигнал, поготово у самом облику сигнала. Поред таласића, данас су познате многе методе за анализирање и отклањање шума. И даље су актуелни филтри коначног и бесконачног импулсног одзива, адаптивни и оптимални филтри, *Notch* филтри [1–3, 9–13] и др. Све поменуте методе заједно са таласићима имају велику примену у сигналима и системима, телекомуникацијама, биомедицинском инжењерингу, енергетици, акустици, економији и многим другим научним пољима [1–3, 9–13].

Избор методе која ће се примењивати у многоме зависи и од врсте шума. У акустици су најзаступљеније две врсте шума: розе и бели шум [5–8]. Ова два шума ће бити коришћена и у овом истраживању, а њихов утицај на сигнале и облик ће бити објашњени касније.

Софтверске реализације алгоритама таласића су данас одлично развијене. У зависности од врсте примене и обраде примењују се различити програмски језици као што су: *C*, *C++*, *Python*, *Wolfram language*, *Java* и др [114, 115]. Када су у питању софтвери, ту се најчешће појављује *Matlab* софтверски пакет, али се доста употребљавају и *Scilab*, *WavBox*, *Octave*, *LabVIEW*, разни софтвери креирани на универзитетима широм света и многи други [114, 115]. Целокупна анализа и обрада сигнала у овом раду рађена је у софтверском пакету *Matlab*.

На Слици 4.1 приказана је примена таласића на зашумљен синусни сигнал.



Слика 4.1. Синусни сигнал у процесу отклањања шума: (а) сигнал без шума (б) сигнал са шумом (в) сигнал након употребе таласића

4.1. Коришћене *Matlab* функције

За анализу и обраду сигнала у овом раду се користи *Matlab* софтверски пакет и у наредним корацима биће објашњене функције од значаја [100, 116].

- *wden* – функција за аутоматско једнодимензионо отклањање шума из сигнала (филтрирање једнодимензионих сигнала).

Функција *wden* има следећу синтаксу:

$XD = wden(X, TPTR, SORH, SCAL, N, wname)$

где је:

- *X* – учитан сигнал који се обрађује;
- *TPTR* – правило избора прага (енгл. *Thresholding selection rule*);
- *SORH* – метода постављања прага (енгл. *Thresholding*);
- *SCAL* – ре-скалирање прага (енгл. *Threshold rescaling*);
- *N* – ниво декомпозиције (енгл. *Decomposition level*);
- *wname* – врста таласића.

Све функције које припадају одређеним методама су детаљно описане у секцији која дефинише појам таласића. Потребно је само дефинисати шта свака функција у себи садржи.

Правило избора прага има 4 опције које се могу поставити приликом употребе таласића, и то су:

- '*rigsure*' – једна од *sure* метода за правило избора прага;
- '*heursure*' – користи хеуристичку варијанту *sure* методе;
- '*sqtwolog*' – користи универзално правило избора прага $\sqrt{\log_e L}$, при чему је L дужина сигнала, то јест број одмерака;
- '*minimaxi*' – користи *minimax* правило избора прага.

Када се ради о типу, то јест методи постављања прага, постоје 2 опције:

- '*s*' – фино постављање прага (енгл. *Soft thresholding*);
- '*h*' – грубо постављање прага (енгл. *Hard thresholding*).

Ре-скалирање прага има 3 опције које могу да се одаберу:

- '*one*' – овом опцијом неће се вршити ре-скалирање;
- '*sln*' – ре-скалирање које користи естимацију нивоа шума на основу коефицијената првог нивоа;
- '*mln*' – ре-скалирање које користи естимацију нивоа шума која зависи од нивоа коефицијената.

Избор нивоа декомпозиције, који је наредни параметар у функцији *wden*, зависи од врсте таласића и сигнала који се обрађује. У случају *Haar* таласића ниво декомпозиције може да иде максимално до 15, док код других таласића може да има доста већу вредност. Ниво декомпозиције је детаљно објашњен у секцији која се односи на теорију таласића, где је приказано стабло таласића у процесу декомпозиције на коефицијенте детаља и апроксимације.

Последњи параметар који се појављује је *wname* и односи се на врсту, то јест фамилију таласића. У програмском пакету *Matlab* постоје следеће фамилије које се могу употребити [116, 117]: *Haar* (*haar* као функција у *Matlab*-у), *Daubechies* (*db* као функција у *Matlab*-у), *Coiflets* (*coif* као функција у *Matlab*-у), *Symlets* (*sym* као функција у *Matlab*-у), *biorthogonal* (*bior* као функција у *Matlab*-у), *reverse biorthogonal* (*rbio* као функција у *Matlab*-у) и дискретни *Meyer* (*dmey* као функција у *Matlab*-у). Поред ових постоје и друге фамилије, али се оне у овом истраживању нису употребљавале. Све поменуте фамилије таласића осим *Haar*-а и *Meyer*-а имају више врста у себи и означавају се бројевима уз име функције. На пример, за таласић *Daubechies* 2 ознака у *Matlab*-у је *db2*.

Иницијални скуп параметара од којих креће истраживање садржи *sqtwolog* правило избора прага, *Soft thresholding* или фино постављање прага и *mln* ре-скалирање. Креће се од *Haar* таласића и почетног нивоа декомпозиције, то јест нивоа 1.

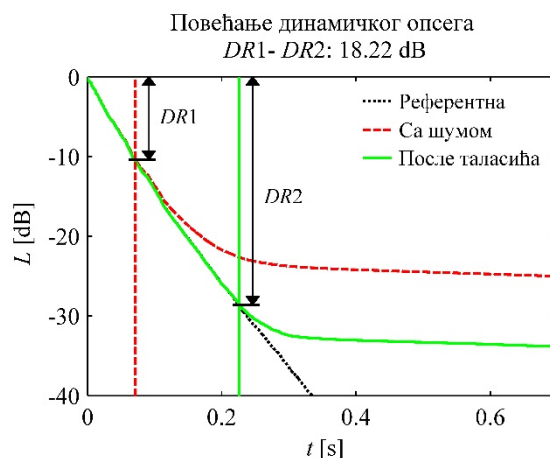
4.2. Дефинисање параметара за приказ резултата

Како би се приказали ефекти утицаја примене таласића у отклањању шума код импулсних одзива просторије потребно је било на почетку поставити одређене захтеве. Таласић ће у сваком случају извршити неки утицај на сигнал, али је такође важно знати до које мере и са којом групом параметара неће доћи до деформације сигнала, а да ефекат отклањања шума буде што већи. За анализу ефеката примене таласића су примењене три врсте сигнала импулсних одзива просторије: сигнал без шума, сигнал на који је додат шум (бели или розе) и сигнал добијен применом таласића над зашумљеним сигналом. Циљ читавог поступка је да се зашумљени сигнал након примене таласића што више приближи сигналу који у себи нема шум. Како би се знало да ли је процес био успешан или у којој мери је био успешан, праћени су одређени параметри.

Анализа је најпре била оријентисана ка временском и фреквенцијском домену, односно временским и фреквенцијским облицима ових сигнала. Из таквих приказа су се издвајали одређени закључци који ће бити поменути касније у анализи, али они нису били довољни за конкретна разматрања. Посебна пажња је стављена на повећање динамичког опсега (енгл. *Dynamic range improvement*) код кривих опадања, у даљем тексту само повећање динамичког опсега. Овај параметар је дао конкретне резултате (квантификацију ефеката) примене таласића у отклањању шума у импулсним одзивима просторије.

Израчунавање повећања динамичког опсега кривих опадања импулсног одзива просторија је рађено на начин приказан на Слици 4.2. Мера која се користи за одређивање ове величине је праг одступања криве опадања са шумом од криве опадања без шума. До оптималне вредности прага која на најбољи начин квантификује повећање динамичког опсега се дошло експерименталним путем где су различите вредности коришћене за праг одступања од 0.05 dB па све до 2 dB. Тако су за праг одступања

добијене вредности 0.2 dB и 0.3 dB које су коришћене у овде презентованом истраживању.



Слика 4.2. Рачунање повећања динамичког опсега као разлика између динамичких опсега кривих опадања са шумом пре и након употребе таласића

Како се криве опадања импулсних одзива са шумом и без шума (у даљем тексту референтна крива) поклапају у делу реверберантног опадања (од почетка криве до тачке када утицај шума постаје довољно велики), онда праг одступања даје тачку где се крива опадања одзива са шумом одваја од референтне криве. Од ове тачке (која се узима за крај динамичког опсега криве опадања) надаље је одступање криве са шумом од референтне криве веће од прага одступања. Криве опадања импулсних одзива су нормализоване тако да је њихова максимална вредност на почетку криве и она износи 0 dB (видети Сliku 4.2). Тако, динамички опсег криве опадања представља разлику између нивоа опадања у тренутку $t = 0$, дакле 0 dB, и нивоа опадања у крајњој тачки динамичког опсега где је разлика између референтне криве и криве са шумом већа од прага одступања. На овај начин се добија динамички опсег криве опадања са шумом (на коју није примењен таласић, и који је означен са $DR1$) и криве опадања са шумом на коју је примењен таласић (означен са $DR2$). Одузимањем другог динамичког опсега $DR2$ од првог динамичког опсега $DR1$ добија се вредност повећања динамичког опсега применом таласића. Ова вредност је параметар који показује праву слику утицаја таласића у процесу отклањања шума у импулсним одзивима просторије.

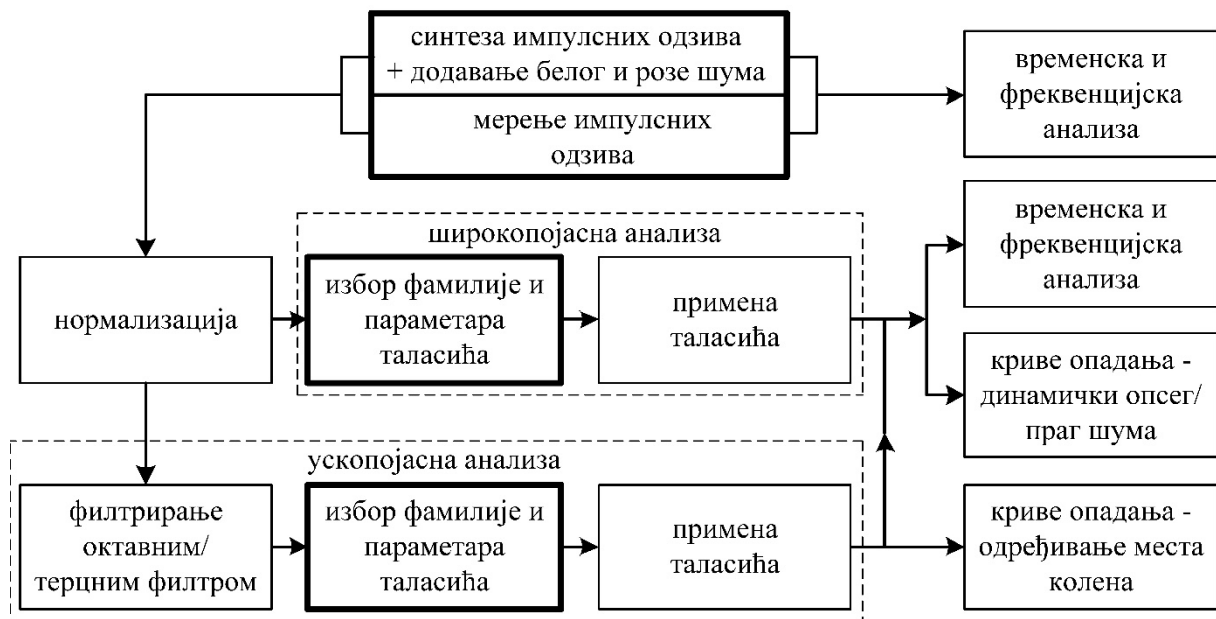
Други параметар који је коришћен за квантификацију ефеката примене таласића је базиран на прагу шума (енгл. *Noise floor*). Праг шума се рачуна преко нивоа средње

вредности енергије у децибелима у оном опсегу импулсног одзива где је доминантан шум. Како се ова величина израчунава пре и после примене таласића, разлика прага шума даје конкретну величину која се назива смањење прага шума:

$$R = 10 \log_{10}(E_{n1}) - 10 \log_{10}(E_{n2}) \quad (4.1)$$

где је са R означено управо смањење прага шума, E_{n1} је енергија шума одзива пре примене таласића, док је E_{n2} енергија шума одзива после примене таласића.

Описане методе за израчунавање повећања динамичког опсега и смањење прага шума код импулсних одзива просторије су имплементиране како код широкопојасних сигнала (импулсних одзива), тако и код ускопојасних одзива у опсезима октаве и терце. Поред поменутих анализа, одређивање места колена је такође у фокусу када је реч о примени таласића у обради импулсних одзива, али само код ускопојасних одзива. Целокупна анализа, која је детаљно приказана у наставку рада, представљена је и блок дијаграмом на Слици 4.3.



Слика 4.3. Блок дијаграм обраде импулсних одзива просторије применом таласића

4.3. Примена таласића над широкопојасним импулсним одзивима за отклањање шума

За анализу ефеката примене таласића за отклањање шума код широкопојасних импулсних одзива просторија, односно смањење негативних ефеката шума најпре су коришћени импулсни одзиви добијени симулационим алгоритмима (алгоритмима моделовања). Један од ових алгоритама је модел виртуелног извора, скраћено *ISM*. Други алгоритам је модел експоненцијалног опадања, скраћено *ED*. Оба модела су описана у претходном поглављу. Квантификација ефеката примене таласића на отклањању шума је вршена преко претходно поменутих параметара - повећања динамичког опсега и смањења прага шума импулсних одзива просторије.

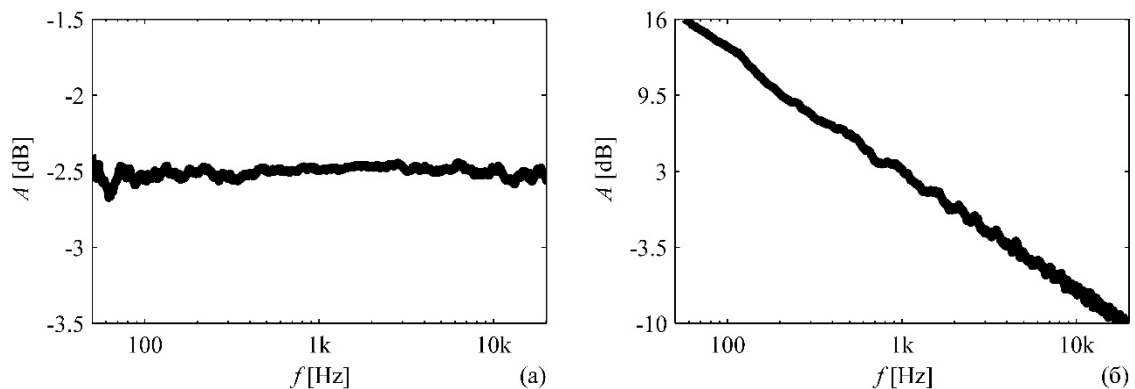
4.3.1. Врсте шума

Шум у акустици је важна појава која се мора узети у обзир приликом анализе сигнала, без обзира о којим врстама сигнала је реч. Оно што га највише карактерише су неправилне осцилације. Две врсте шума које се уобичајено јављају у акустици су бели и розе шум [5–8].

Бели шум, један од најчешћих шумова у природи генерално, може се наћи у скоро свакој области која се бави снимањем и обрадом неког сигнала (слика, звук, говор, струја, напон и др.). Ако се посматра фреквенцијски опсег, бели шум је широкопојасни, и у области чујног звука он је у интервалу од 20 Hz до 20 kHz, при чему се може дати закључак да бели шум покрива цео опсег чујних фреквенција [7, 8, 106]. Значајна одредница белог шума је да он има константну, то јест једнаку енергију на сваком делу спектра, односно једнаку енергију по једном херцу (видети Слику 4.4). На пример, бели шум има исту енергију у опсегу од 300 Hz до 301 Hz, као и у опсегу од 5200 Hz до 5201 Hz, односно на сваком опсегу ширине 1 Hz енергија је иста. Оно што је такође важно напоменути је и анализирање овог сигнала филтрима. Пошто ће у овом истраживању бити коришћени терцни и октавни филтри, важно је истаћи да ови филтри спадају у пропорционалне филтре чија ширина није иста на различитим фреквенцијама, већ се она повећава са повећањем централне фреквенције филтра. Ширина октавног

опсега постаје два пута већа са сваким удвостручавањем централне фреквенције филтра. Самим тим, ако би се бели шум посматрао по октави, његова енергија би порастом фреквенције у овом случају расла 3 dB по октави [106].

Розе шум, за разлику од белог шума, нема једнаку енергију по херцу, већ су компоненте на вишим фреквенцијама ослабљене [7, 8, 106]. Розе шум има већи утицај на нижим фреквенцијама, као што је и приказано на Слици 4.4. Основна карактеристика розе шума је да има једнаку енергију по октави. Ако би се розе шум анализирао терцним или октавним филтрима, његов ниво у терцним или октавним опсезима би био константан (анулирао би се поменути негативан нагиб, то јест слабљење са повећањем фреквенције). Из тог разлога се розе шум доста користи у акустичким мерењима.



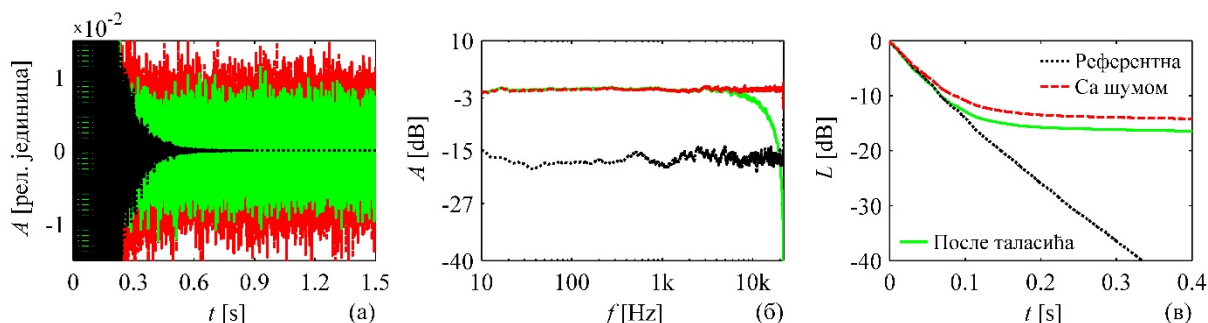
Слика 4.4. Спектрална престава: (а) белог шума, (б) розе шума

За анализе у овом раду су коришћена оба шума – бели и розе шум нивоа: -40 dB, -50 dB, -60 dB и -70 dB. Обе врсте шума су синтетизоване у програмском пакету *Matlab* користећи *rand* функцију при чему се формира случајан низ дужине исте као и сигнал који се анализира (у конкретном случају импулсни одзив просторије). Случајан низ се нормализује средњом апсолутном вредношћу низа. У случају белог шума, ниво шума је одређен параметром који има вредност $1/10^n$ чијим квадратним кореном се нормализовани случајан низ множи. Степен n одређује колико десетина децибела ниво шума иде у негативном смеру. На пример, ако је $n = 4$, онда овај параметар има вредност $1/10000 = 0.0001$, што одговара нивоу шума од -40 dB. Ниво розе шума добија своје вредности на исти начин као бели шум, с тим што је креирање случајног низа код розе шума нешто другачије јер се користи готова функција *pinknoise* из

софтверског пакета *Matlab* [118]. Функција *pinknoise* у својој основи такође садржи *rand* функцију.

4.3.2. Испитивање утицаја промене параметара таласића примењених за отклањање шума код широкопојасних импулсних одзива просторије

Почетна истраживања воде ка томе да је потребно пронаћи оптимални скуп параметара како би се добили најбољи резултати, то јест највећи пораст динамичког опсега кривих опадања, а истовремено прихватљиво мала деградација кривих опадања. Метода одређивања повећања динамичког опсега је претходно описана у секцији 4.2. Иницијални скуп параметара чине *sqtwolog* правило избора прага, фино постављање прага (*Soft thresholding*) и *mln* ре-скалирање, као и *Haar* таласић и ниво декомпозиције 1. На Слици 4.5 приказани су временски и фреквенцијски облици сигнала пре и након примене таласића са иницијалним сетом параметара као и криве опадања.

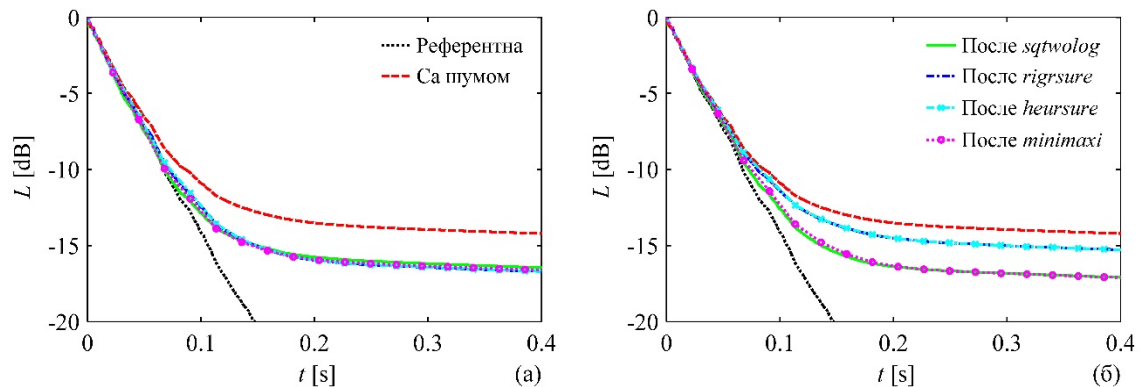


Слика 4.5. Примена *Haar* таласића за отклањање шума код синтетизованог импулсног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара таласића при нивоу декомпозиције 1: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања

Ако се сагледа детаљно Слика 4.5, може се видети да је таласић успео да изврши неки минимални утицај на зашумљени импулсни одзив (црвена крива). Шум код новодобијеног импулсног одзива (плава крива) има амплитуде које су нешто мање од вредности пре примене таласића и до одређеног степена се приближава референтном

импульсном одзиву (црна крива) који у себи нема шум. Повећање динамичког опсега је у овом случају, када се сагледају криве опадања на Слици 4.5 (в), мало и износи 1.61 dB. Таласић је успео да изврши утицај, али не у довољној мери што показује и фреквенцијски домен приказан на Слици 4.5 (б), где је само на крајњим високим фреквенцијама дошло до промене, док су компоненте на ниским фреквенцијама остале нетакнуте. Од иницијалног скупа параметара таласића треба доћи до оптималног сета мењајући параметре. У наредним корацима биће објашњени ефекти ове промене параметара.

Најпре је извршено испитивање утицаја промене правила избора прага, као и правила постављања прага. На Слици 4.6 приказани су ефекти промене поменутих параметара на кривама опадања.



Слика 4.6. Ефекат промене правила избора прага (*sqtwolog*, *rigsure*, *heursure*, *minimaxi*) приликом примене *Naar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са присутним белим шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 1: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага

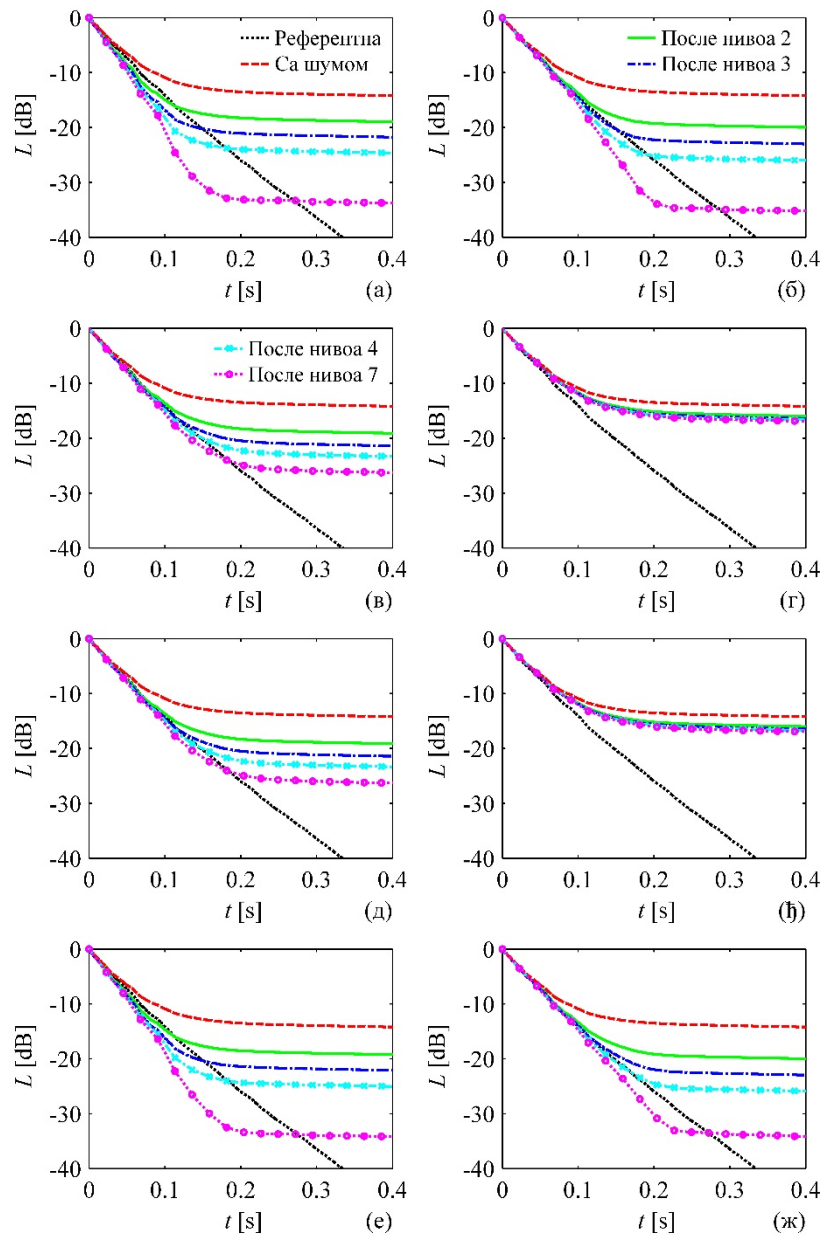
Ефекти промене правила избора прага на Слици 4.6 (а), када је фино постављање прага у фокусу, нису довели до значајних промена у повећању динамичког опсега. Посматрајући слику под (а), може се видети да се криве опадања добијене после примене таласића преклапају. Међутим, ако се повећање динамичког опсега израчуна на претходно описани начин, *rigsure* и *heursure* параметри су дали повећање око 4 dB, *sqtwolog* око 1 dB, а *minimaxi* око 7 dB. Одређене разлике код параметра повећања динамичког опсега показују да постоје мале разлике код кривих опадања које визуелно нису изражене. Наиме, криве опадања после примене таласића за различите опције промене правила избора прага на различитим местима прелазе дефинисан праг, па се

самим тим добијају различита повећања динамичког опсега. *Minimaxi* је у овом случају дао најбољи резултат (највеће повећање динамичког опсега).

Ако се сада постављање прага подеси на грубо, ситуација је видно другачија (Слика 4.6 (б)). *Rigsure* и *heursure* правила су имала готово идентичне резултате и када се сагледају криве и параметар повећање динамичког опсега, које је у овом случају око 0.5 dB. Криве опадања добијене *sqtwolog* и *minimaxi* привилима се визуелно поклапају, али се вредности повећања динамичког опсега разликују, и износе око 3 dB и 2 dB, респективно. Сагледавањем ефеката само два анализирана параметра, *fino* (*soft*) постављање прага је дало нешто боље резултате него грубо (*hard*) постављање прага, али треба узети у обзир да нису сви параметри таласића испитани.

У претходно наведеним случајевима није се мењао ниво декомпозиције, то јест декомпозиција се вршила само на нивоу 1. Пошто одређени параметри не могу да утичу на сигнал како се очекује на нивоу декомпозиције 1, потребно је испитати шта се дешава када се мења ниво декомпозиције, а да при томе остали параметри остану непромењени. На Слици 4.7 дат је приказ ефеката промене нивоа декомпозиције за све врсте правила избора прага и *fino* и грубог постављања прага при примени таласића на импулсни одзив са белим шумом који је коришћен и у претходним случајевима.

Резултати приказани на Слици 4.7 су врло незахвални за визуелну анализу. Наиме, и ако на први поглед одређена комбинација параметара даје јако добар резултат, то се манифестује кроз повећање динамичког опсега. У оваквим примерима смањење прага шума може бити значајно. Међутим, паралелно са смањењем шума се јавља и значајна деградација главног дела опадања што се рефлектује кроз недовољно повећање динамичког опсега у свим приказаним случајевима. У прилог томе говори и Табела 4.1.



Слика 4.7. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 2, 3, 4, 7) и различитих правила избора прага код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi*

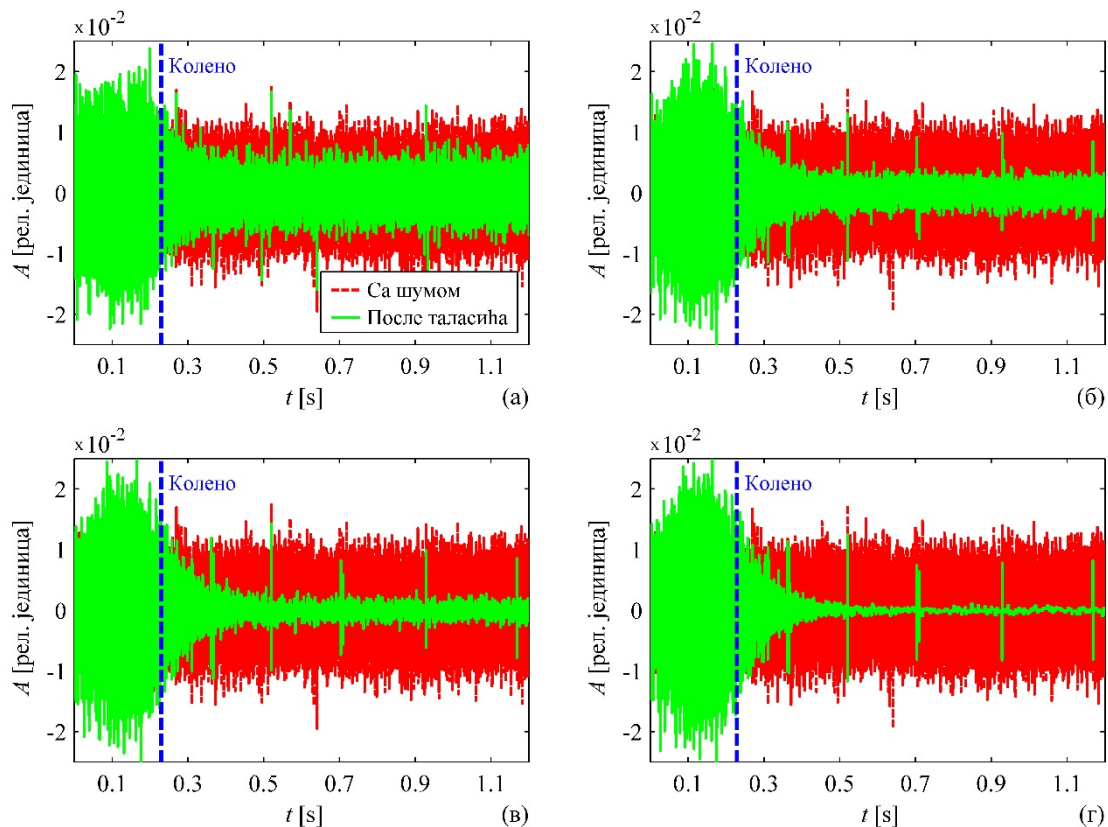
Табела 4.1. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.7, где импулсни одзив садржи бели шум нивоа -50 dB

	фино постављање прага				грубо постављање прага			
правило избора прага	ниво 2	ниво 3	ниво 4	ниво 7	ниво 2	ниво 3	ниво 4	ниво 7
<i>sqtwolog</i>	-1.5 dB	-1.8 dB	-1.8 dB	-2 dB	10 dB	6 dB	4.3 dB	3.3 dB
<i>rigrsure</i>	9.75 dB	1 dB	0.45 dB	0.05 dB	0.95 dB	1.2 dB	1.37 dB	1.5 dB
<i>heursure</i>	9.75 dB	1 dB	0.45 dB	0.05 dB	0.95 dB	1.2 dB	1.37 dB	1.5 dB
<i>minimaxi</i>	-0.94 dB	-1.4 dB	-1.6 dB	-1.6 dB	5.76 dB	12.2 dB	9.9 dB	6.6 dB

Из Табеле 4.1 се могу донети одређени закључци на основу добијених вредности повећања динамичког опсега. Генерално гледано, први закључак би се односио на параметар таласића - постављање прага. Према приказаним вредностима, правила избора прага која припадају групи *sure* алгоритама (*rigrsure* и *heursure*) дају значајно боље резултате када је фино постављање прага. Ова два параметра дају исте резултате, што је и разумљиво имајући у виду њихову дефиницију да они настају из исте методе и групације *sure* алгоритама, што и доводи до сличних или истих резултата. *Sqtwolog* и *minimaxi* правила избора прага су се боље показала у случају грубог постављања прага. Ова правила избора прага су у случају финог постављања прага дала негативне вредности повећања динамичког опсега, што би значило да се код криве опадања добијене после примене таласића одступање од референтне криве (без шума) за више од дефинисаног прага (од 0.2 dB) јавља раније (ближе почетку одзива) него код криве опадања пре примене таласића.

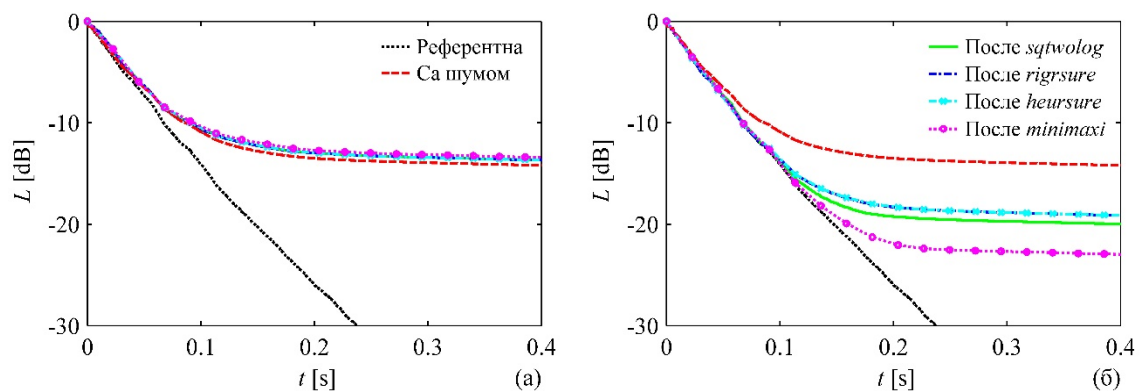
Највеће повећање динамичког опсега је дало *minimaxi* правило избора прага на нивоу декомпозиције 3 и то 12.2 dB, при чему је изабрано грубо постављање прага. Такође, поменута комбинација параметара на свим нивоима декомпозиције имала је укупно гледано најбоље резултате. У целокупној анализи показује се да ова комбинација даје најбоље резултате за различите врсте таласића као и различите врсте импулсних одзива просторије. *Sqtwolog* је имао као највеће повећање динамике 10 dB на нивоу декомпозиције 2 и грубом постављању прага, док су *sure* правила избора прага имала повећање динамичког опсега од 9.75 dB такође на нивоу 2, али на фином постављању прага. У свим случајевима је примењен *Haar* таласић, друге фамилије таласића ће бити анализирани у наставку рада.

Интересантно је видети ефекат промене нивоа декомпозиције у временском домену, то јест како различит ниво декомпозиције утиче на импулсни одзив у временском домену. У овом случају је коришћен следећи скуп параметара таласића: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага, *mln* ре-скалирање и *Haar* таласић. Нивои декомпозиције су исти као у Табели 4.1, а синтетизованом одзиву је додат бели шум нивоа -50 dB. Ефекти су приказани на Слици 4.8, при чему су дати импулсни одзиви и пре и после колена у сва четири случаја. Сагледавајући Сliku 4.8, интересантно је да у делу испред колена утицај таласића је скоро неприметан и да таласић тек након колена почиње да смањује утицај шума и импулсни одзив се приближава референтном одзиву без шума. Треба поменути да се код неких одзива после примене таласића (чак и при већим нивоима декомпозиције) јављају повећане амплитуде шума (пикови) у делу где је шум доминантан (иза колена).



Слика 4.8. Разлике синтетизованог импулног одзива просторије са белим шумом нивоа -50 dB у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 2, (б) 3, (в) 4, (г) 7

У свим претходним случајевима ре-скалирање је било постављено на *mln*. Овај параметар је и донекле био логичан избор јер се у самој дефиницији каже да се ре-скалирање врши на основу естимације нивоа буке која зависи од нивоа коефицијената, што је у овом случају добра опција. Постоје и друге две опције за ре-скалирање, а то су: *one* (која не врши ре-скалирање) и *sln* (ре-скалирање које користи естимацију нивоа буке на основу коефицијената првог нивоа). У наставку ће ове две опције бити испитане у комбинацији нивоа декомпозиције и правила избора прага која су дала највеће повећање динамичког опсега у Табели 4.1 (видети Сliku 4.9).



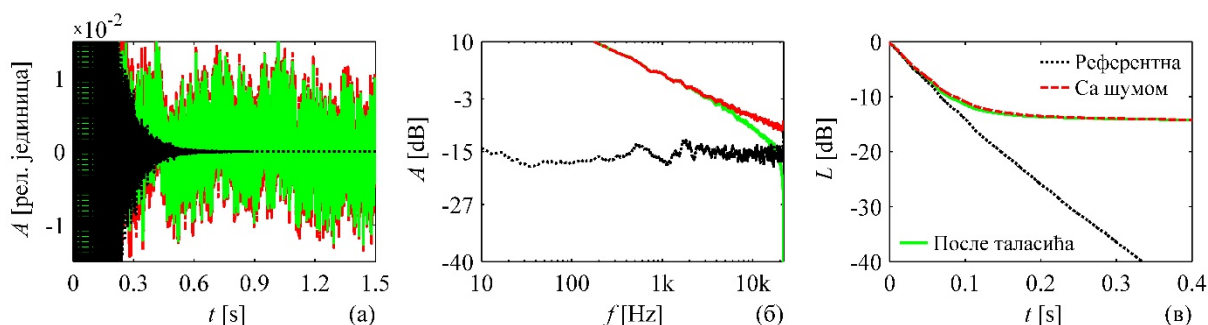
Слика 4.9. Ефекти на криве опадања примене *Haar* таласића за сва 4 правила избора прага са различитим нивоом декомпозиције (*sqtwolog* и ниво 2, *rigrsure* и ниво 2, *heursure* и ниво 2, *minimaxi* и ниво 3) на синтетизовани импулсни одзив просторије са белим шумом нивоа -50 dB: (а) *one* ре-скалирање (б) *sln* ре-скалирање

Први закључак на основу Слике 4.9 (а) је тај да је *one* ре-скалирање дало најлошије резултате у досадашњој анализи. Све криве опадања након примене таласића су изнад криве са шумом пре примене таласића. У овом случају повећање добитка динамике је негативно и визуелно и после израчунавања параметра повећање динамичког опсега и то за сва четири правила избора прага. Ако се посматра други случај на Слици 4.9 (б), ситуација је потпуно другачија. *Sln* ре-скалирање је дало потпуно другачије резултате, при чему је повећање динамичког опсега: *sqtwolog*, ниво 2 и грубо постављање прага: 10 dB; *rigrsure*, ниво 2 и грубо постављање прага: 9.75 dB; *heursure*, ниво 2 и грубо постављање прага: 9.75 dB; *minimaxi*, ниво 2 и грубо постављање прага: 12.48 dB. За *sqtwolog*, *rigrsure* и *heursure* параметре и *sln* ре-скалирање ситуација је практично иста као и код *mln* ре-скалирања, док је код *minimaxi* правила избора прага ситуација мало боља, за неких 0.28 dB.

Генерални закључак је да се *one* ре-скалирање (када нема ре-скалирања) не треба користити за отклањање шума из импулсних одзива просторије. *Sln* ре-скалирање води до значајних резултата и треба га узети у обзир у даљој анализи без обзира што би по дефиницији *mln* ре-скалирање било адекватније за описан поступак отклањања шума.

4.3.3. Додавање розе шума синтетизованим импулсним одзивима

Досадашње анализе су вршене над синтетизованим импулсним одзивима просторије са белим шумом нивоа -50 dB. Касније ће бити разматран утицај промене нивоа шума. У овој подсекцији се врши испитивање ефеката отклањања шума применом таласића када синтетизовани импулсни одзиви просторије садрже розе шум. Анализа и овде прати редослед који је урађен код претходно приказаних случајева одзива са белим шумом. Најпре се приказују импулсни одзиви у временском и фреквенцијском домену пре и после примене таласића (видети Сliku 4.10).

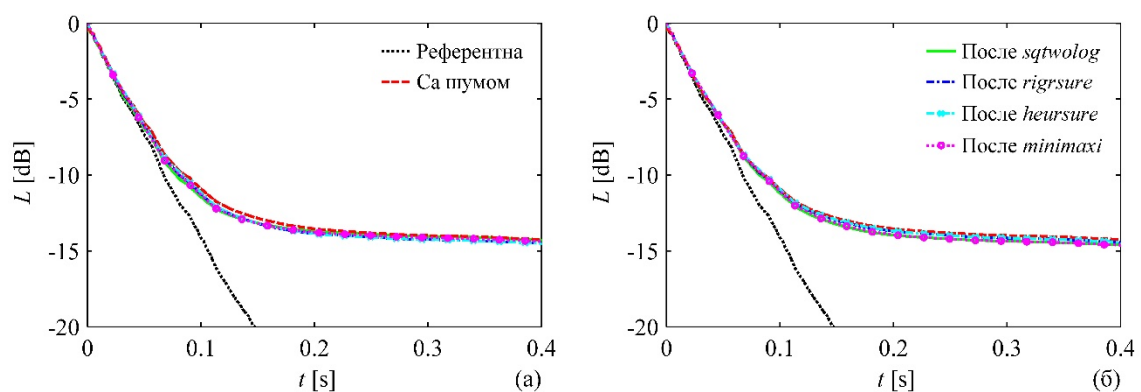


Слика 4.10. Примена *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара, при нивоу декомпозиције 1: (а) временски домен иза колена, (б) фреквенцијски домен, в) криве опадања

На Слици 4.10 је приказана слична ситуација као на Слици 4.5, с тим што се сада посматра утицај примене таласића на импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа - 50 dB. Оно што се одмах може уочити је другачији спектар розе шума у односу на спектар белог шума (спектар розе шума, а тиме и импулсног одзива иза колена опада са порастом фреквенције, као што је то случај и код самог шума (Слика 4.4)). Иницијални

скуп параметара таласића није донео нека конкретна визуелна побољшања у погледу повећања динамичког опсега. Међутим, ипак се добија одређено повећање динамичког опсега које износи око 2 dB, што није велика вредност, али помак постоји. Таласић је и у овом случају утицао на високе фреквенције, што се види из спектра сигнала.

Наредни корак је испитивање ефеката промене параметара таласића, и то промене правила избора прага, као и правила постављања прага. На Слици 4.11 приказани су ефекти промене поменутих параметара на кривама опадања импулсних одзива просторије.

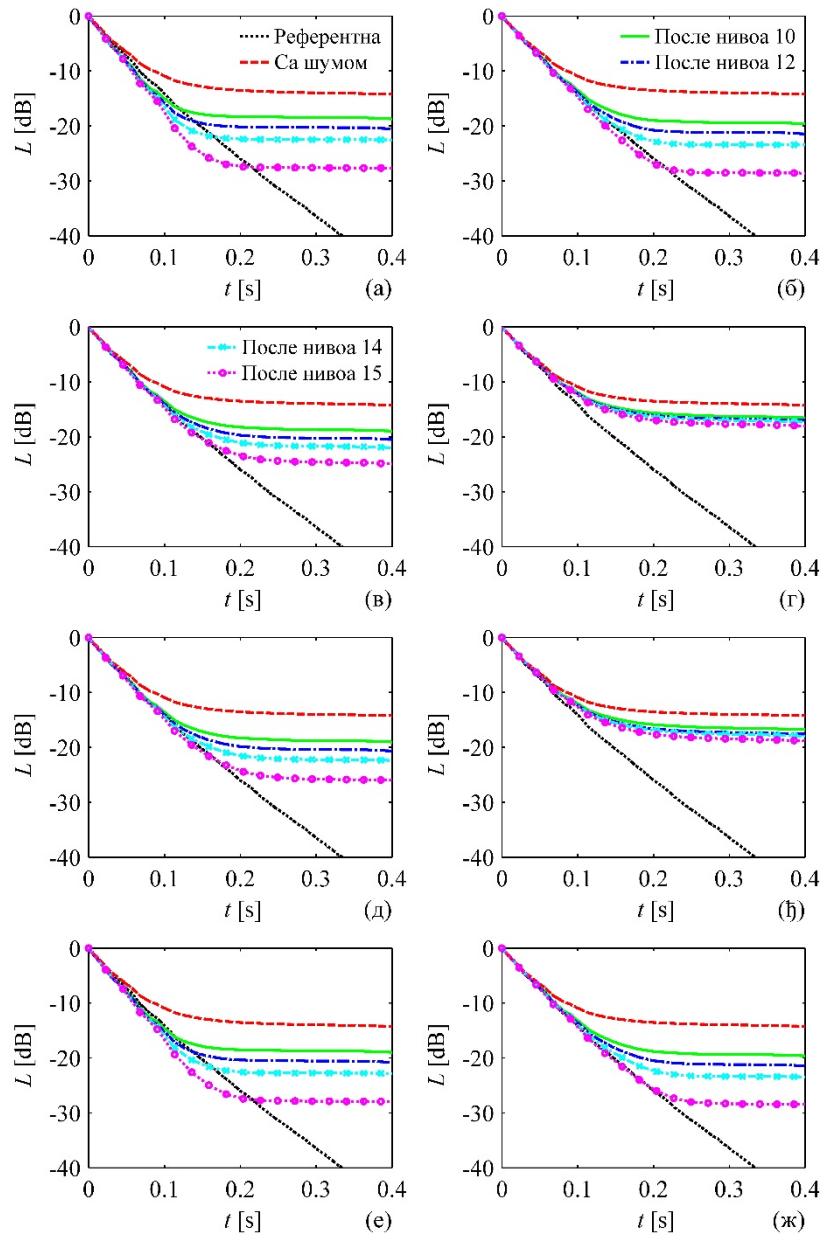


Слика 4.11. Ефекат промене правила избора прага (*sqtwolog*, *rigrsure*, *heursure*, *minimaxi*) код кривих опадања приликом примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 1 за: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага

За разлику од одзива са белим шумом, код одзива са розе шумом и за фино и за грубо постављање прага добијају се мања повећања динамичког опсега када се користи иницијални скуп параметара таласића. Криве опадања након примене таласића готово да се поклапају са кривом пре примене таласића. Повећање динамичког опсега је врло мало и износи око 2 dB за *sqtwolog* и *minimaxi* правило избора прага на фином постављању прага. За све остале комбинације параметара таласића, повећање динамичког опсега не прелази 1 dB.

Значајан закључак истраживања утицаја примене таласића на отклањање шума код импулсних одзива просторије са розе шумом је тај да ниво декомпозиције има велику улогу. Код одзива са розе шумом је потребно користити виши ниво

декомпозиције, на пример 10, 12, 14 и 15 (видети Сliku 4.12 и Табелу 4.2). Остали параметри таласића су исти као и на Слици 4.7, дакле као код одзива са белим шумом.



Слика 4.12. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 10, 12, 14, 15) и различитих правила избора прага код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigrsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi*

Табела 4.2. Приказ повећања динамичког опсега за све комбинације параметара таласића са Сlike 4.12 када се *Haar* таласић примени на синтетизовани импулсни одзив са розе шумом нивоа -50 dB

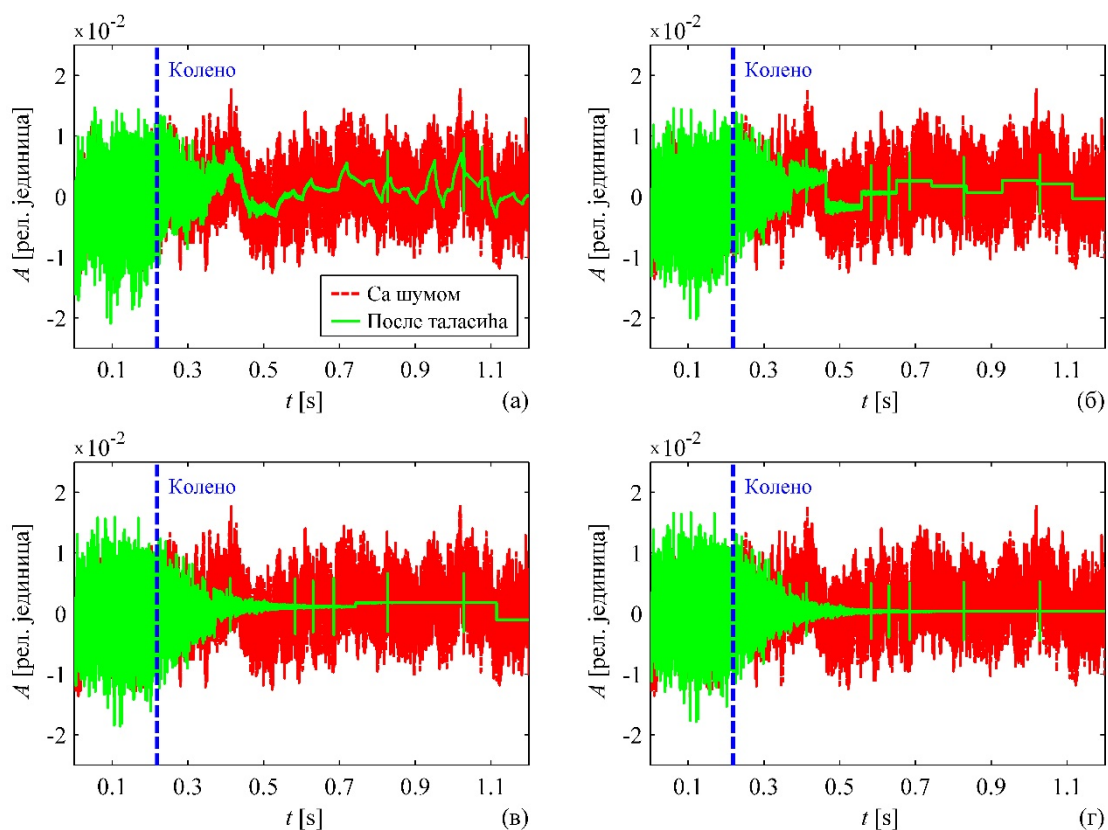
	фино постављање прага				грубо постављање прага			
правило избора прага	ниво 10	ниво 12	ниво 14	ниво 15	ниво 10	ниво 12	ниво 14	ниво 15
<i>sqtwolog</i>	-1.36 dB	-1.38 dB	-1.44 dB	-1.5 dB	7 dB	11.15 dB	10.65 dB	6.31 dB
<i>rigrsure</i>	9 dB	11.51 dB	2.71 dB	1.94 dB	1.29 dB	1.63 dB	1.92 dB	2.33 dB
<i>heursure</i>	9 dB	6.41 dB	2.41 dB	1.78 dB	1.5 dB	2 dB	2.4 dB	2.96 dB
<i>minimaxi</i>	-0.7 dB	-0.73 dB	-0.88 dB	-0.96 dB	4.87 dB	7.32 dB	11.67 dB	11.9 dB

Резултати добијени на Слици 4.12 и Табели 4.2 су врло интересантни у поређењу са резултатима који су добијени код синтетизованих импулсних одзива са белим шумом. Ако се прво посматра Слика 4.12, најстабилнији резултати се добијају са *rigrsure* и *heursure* правилима избора прага и финим постављањем прага, такође и *minimaxi* правилом са грубим постављањем прага. Могу се издвојити два карактеристична облика кривих опадања после примене таласића. Први од њих се односи на криве које имају сличан тренд као криве пре примене таласића. Дакле, ове криве прате референтну криву без шума до одређеног нивоа опадања. Испод тог нивоа (иза одређене тачке), крива опадања мења нагиб, он постаје мањи и крива иде изнад референтне криве опадања. Други карактеристичан облик кривих опадања после примене таласића је такав да крива после примене таласића најпре прати референтну криву до одређеног нивоа иза кога она иде испод референтне криве. Код оваквих кривих је смањење прага шума веће, али је такође и деградација главног дела опадања већа. Најстабилнији резултати су добијени за *rigrsure* и *heursure* правила избора прага и фино постављање прага, као и *minimaxi* избор прага са грубим постављањем прага.

Сагледавајући резултате приказане у Табели 4.2, може се закључити да *minimaxi* правило за избор прага са грубим постављањем прага даје доста добре резултате где је највеће повећање динамичког опсега 11.9 dB на нивоу декомпозиције 15. Крива опадања у овом случају прати референтну криву опадања до одређеног нивоа, не прелази испод референтне криве и од одређеног тренутка у времену, односно нивоа опадања, наставља паралелно са зашумљеном кривом опадања. И на осталим приказаним нивоима декомпозиције, *minimaxi* правило са грубим постављањем прага је показало завидне резултате. Што се осталих резултата тиче, треба издвојити *sqtwolog*

правило које је такође за ниво декомпозиције 12 и 14 имало значајна повећања динамичког опсега, 11.15 dB и 10.65 dB, респективно, као и *rigrsure* са финим постављањем прага које је дало повећање динамичког опсега 9 dB и 11.51 dB на нивоима декомпозиције 10 и 12, респективно, и *heursure* правило такође са финим постављањем прага повећање динамичког опсега 9 dB на нивоу декомпозиције 10. Генерално гледано, употреба таласића у смањењу утицаја розе шума из импулсних одзива просторија је валидна опција и доноси значајна побољшања динамичког опсега криве опадања. Оно што још треба нагласити је да *rigrsure* и *heursure* правила избора прага нису имали исте резултате осим на нивоу 9 са финим подешавањем прага.

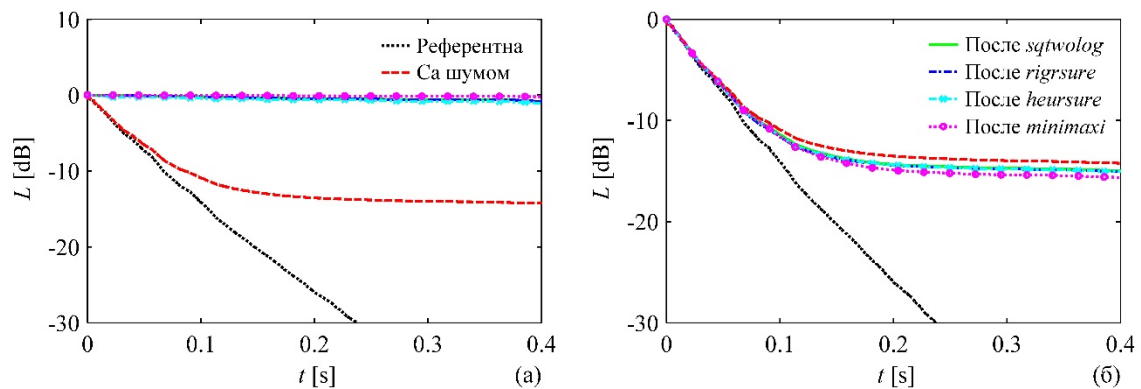
Као и на Слици 4.8, и овде ће бити дат приказ импулсних одзива пре и после употребе таласића у временском домену, при чему ће импулсни одзиви бити приказани цели, а не само од колена до краја одзива (видети Сliku 4.13).



Слика 4.13. Разлике синтелизованог импулсног одзива просторије са розе шумом нивоа -50 dB у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 10, (б) 12, (в) 14, (г) 15

Скуп параметара таласића је остао исти, с тим што се ниво декомпозиције за розе шум променио и износи: 10, 12, 14 и 15. Код одзива са розе шумом, импулсни одзив после примене таласића у делу иза колена брже тежи нултој вредности у односу на случај белог шума. Разлог овакве појаве је чињеница да се за розе шум користио знатно виши ниво декомпозиције. И код розе шума, као и код белог шума, утицај примене таласића готово да не постоји, што је јако значајно својство које показује да је деградација сигнала опадања прихватљиво мала.

У наредним корацима је истражен утицај промене параметра који се односи на ре-скалирање. До сада је била коришћена опција *mln* за ре-скалирање. Потребно је испитати и *one* и *sln* ре-скалирање. Утицај промене ре-скалирања ће бити испитан на оним подешавањима која су до сада дала најбоље и најстабилније резултате (видети Сliku 4.12 и Табелу 4.2).



Слика 4.14. Ефекти промене правила избора прага са различитим нивоом декомпозиције (*sqtwolog* и ниво 12, *rigrsure* и ниво 12, *heursure* и ниво 10, *minimaxi* и ниво 15) код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизован импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB: (а) *one* ре-скалирање (б) *sln* ре-скалирање

И код присутног розе шума, *one* ре-скалирање није дало повољне резултате и као такво неће се даље разматрати. Све криве опадања добијене након примене таласића су позициониране изнад криве са шумом, што показује негативан тренд, где се добија негативно повећање динамичког опсега, односно његово смањење (Слика 4.14 (а)). Ре-скалирање применом опције *sln* такође није дало добре резултате, где се повећање динамичког опсега кретало између 1 и 2 dB, што је у поређењу са

результатима из Табеле 4.2 мало повећање. Генерално, *mln* ре-скалирање води до најбољих резултата, односно највећег повећања динамичког опсега.

Генерални закључак читаве анализе би био да оптимални скуп параметара таласића који је заједнички за бели и розе шум у импулсном одзиву просторије чине: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање. *Naar* таласић је коришћен у свим случајевима до сада, и треба посебно обратити пажњу какве ће ефекте изазвати друге фамилије таласића. Ниво декомпозиције не може имати исту вредност за бели и розе шум, тако да не постоји јединствена оптимална вредност, већ она зависи од врсте шума.

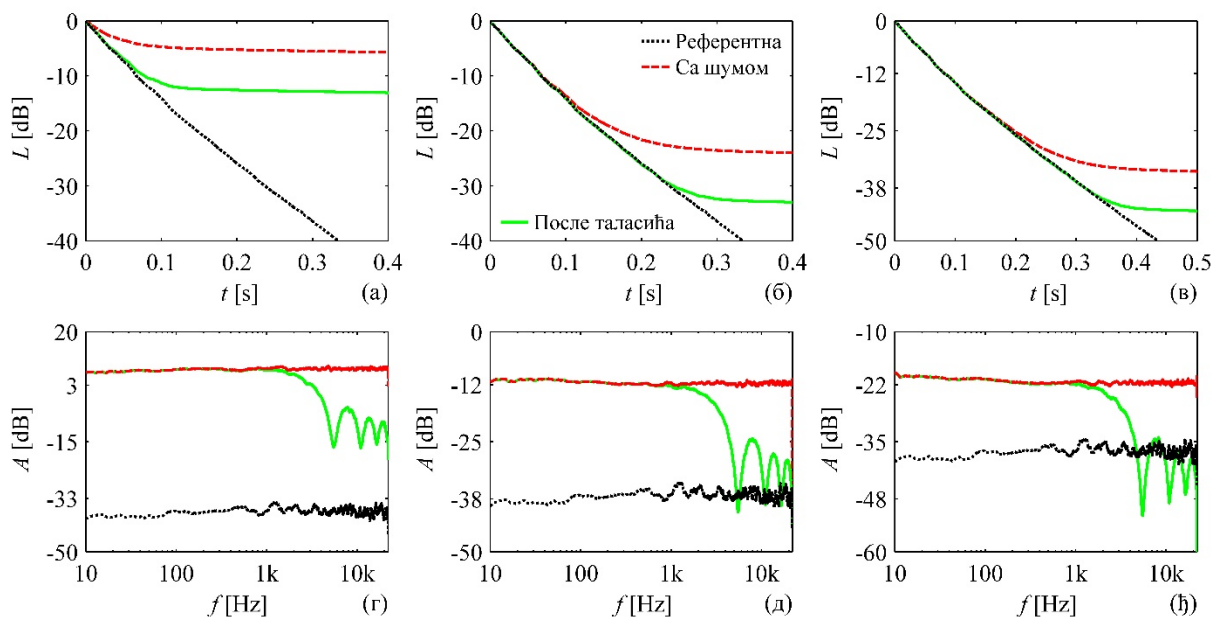
4.3.4. Ефекат промене нивоа шума

У свим претходним случајевима, било да се ради о белом или розе шуму, ниво шума је био увек исти и износио је -50 dB. Потребно је испитати и какав утицај таласић има када импулсни одзив просторије садржи шум другог нивоа. За ту намену су коришћени нивои шума: -40 dB, -60 dB и -70 dB. У Табели 4.3 дати су резултати повећања динамичког опсега енергетске криве опадања за 3 нивоа шума при чему је у свим случајевима коришћен *Naar* таласић, као и у претходним случајевима.

Табела 4.3. Приказ повећања динамичког опсега после примене таласића на импулсни одзив просторије када одзив садржи бели и розе шум нивоа -40 dB, -60 dB и -70 dB

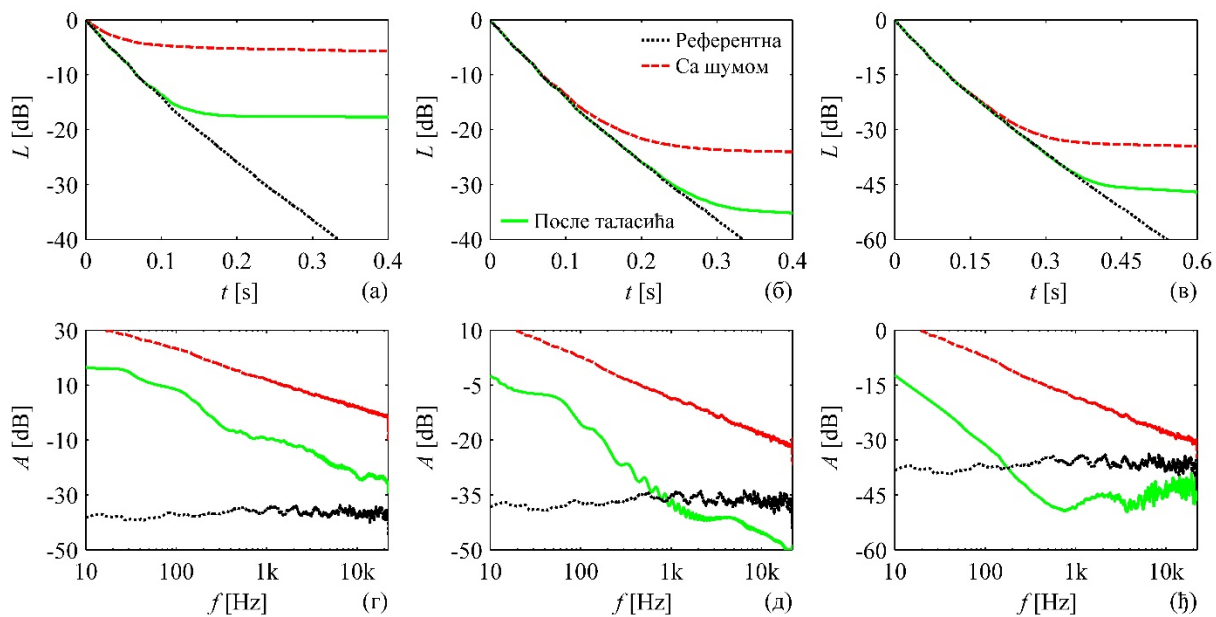
врста шума	ниво шума (појединачни случај)			ниво шума (10 просечних вредности)		
	-40 dB	-60 dB	-70 dB	-40 dB	-60 dB	-70 dB
бели шум	11.92 dB	18.99 dB	19.67 dB	10.83 dB	18.34dB	13.14 dB
розе шум	11.99 dB	17.59 dB	21.54 dB	9.41dB	16.59 dB	16.13 dB

Резултати дати у Табели 4.3 су графички приказани на Сликама 4.15 и 4.16. Ефекат промене нивоа белог шума је приказан на Слици 4.15, где су представљене криве опадања пре употребе таласића, после употребе таласића и референтна крива опадања, као и одговарајући спектри сигнала. Исти принцип је примењен и за розе шум на Слици 4.16.



Слика 4.15. Ефекат промене нивоа белог шума код примене *Haar* таласића са оптималним скупом параметара на синтетизовани импулсни одзив у отклањању шума: (а) криве опадања и (г) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -40 dB; (б) криве опадања и (д) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -60 dB; (в) криве опадања и (е) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -70 dB

Треба истаћи да је ниво декомпозиције није био исти за све случајеве. Када је бели шум у питању, ниво декомпозиције је 4, 3 и 3 за нивое шума -40 dB, -60 dB и -70 dB, респективно, док је код розе шума ниво декомпозиције 15, 14 и 14 за нивое шума -40 dB, -60 dB и -70 dB, респективно. Параметри примењеног *Haar* таласића су: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање.



Слика 4.16. Ефекат промене нивоа розе шума код примене *Haar* таласића са оптималним скупом параметара на синтетизовани импулсни одзив у отклањању шума: (а) криве опадања и (г) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -70 dB; (б) криве опадања и (д) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -60 dB; (в) криве опадања и (ж) одговарајући спектри сигнала за шум нивоа -40 dB

4.3.5. Ефекат промене фамилије таласића

Већ је поменуто да постоји више фамилија таласића од којих чак неке имају више различитих алгоритама које се могу употребити за различите намене. У свим претходно описаним случајевима је коришћен *Haar* таласић и он има само један алгоритам. *Haar* таласић по својој структури је исти као прва варијанта *Daubechies* таласића или *db1*. Поред њега, исти је случај и са дискретним *Meyer* таласићем који такође има само једну варијанту. Поред њих постоје и: *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* таласићи који ће бити анализирани у овом раду. Математички модел и таласни облик свих поменутих фамилија представљен је у секцији где су детаљно обрађени таласићи. Када се сагледају појединачне фамилије у *Matlab* програмском пакету, *Daubechies* фамилија има 45 различитих варијација, *Coiflets* фамилија има 5 различитих варијација, *Symlets* фамилија, која је модификована варијанта *Daubechies* фамилије, има 44 различите варијације (једну мање од *Daubechies* фамилије), *biorthogonal* и *reverse biorthogonal* имају по 15 различитих варијација [117].

У овом раду нису све варијације таласића употребљене, већ само одређене које ће у даљем тексту бити наведене.

Одређене фамилије таласића које су се такође годинама уназад развијале и имплементирале у разне софтверске пакете (па са њима и *Matlab* пакету) су: *Gaussian*, *Complex Gaussian*, *Mexican hat*, *Morlet*, *Complex Morlet*, *Shannon*, *Fejer-Korovkin* и *Frequency B-Spline* [117]. И неке од ових фамилија таласића имају више варијација, а неке само једну, на пример *Shannon*.

Испитивање ће бити урађено употребом белог и розе шума нивоа -50 dB на синтетизовани импулсни одзив просторије који је до сада био коришћен са оптималним скупом параметара таласића и нивоом декомпозиције који је дао најбоље резултате за овај случај. Како би се резултати са другим фамилијама таласића упоредили, треба се подсетити да *Haar* таласић са оптималним скупом параметара је довео до повећања динамичког опсега од 12.2 dB за бели шум и 11.9 dB за розе шум.

Пошто су криве опадања врло сличне за све фамилије таласића, у наредним редовима биће приказани само најинтересантнији резултати, а повећање динамичког опсега за све примењене таласиће ће бити приказано у Табели 4.4.

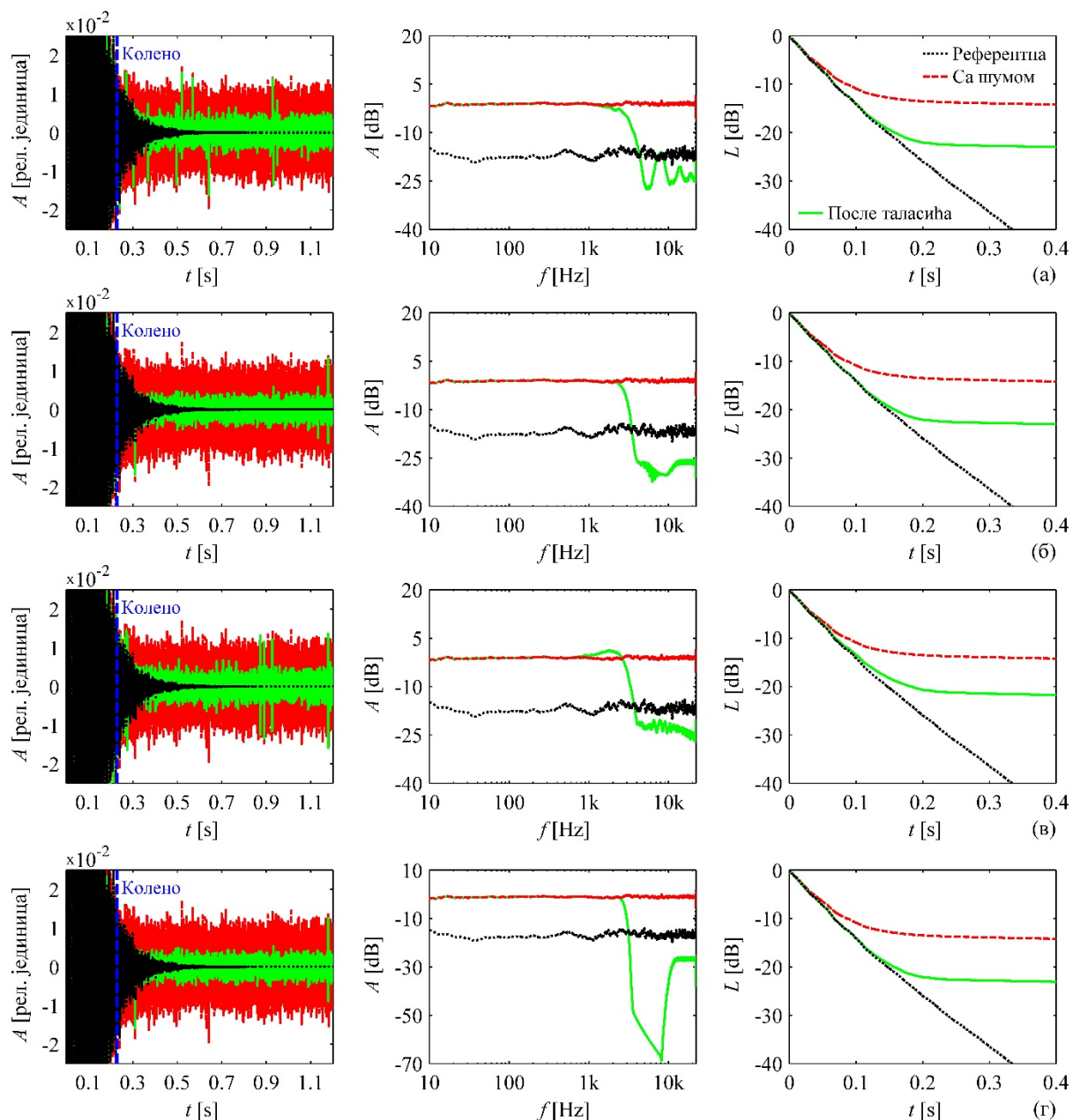
Табела 4.4. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића када импулсни одзив садржи бели и розе шум нивоа -50 dB

	повећање динамичког опсега				
	<i>Daubechies</i> 1	<i>Daubechies</i> 2	<i>Daubechies</i> 4	<i>Daubechies</i> 6	<i>Daubechies</i> 8
бели шум	12.24 dB	13.13 dB	12.78 dB	13.29 dB	13.33 dB
розе шум	11.9 dB	8.88 dB	5.74 dB	4.72 dB	3.3 dB
	<i>Daubechies</i> 15	<i>Coiflet</i> 3	<i>Coiflet</i> 5	<i>Symlet</i> 2	<i>Symlet</i> 8
	бели шум	13.48 dB	13.16 dB	13.33 dB	13.13 dB
розе шум	3.5 dB	5.37 dB	6.52 dB	8.88 dB	7.58 dB
	<i>Symlet</i> 15	<i>biorthogonal</i> 1.1	<i>biorthogonal</i> 1.5	<i>biorthogonal</i> 2.8	<i>biorthogonal</i> 3.3
	бели шум	13.25 dB	12.24 dB	11.29 dB	11.9 dB
розе шум	7.86 dB	11.9 dB	7.73 dB	7.69 dB	1.31 dB
	<i>reverse biorthogonal</i> 1.1	<i>reverse biorthogonal</i> 2.2	<i>reverse biorthogonal</i> 4.4	<i>reverse biorthogonal</i> 5.5	дискретни <i>Meyer</i>
	бели шум	12.24 dB	10.78 dB	12.82 dB	12.24 dB
розе шум	11.9 dB	9.99 dB	7.98 dB	2.92 dB	3.57 dB

На основу Табеле 4.4, могу се извести неколико закључака. *Daubechies* 1 је дао исти резултат у повећању динамичког опсега за обе врсте шума као и *Haar* таласић што је и логично јер су та два алгоритма иста. *Daubechies* и *Symlets* таласићи дају јако сличне резултате када се примене на импулсне одзиве са белим шумом. Разлог оваквих резултата је чињеница да је *Symlet* модификована варијанта *Daubechies* таласића.

Сви таласићи коришћени за анализу су дали јако добре резултате за бели шум, осим *biorthogonal* 3.3 који је био доста лошији од осталих у погледу повећања динамичког опсега (које је било дупло мање него код других таласића). Приказани резултати за бели шум могу се посматрати и са аспекта стабилности, тако да је бели шум код широкопојасних импулсних одзива могуће лакше третирати таласићима од розе шума. Ситуација за розе шум је доста другачија јер се добијају лошији резултати применом *Haar* таласића у односу на резултате добијене за бели шум. По питању стабилности добијених резултата издваја се неколико варијација и то: *Daubechies* 1 и 2, *Symlet* 2, *biorthogonal* 1.1 и *reverse biorthogonal* 1.1 и 2.2. При томе нису приказани резултати свих могућих таласића којих има преко 100, и да одређене комбинације могу да дају и добре и лоше резултате зависно од самог импулсног одзива просторије. То онда указује да такве комбинације нису довољно робусне.

На Сликама 4.17 и 4.18 приказани су поједини издвојени случајеви ефеката промене таласића у сва три приказа: временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања. Слика 4.17 приказује утицај 4 различита таласића на отклањање белог шума. Ако се посматрају спектри, дискретни *Meyer* (Слика 4.17 (г)) је највише „оборио“ део високих фреквенција где је имао највећи утицај у поређењу са преостала три таласића. Ако се временски домен посматра, *Coiflet* 5 (Слика 4.17 (б)) и дискретни *Meyer* таласићи дају доста стабилне резултате, то јест јавља се најмање појединачних пикова након колена. Криве опадања су на први поглед сличне, али ако се мало боље сагледају резултати *biorthogonal* 3.3 таласића (Слика 4.17 (в)) може се и без бројне вредности повећања динамичког опсега закључити да крива добијена после примене таласића раније напушта референтну криву за дефинисан праг (од 0.2 dB), па је и самим тим повећање динамичког опсега мање, што се поклапа са вредношћу датом у Табели 4.4. У сва 4 случаја, као и за све случајеве у Табели 4.4, ниво декомпозиције таласића примењених на одзиве са белим шумом је био 3.

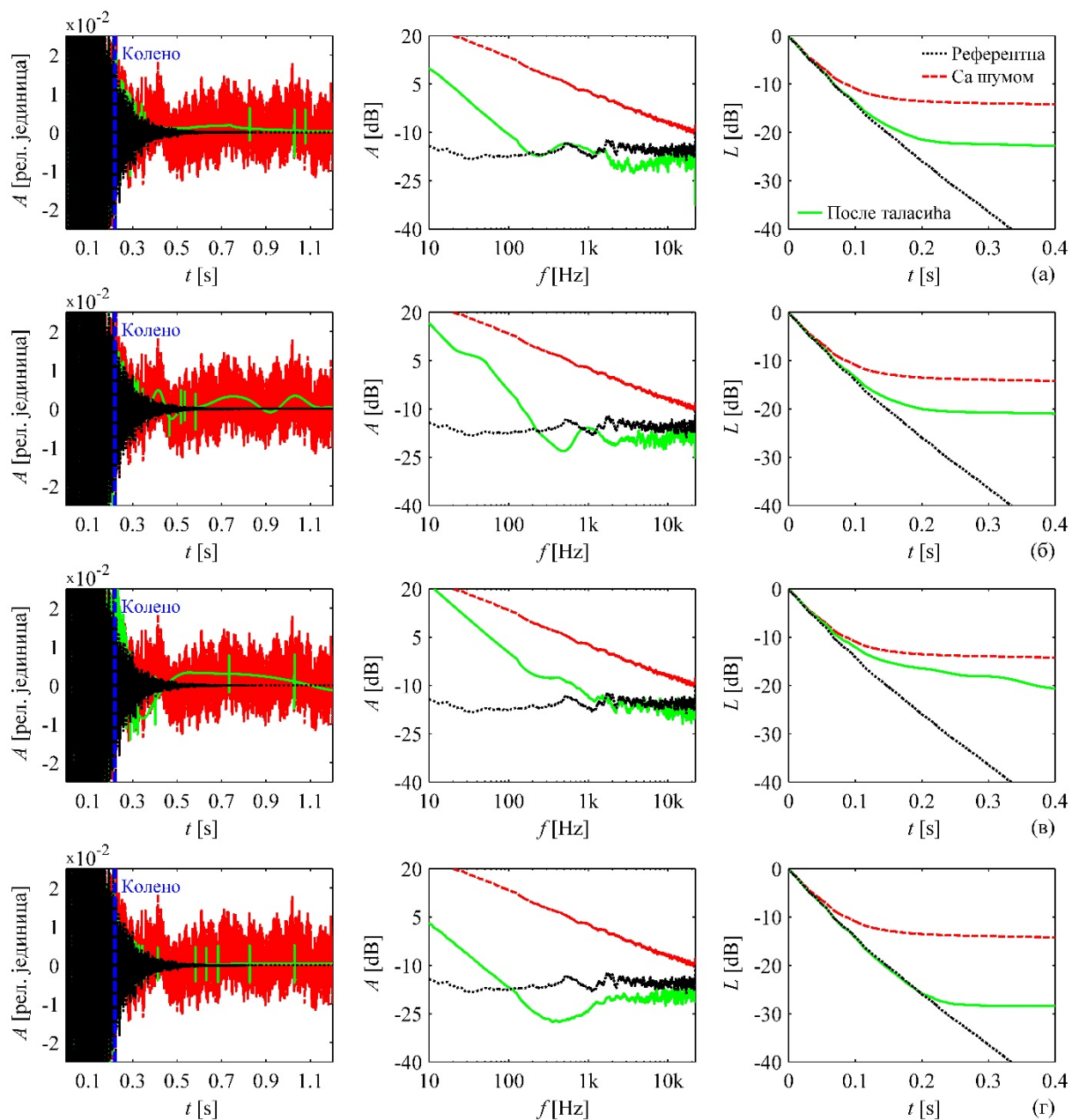


Слика 4.17. Ефекат примене различитих врста таласића: (а) *Daubechies 2*, (б) *Coiflet 5*, (в) *biorthogonal 3.3*, (г) дискретни *Meyer* на синтетизовани импулсни одзив просторије са белим шумом нивоа -50 dB, при чему су колонама приказани временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања, респективно

Слика 4.18 даје сличне приказе као Слика 4.17, само што сада импулсни одзиви садрже розе шум и уместо дискретних *Meyer* таласића употребљен је *reverse biorthogonal 1.1*. Највећу робусност (стабилне резултате по питању временског облика импулног одзива након колена) су дали *Daubechies 2* и *reverse biorthogonal 1.1* (Слика 4.17 (а) и (г)), респективно. Ефекат свих примењених таласића у фреквенцијском

домену је сличан, с тим што је *reverse biorthogonal* 1.1 таласић дао нешто већу промену у фреквенцијском домену. Поред тога, као и на Слици 4.17 за дискретни *Meyer*, спектар је мало више „оборен“ у односу на друге случајеве. Ако се криве опадања посматрају, *biorthogonal* 3.3 је и визуелно имао најмањи добитак динамике, као и нумерички у Табели 4.4. Треба нагласити да је за *biorthogonal* 3.3 ниво декомпозиције 14, јер је за ниво декомпозиције 15 дао негативно повећање динамичког опсега, то јест крива опадања након примене таласића има мањи динамички опсег него пре примене таласића. Овај ефекат се појавио код више врста таласића и из тог разлога, без обзира што је шум био нивоа -50 dB за све случајеве, ниво декомпозиције је био у неким случајевима 14, а у неким 15 за розе шум. За остале таласиће са Сlike 4.18, ниво декомпозиције је 15.

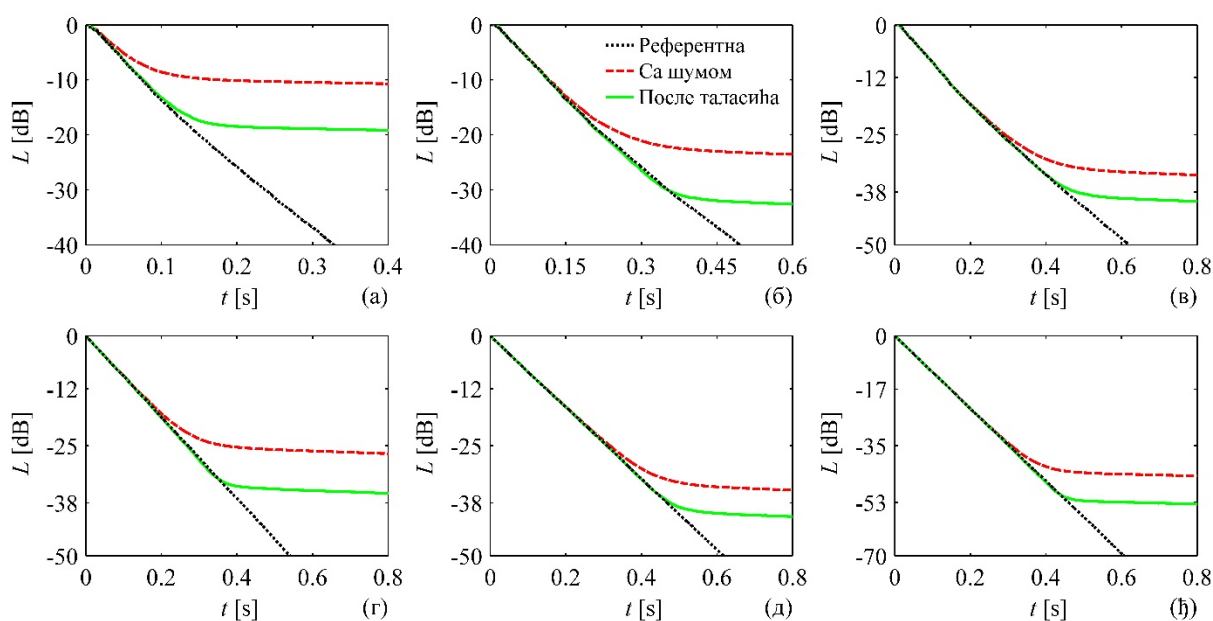
Пошто је испитивање вршено користећи велики број таласића, шумова различитих нивоа и различитих врста импулсних одзива (што ће бити приказано у наредној подсекцији), на основу резултата могу се извући одређени закључци по питању избора фамилије таласића. Са аспекта таласних облика импулсних облика после примене таласића, *Haar* таласић је најробуснији (даје стабилне резултате), и тај тренд у већини случајева прате *Daubechies* 1 и *Symlet* 2 таласићи. Без обзира на неке добре резултате одређених таласића из Табеле 4.4, ти таласићи у неким другим ситуацијама, када шум није исти или је импулсни одзив другачији, нису дали тако добре резултате.



Слика 4.18. Ефекат примене различитих врста таласића: (а) *Daubechies 2*, (б) *Coiflet 5*, (в) *biorthogonal 3.3*, (г) *reverse biorthogonal 1.1*, на синтетизовани импулсни одзив просторије са розе шумом нивоа -50 dB, при чему су колонама приказани временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања, респективно

4.3.6. Ефекат промене импулсног одзива просторије

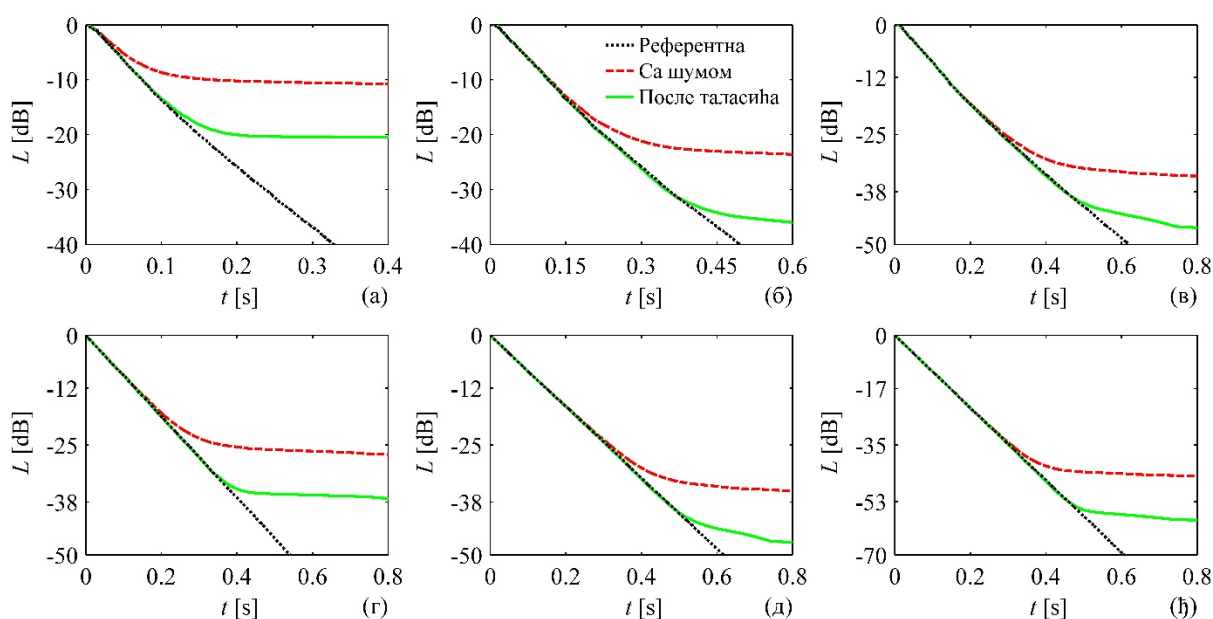
У свим претходним примерима коришћен је један импулсни одзив који припада групи *ISM* синтетизованих импулсних одзива. Како би се истражили и ефекти примене таласића у отклањању шума на различите врсте импулсних одзива просторије, у анализу су укључени и различити синтетизовани одзиви који припадају или групи *ISM* или групи *ED*. У целокупном истраживању је употребљено више од 30 различитих синтетизованих импулсних одзива, али треба напоменути и да су поред синтетизованих, коришћени и мерени импулсни одзиви који ће бити обрађени у посебном поглављу. На Сликама 4.19 и 4.20 приказани су ефекти промене врсте импулсних одзива просторије на криве опадања, где су дати карактеристични примери импулсних одзива за три различита нивоа шума (и за бели и за розе шум).



Слика 4.19. Ефекат примене *Haar* таласића на различите врсте синтетизованих импулсних одзива просторије са белим шумом различитог нивоа; (а), (б) и (в) *ISM* импулсни одзиви, (г), (д) и (ђ) *ED* импулсни одзиви са белим шумом нивоа: (а) -50 dB, (б) -60 dB, (в) -70 dB, (г) -50 dB, (д) -60 dB, (ђ) -70 dB

На Слици 4.19 приказани су ефекти примене таласића на различите врсте синтетизованих импулсних одзива (три *ISM* и три *ED* импулсна одзива). У анализу су укључени одзиви са различитим нивоом шума. Повећање динамичког опсега је у свим

случајевима велико, и износи преко 10 dB, чак у појединим случајевима скоро и 20 dB. Коришћен је оптимални скуп параметара таласића за бели шум. За појединачне случајеве, ниво декомпозиције је 2 у зависности од одабраног импулсног одзива, на пример, случај приказан на Слици 4.19 (д). Слика 4.20 илуструје сличне ефекте као и Слика 4.19, али овога пута за импулсне одзиве са розе шумом.



Слика 4.20. Ефекат примене *Haar* таласића на различите врсте импулсних одзива просторије са розе шумом различитог нивоа; (а), (б) и (в) *ISM* импулсни одзиви, (г), (д) и (ђ) *ED* импулсни одзиви са розе шумом нивоа: (а) -50 dB, (б) -60 dB, (в) -70 dB, (г) -50 dB, (д) -60 dB, (ђ) -70 dB

Ситуација код одзива са розе шумом је веома слична оној код одзива са белим шумом. Примена таласића доводи до повећања динамичког опсега који сада износи и преко 10 dB. Претходно поменути оптимални скуп параметара таласића за розе шум је и сада коришћен, с тим што се, као и код белог шума, за појединачне импулсне одзиве мора узети други ниво декомпозиције. На пример, за случај приказан на Слици 4.20 (д) ниво декомпозиције је 13. У свим приказаним случајевима је коришћен *Haar* таласић.

Промена врсте импулсног одзива није довела до другачијих закључака потенцијала примене таласића за смањење негативних ефеката шума у генерисању енергетске криве опадања на основу широкопојасних импулсних одзива просторије.

4.4. Примена таласића над ускопојасним импулсним одзивима за отклањање шума

До сада је детаљно објашњен поступак за отклањање шума из широкопојасних сигнала (импулсних одзива просторије) применом таласића када су у питању два најизраженија шума у акустици, бели и розе. Класичан приступ у обради импулсних одзива просторије је да се они ограниче на само један фреквенцијски опсег, опсег октаве или терце, и да се анализа врши у таквом уском подручју фреквенција. Због тога ће и овде импулсни одзиви просторије бити третирани као ускопојасни сигнали фреквенцијског опсега једне октаве или терце. За ту намену се широкопојасни импулсни одзиви најпре пропуштају кроз адекватне филтре пропуснике октава или терци, као што је дефинисано стандардом ИЕС 61260 [119]. И овде ће бити испитани ефекти примене таласића на импулсне одзиве просторије у опсезима октава или терци ради смањења утицаја шума. За ту намену ће се користити целокупан скуп параметара таласића, као и различите врсте таласића, а посматраће се могућност добијања повећања динамичког опсега и смањења прага шума. Цео поступак је исти као код широкопојасних одзива, само што је пре употребе таласића фреквенцијски опсег сигнала ограничен применом одговарајућег филтра, октавног или терцног, који ће бити описани у наставку.

4.4.1. Октавни и терцни филтри

Ако је однос горње и доње граничне фреквенције једнак броју 2 код филтра пропусника опсега, тада се тај филтар назива октавни филтар или филтар ширине октаве [119–121]. Поред октавних филтара често у употреби су и 1/3 октавни филтри (често се називају терцни филтри) код којих је однос између граничних фреквенција $2^{1/3}$. Овакав приступ се може дефинисати изразом [119–121]:

$$f_{g2}/f_{g1} = 2^n \quad (4.2)$$

Фреквенције f_{g1} и f_{g2} су доња и горња гранична фреквенција филтра пропусника опсега респективно, док параметар n дефинише врсту филтра. Ако је $n = 1$ тада је реч о октавном филтру, а ако је $n = 1/3$ тада је реч о терцном филтру. Параметар n може узети и друге вредности чиме се добијају и друге врсте филтара, али се они не употребљавају у обради импулсних одзива просторија.

Пошто је однос фреквенција, представљен претходним изразом код октавних и терцних филтара, пропорционалан, уводи се појам централне фреквенције ових филтара, којим се дефинише сам филтар. Централна фреквенција се рачуна следећим изразом [119–121]:

$$f_0 = \sqrt{f_{g1}f_{g2}} \quad (4.3)$$

Ако је потребно израчунати граничне фреквенције филтра, а позната је само централна фреквенција, онда се ове фреквенције добијају применом следећих израза:

$$f_{g1} = \frac{f_0}{\sqrt{2}}; f_{g2} = f_0\sqrt{2} \quad (4.4)$$

Како централне фреквенције филтара дефинишу филтре, оне су експлицитно дефинисане у одговарајућим стандардима. У Табели 4.5 приказане су вредности централних фреквенција филтара који су коришћени у овом истраживању.

Табела 4.5. Централне фреквенције октавних и терцних филтара

	вредност централне фреквенције [Hz]								
октава	125			250			500		
терца	100	125	160	200	250	315	400	500	630
октава	1000			2000			4000		
терца	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000

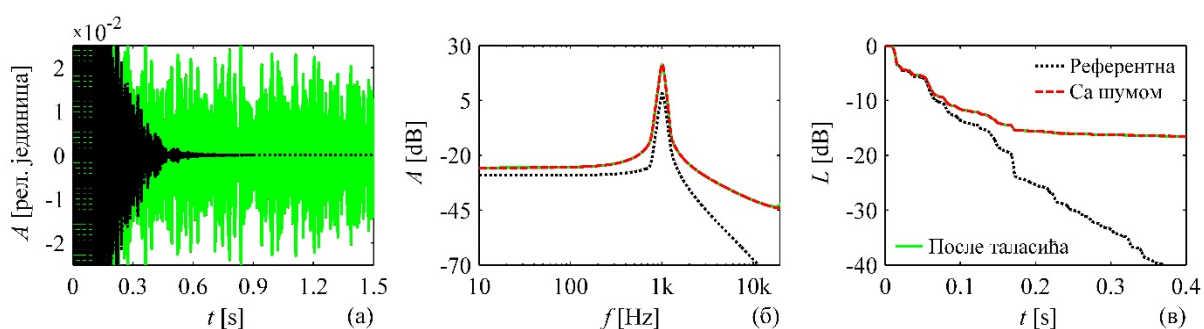
4.4.2. Дефинисање параметара за приказ резултата

Једина промена код обраде ускопојасних сигнала у односу на обраду широкопојасних била би у кораку који долази пре примене таласића. У питању је филтрирање сигнала октавним или терцним филтрима при чему је унапред дефинисана централна фреквенција филтра.

Читав поступак обраде се своди на следеће кораке: додавање шума (бели или розе) на синтетизовани импулсни одзив просторије, филтрирање референтног импулног одзива просторије са шумом октавним или терцним филтром, дефинисање врсте и параметара таласића, отклањање шума применом таласића, израчунавање повећања динамичког опсега и смањења прага шума и графички приказ резултата. Описан поступак приказан је и на блок дијаграму у глави 4.2, на Слици 4.3.

4.4.3. Испитивање утицаја промене параметара таласића примењених за отклањање шума код ускопојасних импулсних одзива просторије

Скуп параметара таласића и у овом случају чине исти параметри који су коришћени код обраде широкопојасних импулсних одзива. Како би се утврдило који параметри таласића (оптимални скуп параметара) дају најбоље резултате, потребно је извршити комплетно истраживање мењајући параметре, врсте шума и врсту импулног одзива просторије. Одређени прикази ће бити нешто другачији него што је то био случај у претходним поглављима. На Слици 4.21 приказани су временски и фреквенцијски облици сигнала пре и након примене таласића са иницијалним сетом параметара, као и криве опадања.



Слика 4.21. Примена *Haar* таласића за отклањање шума код синтетизованог импулног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB применом иницијалног скупа параметара таласића при нивоу декомпозиције 1 и терцног филтра централне фреквенције 1 kHz: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања

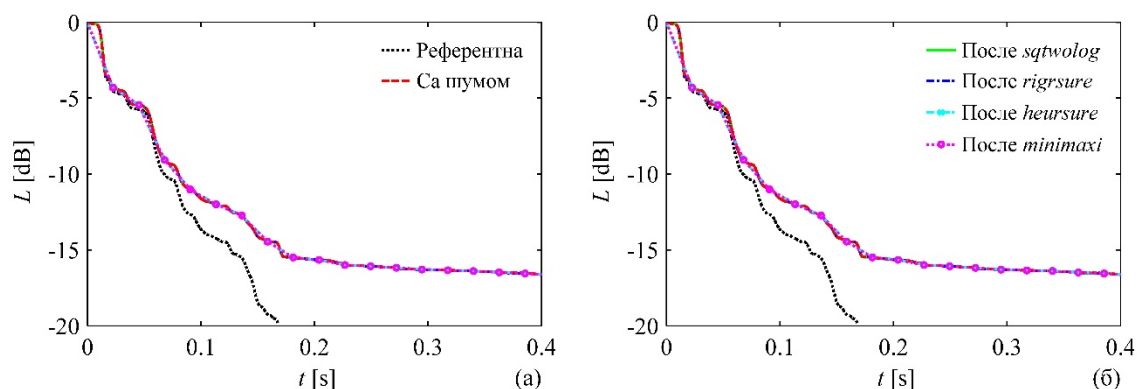
Одређени параметри и у случају ускопојасних сигнала не могу дати нека конкретна побољшања у виду отклањања шума (на пример *one* ре-скалирање, то јест случај када нема ре-скалирања), али ће то бити напоменуто у наставку рада. Ради подсећања, иницијални скуп параметара подразумева: *sqtwolog* правило избора прага, фино постављање прага и *mln* ре-скалирање, као и *Haar* таласић и почетни ниво декомпозиције, то јест ниво 1. За случај дат на Слици 4.21, импулсни одзив просторије је генерисан *ISM* методом, а њему је додат бели шум нивоа -50 dB, који је до сада био коришћен за сва иницијална истраживања.

Ако се сагледају резултати представљени на Слици 4.21, таласић уопште није утицао на импулсни одзив са шумом, па је импулсни одзив након примене таласића скоро исти као импулсни одзив пре примене таласића било да се ради о временском домену (Слика 4.21 (а)), фреквенцијском домену (Слика 4.21 (б)) или кривама опадања (Слика 4.21 (в)). Спектар је другачијег облика у односу на спектре који су били приказивани код широкопојасних сигнала из разлога што је на сва три сигнала примењен терцни филтар чија је централна фреквенција 1 kHz, па и сигнал практично постоји само у том терцном опсегу. Иницијални скуп параметара није довео до побољшања резултата, па је наставак истраживања фокусиран на тражење оптималног скупа параметара таласића за ускопојасне сигнале.

Следећа промена односи се на правило избора прага и фино или грубо постављање прага. Ради подсећања, у правилу избора прага постоје 4 опције које се могу искористити: *rigsure*, *heursure*, *sqtwolog* и *minimaxi*. На Слици 4.22 приказане су криве опадања за сва 4 случаја, при чему је и даље употребљен *Haar* таласић, почетни ниво декомпозиције 1 и терцни филтар чија је централна фреквенција 1 kHz.

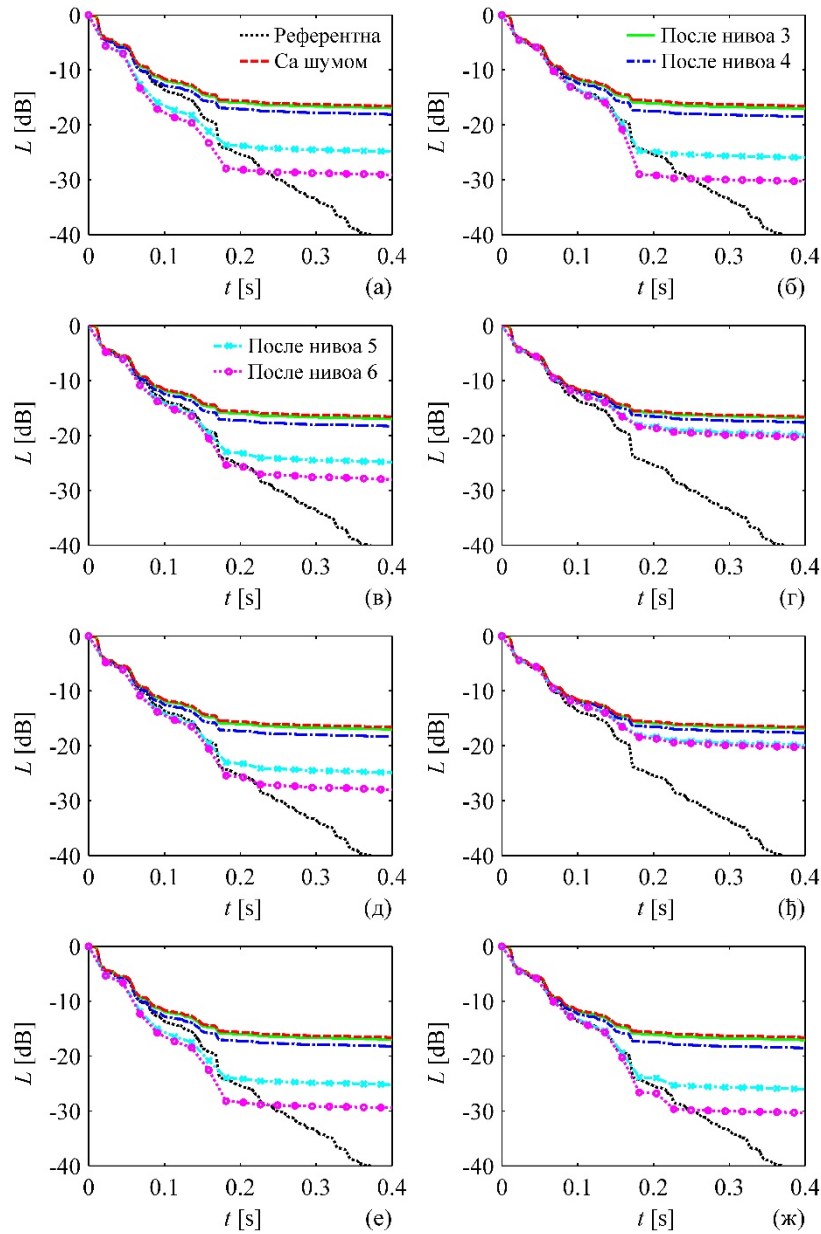
Оно што се одмах може закључити након сагледавања резултата приказаних на Слици 4.22 јесте да ниједна од коришћених комбинација параметара није довела до побољшања резултата у односу на оне добијене пре примене таласића. Повећање динамичког опсега скоро да не постоји и у свим случајевима је око 0 dB. Исто важи и за смањење прага шума.

Мењајући ниво декомпозиције за претходни случај долази се до резултата приказаних на Слици 4.23, где су употребљена 4 нивоа декомпозиције: 3, 4, 5 и 6.



Слика 4.22. Ефекат промене правила избора прага (*sqtwolog*, *rigrsure*, *heursure*, *minimaxi*) приликом примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz применом нивоа декомпозиције 1 за: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага

Само посматрањем Слика 4.23, као и у случају широкопојасних импулсних одзива, тешко је одредити који ниво декомпозиције са којим скупом параметара таласића даје најбоље резултате. Оно што се на први поглед може рећи јесте да ниво декомпозиције 6 у свим случајевима, осим код *rigrsure* и *heursure* правила избора прага и грубог постављања прага, даје неадекватне криве опадања, то јест криве опадања које још у делу главног реверберационог опадања иду испод референтне криве опадања. То се исто догађа и са нивоом декомпозиције 5, али само за неке комбинације параметара таласића (на пример, *minimaxi* правило избора прага и фино постављање прага). Опција која подразумева *rigrsure* и *heursure* правило избора прага и грубо постављање прага на било ком нивоу декомпозиције не даје добре резултате. Такође нивои декомпозиције 3 и 4 у свим случајевима дају неприхватљиве резултате.



Слика 4.23. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 3, 4, 5 и 6) и различитих правила избора прага код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigrsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi*

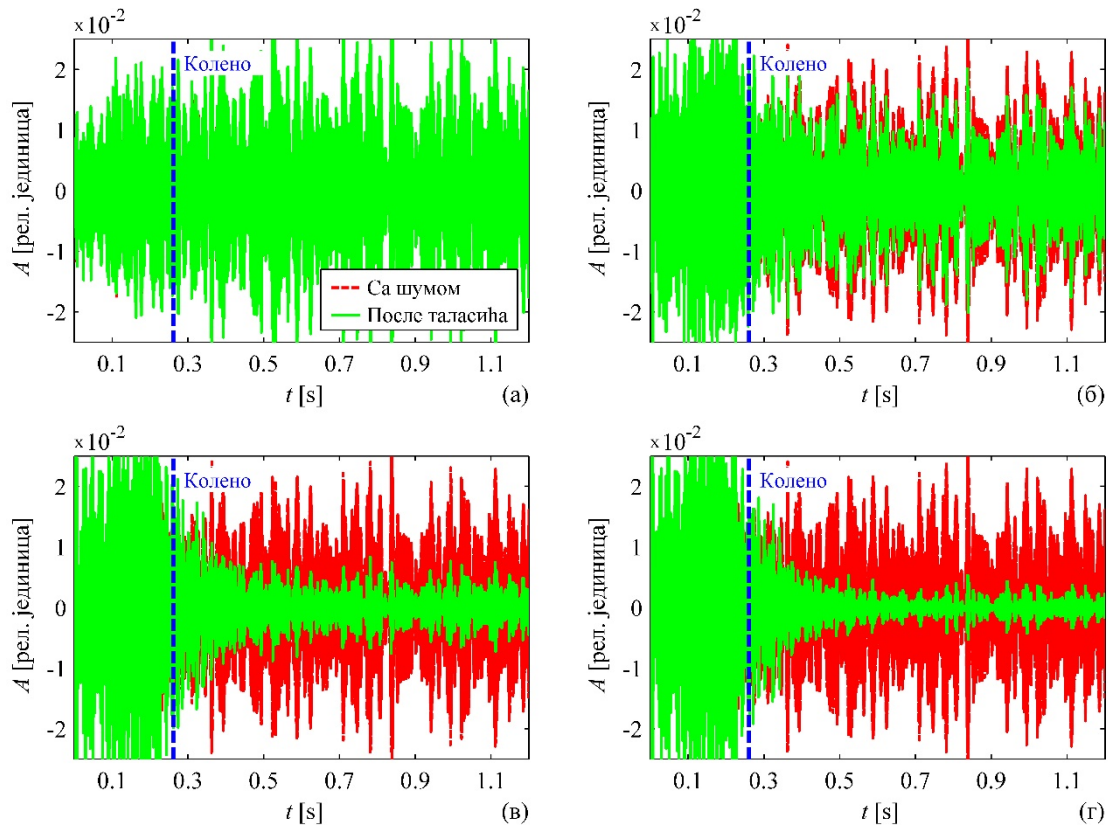
За детаљнију анализу презентованих случајева, направљена је Табела 4.6 у којој су дата повећања динамичког опсега. Највеће повећање динамичког опсега се добија *minimaxi* правилом избора прага са грубим постављањем прага, и оно износи 10.95 dB и 11.75 dB за нивое декомпозиције 5 и 6, респективно. До сада спроведена анализа

показује да се најбољи резултати по питању повећања динамичког опсега, односно смањења прага шума одзива у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz, добијају применом скупа параметара таласића кога чине: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага, *mln* ре-скалирање и ниво декомпозиције 5. Неки примери који су у Табели 4.6 такође скренули пажњу су *sqtwolog* правило избора прага са грубим постављањем прага и нивоом декомпозиције 5 или финим постављањем прага и нивоом декомпозиције 4, али повећање динамичког опсега је у оба ова случаја знатно мање од највеће вредности повећања динамичког опсега.

Табела 4.6. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.23, где импулсни одзив садржи бели шум нивоа -50 dB и филтриран је терцним филтром централне фреквенције 1 kHz

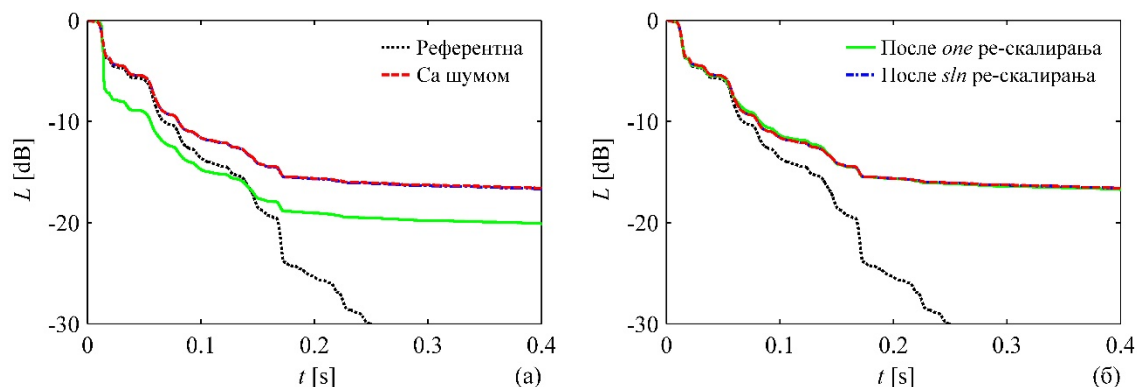
правило избора прага	фино постављање прага				грубо постављање прага			
	ниво 3	ниво 4	ниво 5	ниво 6	ниво 3	ниво 4	ниво 5	ниво 6
<i>sqtwolog</i>	1.48 dB	6.8 dB	-2.27 dB	-2.34 dB	0.25 dB	1.84 dB	7.36 dB	5.95 dB
<i>rigrsure</i>	0.73 dB	3 dB	-0.65 dB	-0.95 dB	0.1 dB	0.65 dB	2.02 dB	2.24 dB
<i>heursure</i>	0.73 dB	3 dB	-0.65 dB	-0.95 dB	0.1 dB	0.65 dB	2.02 dB	2.24 dB
<i>minimaxi</i>	1.4 dB	6.1 dB	-1.96 dB	-2.15 dB	0.23 dB	1.62 dB	10.95 dB	11.75 dB

Импулсни одзиви у временском домену пре и после примене таласића за скуп параметара који је дао највеће повећање динамичког опсега за нивое декомпозиције са Сlike 4.23, то јест Табеле 4.6, приказани су на Слици 4.24. У свим приказаним случајевима су коришћени параметри таласића: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање. Врло је битно напоменути да је ефекат у временском домену примене таласића и код ускопојасних сигнала практично исти као и код широкопојасних сигнала. Примена таласића доводи до највећих промена у делу импулног одзива након колена, где се са повећавањем нивоа декомпозиције смањује шум, то јест повећава се вредност смањења прага шума.



Слика 4.24. Разлике синтетизованог импулсног одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 3, (б) 4, (в) 5 и (г) 6

Што се тиче преосталих параметара, посматран је утицај *one* и *sln* ре-скалирања, (Слику 4.25). Приказани случајеви дефинитивно показују да и промена ре-скалирања неће довести до бољих резултата од оних добијених оптималним скупом параметара таласића који је дефинисан код широкопојасних сигнала. Ако се користи *minimaxi* правило избора прага и грубо постављање прага било да се ради о *one* ре-скалирању или *sln* ре-скалирању, повећање динамичког опсега је у првом случају негативно, а у другом око 0 dB. У случају примене *sqtwolog* правила избора прага и грубог постављања прага, тренд је исти, *one* ре-скалирање доводи до негативног повећања динамичког опсега, а *sln* ре-скалирање до вредности од око 0 dB. Промена ре-скалирања као параметра таласића није довела до резултата које треба узети у обзир за даље истраживање.

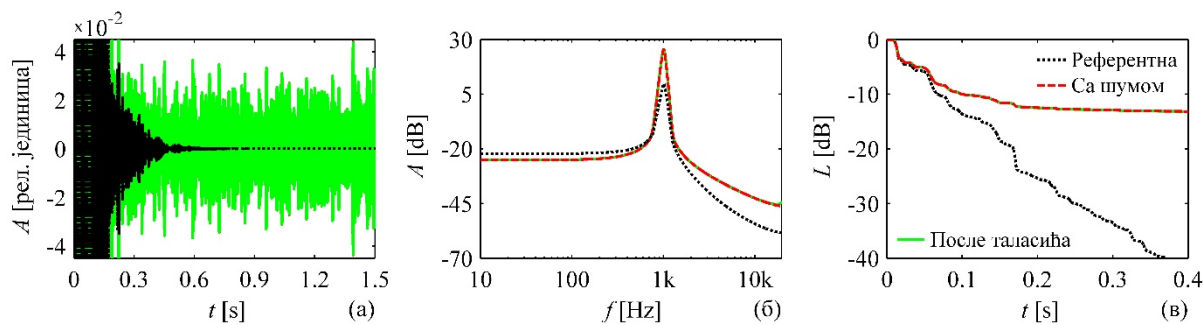


Слика 4.25. Ефекат *one* и *sln* ре-скалирања код примене *Haar* таласића на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz при нивоу декомпозиције 5: (a) *minimaxi* (б) *sqtwolog*

4.4.4. Синтетизовани ускопојасни импулсни одзиви са розе шумом

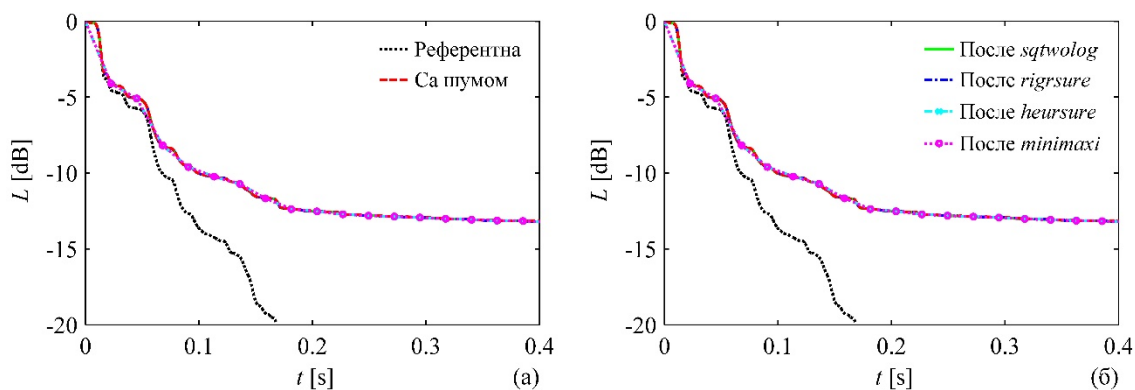
Анализа из претходне секције урађена за синтетизоване импулсне одзиве просторија са белим шумом у опсегу терци је овде урађена за исте ускопојасне синтетизоване одзиве али којима је додат розе шум. Ниво шума ће остати исти: -50 dB. Иницијални скуп параметара таласића је и овде најпре коришћен за анализу. На Слици 4.26 су респективно приказани временски домен, фреквенцијски домен и криве опадања импулсних одзива просторије са шумом, без шума и након примене таласића. Иницијални скуп параметара таласића није дао резултате које би требало посебно разматрати, што је након целокупног досадашњег истраживања логичан резултат.

Као и за бели шум, и овде је потребно испитати ефекте промене правила избора прага и постављања прага. Ре-скалирање ће остати исто као и врста таласића и ниво декомпозиције. Добијени резултати приказани су на Слици 4.27. И у овом случају промена правила избора прага и постављања прага није довела до значајних промена у повећању динамичког опсега, које је у свим случајевима око 0 dB, што се и са Сlike 4.27 може закључити.

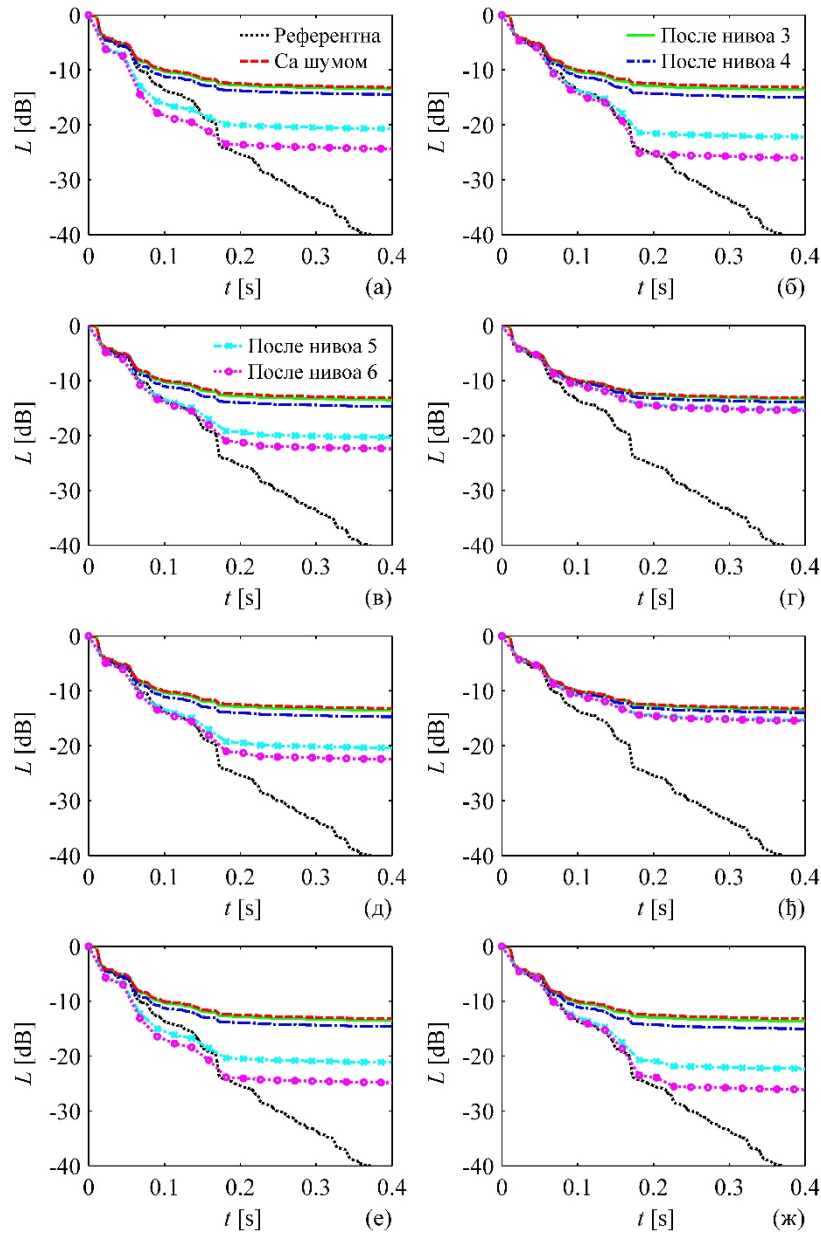


Слика 4.26. Примена *Haar* таласића (са иницијалним скупом параметара таласића) за отклањање шума код синтетизованог импулсног одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz: (а) сигнал у временском домену, (б) фреквенцијски домен, (в) криве опадања

Једна чињеница која је такође била од кључног значаја за бели шум важи и за розе шум, а то је да код ускопојасних импулсних одзива највећи ефекат изазива промена нивоа декомпозиције у зависности од централне фреквенције терцног или октавног филтра. Са тим циљем, урађено је испитивање утицаја промене нивоа декомпозиције за подешавања са Сlike 4.27 (видети Сlikeу 4.28). Одабрани нивои декомпозиције у случају розе шума су: 3, 4, 5 и 6.



Слика 4.27. Ефекат промене правила избора прага (*sqtwolog*, *rigsurre*, *heursure* и *minimaxi*) приликом примене *Haar* таласића при нивоу декомпозиције 1 у отклањању шума на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz: (а) фино постављање прага, (б) грубо постављање прага



Слика 4.28. Ефекат промене нивоа декомпозиције (нивои 3, 4, 5 и 6) и различитих правила избора прага код примене *Haar* таласића у отклањању шума на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz: (а), (в), (д) и (е) са финим постављањем прага, (б), (г), (ђ) и (ж) са грубим постављањем прага; (а) и (б) *sqtwolog*, (в) и (г) *rigrsure*, (д) и (ђ) *heursure*, (е) и (ж) *minimaxi*

Слика 4.28 показује да *rigrsure* и *heursure* на грубом постављању прага нису дали добре резултате у повећању динамичког опсега, то јест отклањању шума. У осталим случајевима постоје примери са визуелно добрим резултатом. Како би се

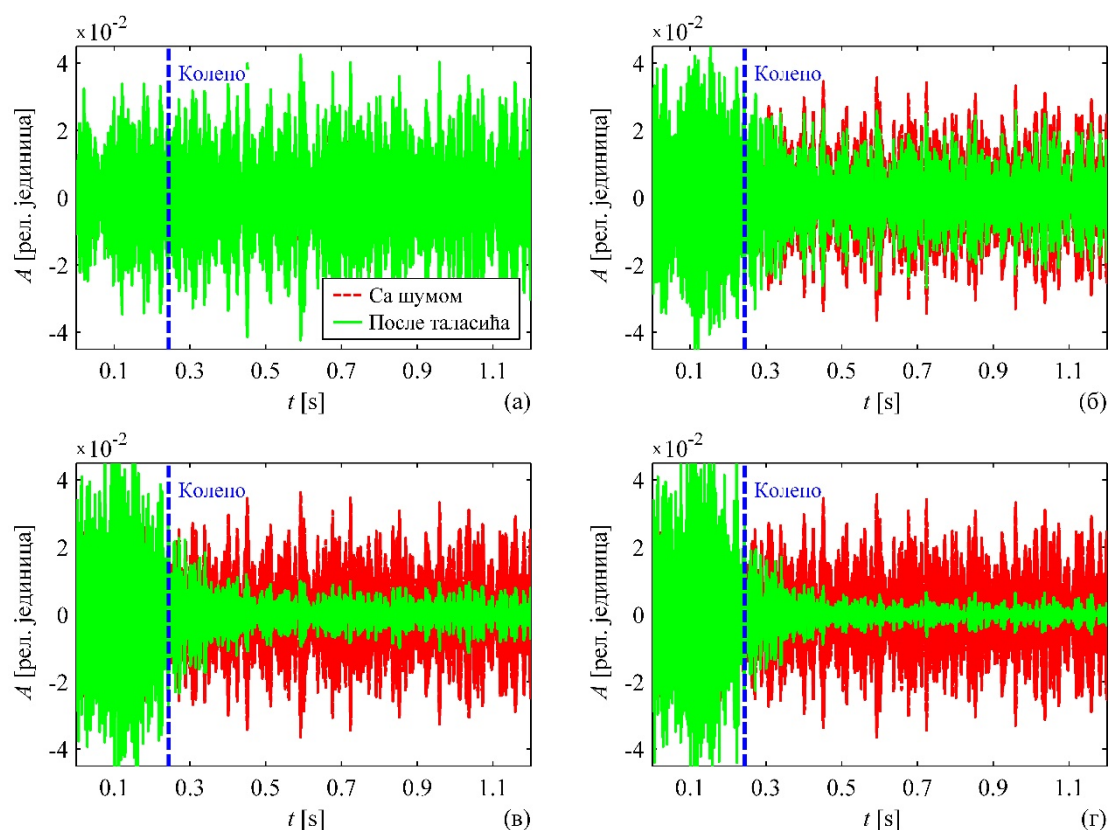
целокупна слика сагледала и из другог угла, направљена је Табела 4.7 у којој су бројне вредности повећања динамичког опсега за све појединачне случајеве са Сlike 4.28.

Табела 4.7. Приказ повећања динамичког опсега за различите комбинације параметара таласића са Сlike 4.28, где импулсни одзив у опсегу терце на 1 kHz садржи розе шум нивоа -50 dB

	фино постављање прага				грубо постављање прага			
правило избора прага	ниво 3	ниво 4	ниво 5	ниво 6	ниво 3	ниво 4	ниво 5	ниво 6
<i>sqtwolog</i>	0.81 dB	3.88 dB	-0.87 dB	-0.95 dB	0.27 dB	1.5 dB	5.13 dB	2.53 dB
<i>rigrsure</i>	0.38 dB	2.46 dB	0.67 dB	0.37 dB	0.07 dB	0.33 dB	0.95 dB	1.03 dB
<i>heursure</i>	0.38 dB	2.46 dB	0.67 dB	0.37 dB	0.07 dB	0.33 dB	0.95 dB	1.03 dB
<i>minimaxi</i>	0.7 dB	3.45 dB	-0.65 dB	-0.77 dB	0.23 dB	1.08 dB	7.94 dB	11.87 dB

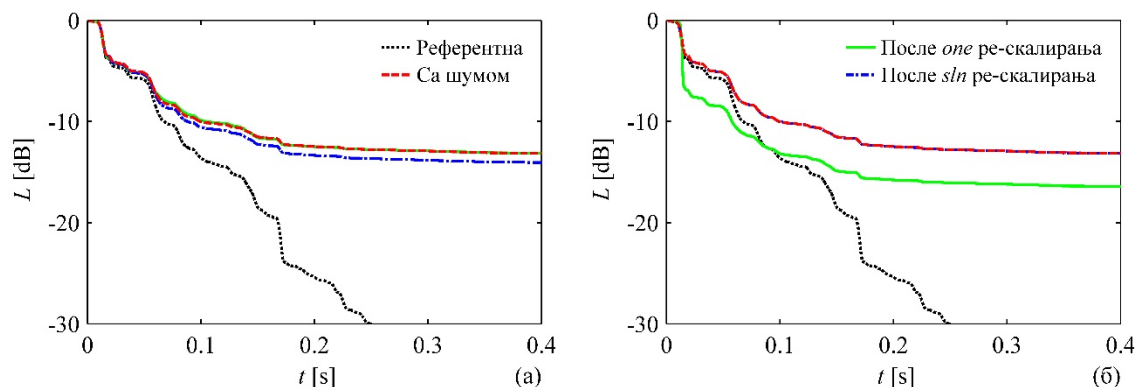
Слика 4.28 и Табела 4.7 дају даље разјашњење ситуације. Ако би требало издвојити најбоље случајеве, то су дефинитивно нивои декомпозиције 5 и 6 у комбинацији са *minimaxi* правилем избора прага и грубим постављањем прага, где је повећање динамичког опсега 7.94 dB и 11.87 dB. Сви остали случајеви (комбинације параметара таласића) за розе шум имају знатно мање повећање динамичког опсега, иако су поједини случајеви визуелно обећавали боље резултате, то јест веће је смањење прага шума. Оно што треба нагласити јесте да у случају розе шума на нивоу декомпозиције 6 са скупом параметара таласића који је дао највеће повећање динамичког опсега, крива опадања се не налази испод референтне, чиме се потврђује валидност овог резултата.

Импулсни одзиви у временском домену пре и после примене таласића на свим нивоима декомпозиције са Сlike 4.28, *minimaxi* правилем избора прага и грубим постављањем прага, приказани су на Слици 4.29. У свим случајевима са Сlike 4.29 коришћени су параметри: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање. За приказане примере се применом таласића доминантно мења део импулног одзива након колена и повећавање нивоа декомпозиције смањује утицај шума, то јест повећава смањење прага шума, што је био случај и код белог шума.



Слика 4.29. Разлике синтетизованог импулног одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце централне фреквенције 1 kHz у временском домену и одзива без шума пре (црвена крива) и после (зелена крива) примене *Haar* таласића при нивоима декомпозиције: (а) 3, (б) 4, (в) 5 и (г) 6

У наставку су презентовани резултати испитивања ефеката промене ре-скалирања када ускопојасни импулсни одзиви садрже розе шум. Пошто је *minimaxi* правило избора прага једино дало добре резултате у случају розе шума, само ће се испитати ефекти промене ре-скалирања са *minimaxi* параметром на нивоу декомпозиције 6 заfino и грубо постављање прага. Промена ре-скалирања није донела побољшање резултата (видети Сliku 4.30). У сва 4 случаја повећање динамичког опсега је или негативно или око 0 dB.



Слика 4.30. Ефекат *one* и *sln* ре-скалирања применом *Haar* таласића и терцног филтра централне фреквенције 1 kHz на синтетизовани импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB при нивоу декомпозиције 5 и *minimaxi* правила избора прага:

(а) фино постављање прага (б) грубо постављање прага

Оптималан скуп параметара таласића који је важио за широкопојасне сигнале важи и за ускопојасне сигнале, и он подразумева: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање. Избор фамилије таласића је у свим случајевима био сведен на *Haar* таласић, али је у наредним корацима потребно испитати ефекте који се добијају применом других таласића. Врло је важно напоменути да код ускопојасних импулсних одзива велику улогу игра ниво декомпозиције таласића који је уско повезан са централном фреквенцијом октавног или терцног филтра и та зависност ће бити детаљније испитана у наставку.

4.4.5. Испитивање ефеката промене нивоа декомпозиције и нивоа шума код примене таласића на различите врсте импулсних одзива просторије у опсегу октава и терци

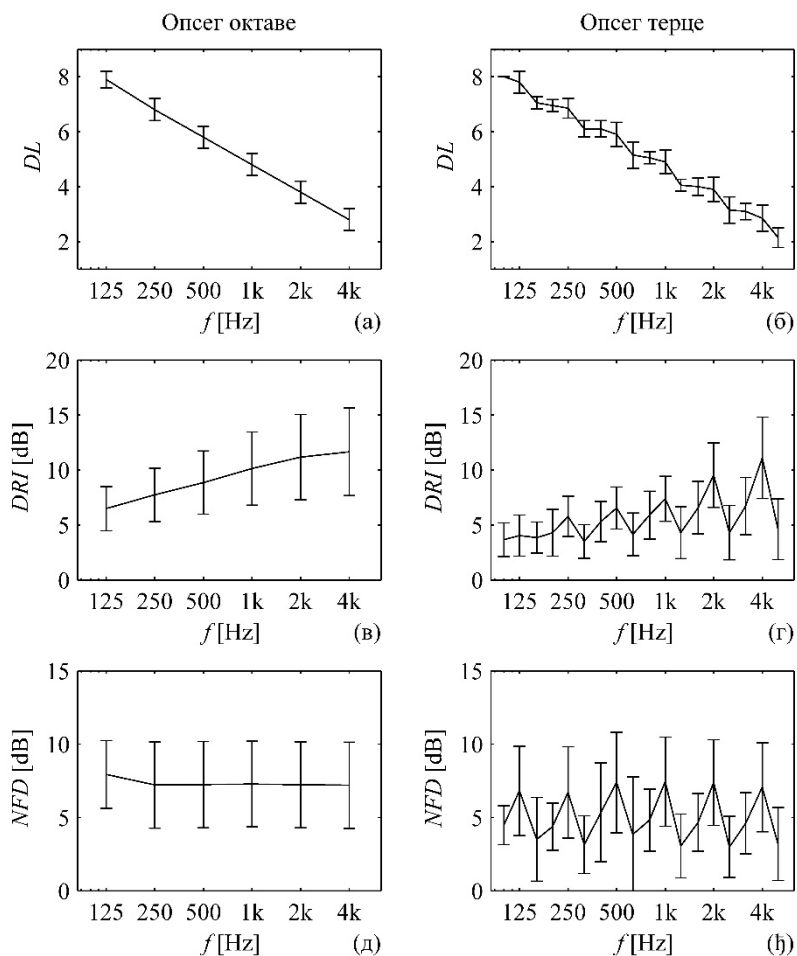
У овом делу истраживања анализирају се ефекти промене нивоа декомпозиције таласића, при чему се користе нивои шума (и за бели и за розе шум) од -50 dB и -60 dB, и 10 различитих импулсних одзива просторије, 5 из скупа *ISM* и 5 из скупа *ED*. Када је шум у питању, такође је битно напоменути да у итерацијама није коришћен фиксни шум већ је у свакој итерацији изнова креиран нови шум задатог нивоа.

На Слици 4.31 приказане су три врсте статистичких резултата за импулсне одзиве са белим шумом: за ниво декомпозиције, повећање динамичког опсега и смањење прага шума у односу на све централне фреквенције октавних и терцних филтара (у врсти, респективно). Сваки резултат садржи средњу вредност и стандардну девијацију одређене величине, то јест одступање како би се ближе сагледало у којим вредностима се тај резултат креће.

На основу Сlike 4.31 се може закључити да се ниво декомпозиције који доводи до највећег повећања динамичког опсега креће од максималне вредности 8 за централну фреквенцију 100 Hz до вредности 2 за централну фреквенцију 5 kHz. Исти је случај и за октавне филтре, с тим што овде има мање централних фреквенција. Резултати за вредности нивоа декомпозиције се готово поклапају за октавне и терцне филтре на истим централним фреквенцијама. Резултати показују да важи реципрочност, што је мања централна фреквенција филтра, то је већа вредност нивоа декомпозиције. Стандардна девијација је показала мала одступања, па тако, рецимо, за централну фреквенцију 100 Hz ниво декомпозиције за одређене импулсне одзиве или различите нивое шума може бити 9 или 7. Треба истаћи и да је број оваквих одступања мали па је и стандардна девијација у овим случајевима мала.

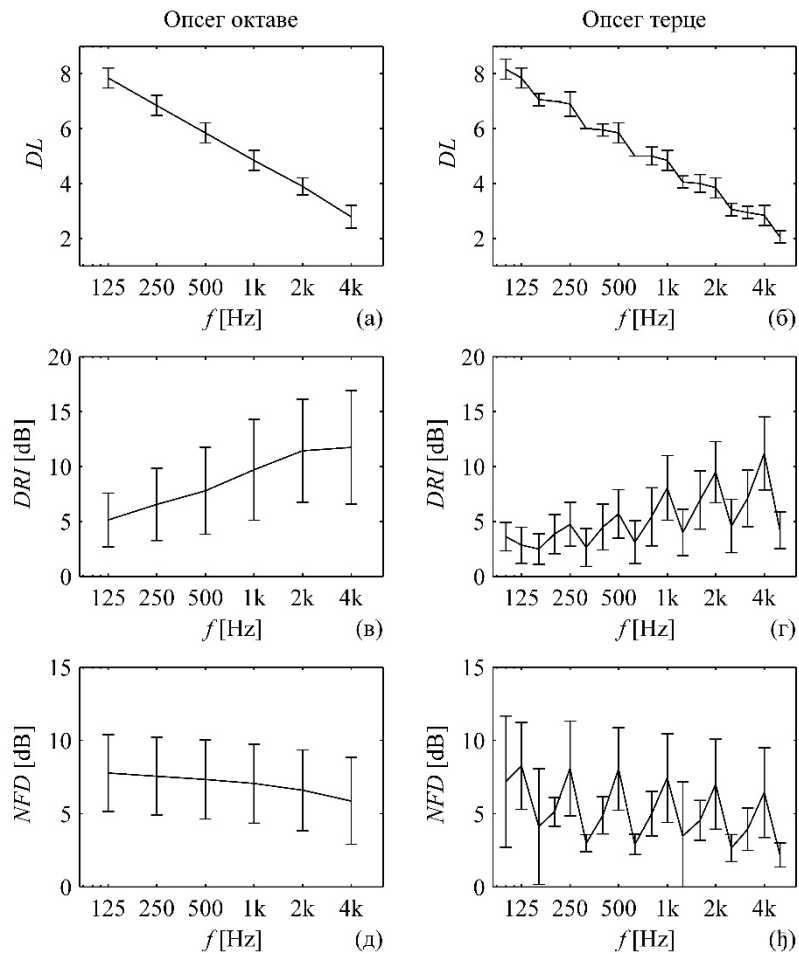
Ако се сагледа повећање динамичког опсега (Слика 4.31 (в) и (г)), укупна просечна вредност је око 7 dB за све централне фреквенције октавних и терцних филтара са разликом у стандардној девијацији око 3 dB. Најмање повећање динамичког опсега је било на централним фреквенцијама 100 Hz (у просеку око 6.5 dB за октавне и 4 dB за терцне филтре), док је највеће повећање динамичког опсега било на централним фреквенцијама 5 kHz за октавне (око 12 dB), то јест 4 kHz за терцне (око 11 dB).

Смањење прага шума је укупно у просеку износило око 6 dB за све централне фреквенције октавних и терцних филтара са разликом у стандардној девијацији око 3 dB. Ако се посматрају октавни филтри, најмања вредност је на 4 kHz и износила је око 7.2 dB, а највећа вредност је на 125 Hz и она износи скоро 8 dB. Све средње вредности за октавне филтре су у просеку биле врло сличне и разлика је само у неколико десетина децибела. Најмање смањење прага шума остварио је у просеку терцни филтар на 315 Hz где средња вредност износи око 3.2 dB, а највеће на централним фреквенцијама 1 kHz где је средња вредност смањења прага шума износила око 7.5 dB.



Слика 4.31. Ефекат промене централне фреквенције октавних (прва колона) и терцних (друга колона) филтара на 10 врста синтетизованих импулсних одзива просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB и -60 dB: (а) и (б) ниво декомпозиције, (в) и (г) повећање динамичког опсега, (д) и (е) смањење прага шума

На слици 4.32 је приказана ситуација када је розе шум био у оптицају. Ситуација што се тиче нивоа декомпозиције је готово иста и креће се у просеку од 8 па све до 2 било за октавне или терцне филтре са одступањима за ниво декомпозиције ± 1 за неке ретке случајеве.



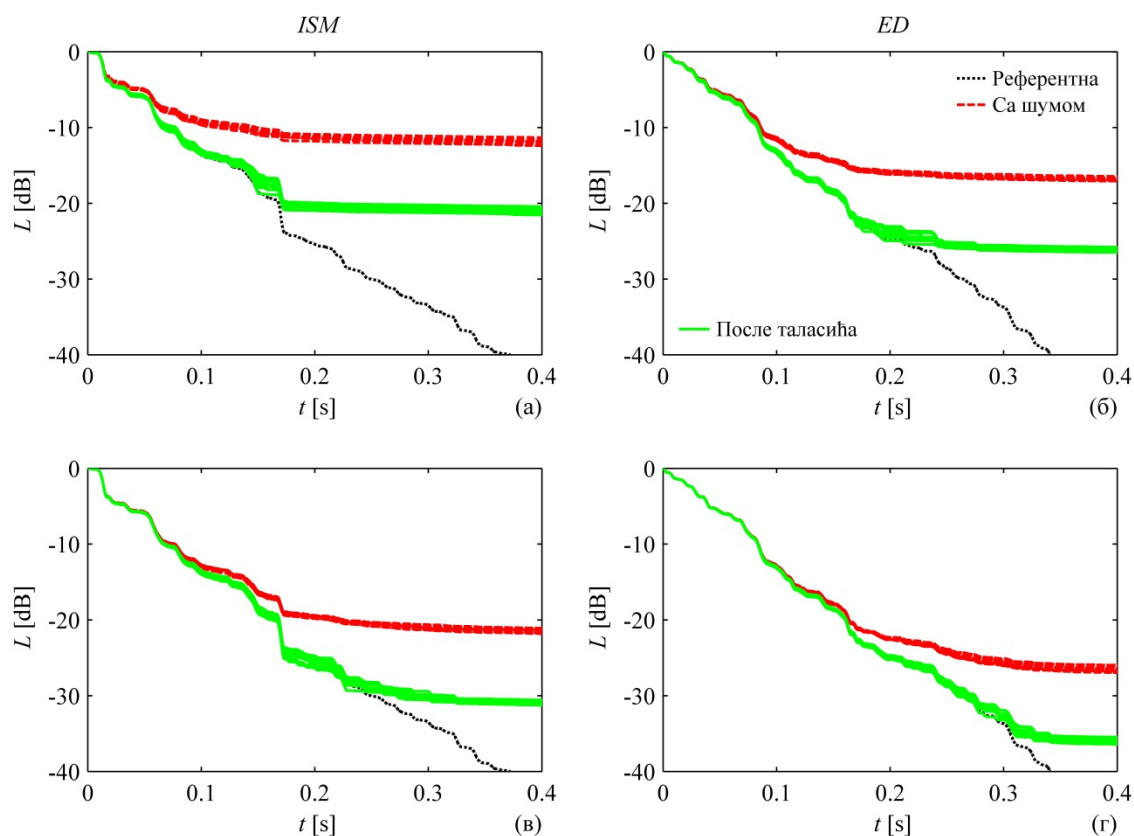
Слика 4.32. Ефекат промене централне фреквенције октавних (прва колона) и терцних (друга колона) филтара на 10 врста синтетизованих импулсних одзива просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB и -60 dB: (а) и (б) ниво декомпозиције, (в) и (г) повећање динамичког опсега, (д) и (ђ) смањење прага шума

Када је реч о повећању динамичког опсега за розе шум ситуација је следећа: ако се сагледају средње вредности октавних филтара, најмања средња вредност је око 5 dB за централну фреквенцију 125 Hz, а највећа 12 dB за централну фреквенцију 4 kHz. Код терцних филтара повећање динамичког опсега је минимално износило 2.5 dB на централној фреквенцији 160 Hz, а највеће око 11.2 dB на централној фреквенцији 4 kHz. Укупна средња вредност повећања динамичког опсега за оба ускопојасна опсега (и октавне и терцне опсега) у случају розе шума износи око 6 dB, са стандардном девијацијом око 3 dB.

По питању смањења прага шума, код одзива у опсезима октаве, најмања средња вредност смањења прага шума је око 6 dB на централној фреквенцији од 4 kHz, а највећа око 7.8 dB на централној фреквенцији од 125 Hz. Најмања средња вредност за

терцне опсеге је око 2 dB на централној фреквенцији 5 kHz, а највећа је око 8 dB на централној фреквенцији 500 Hz када је такође реч о прагу шума. Укупна средња вредност смањења прага шума за обе врсте филтара у случају розе шума износи око 6 dB, са стандардном девијацијом око 2.5 dB. У свим овде приказаним случајевима коришћена је само једна врста таласића – *Haar*.

Како би се и графички сагледала ситуација која је описана у овој секцији, на следећим сликама дато је пар примера у којима се мења ниво шума и врста синтезисаних импулсних одзива. На Слици 4.33 је приказано како случајне вредности амплитуде шума које се добијају у поновљеним итерацијама генерисања шума могу да утичу на импулсни одзив, то јест ефекат таласића при отклањању шума.

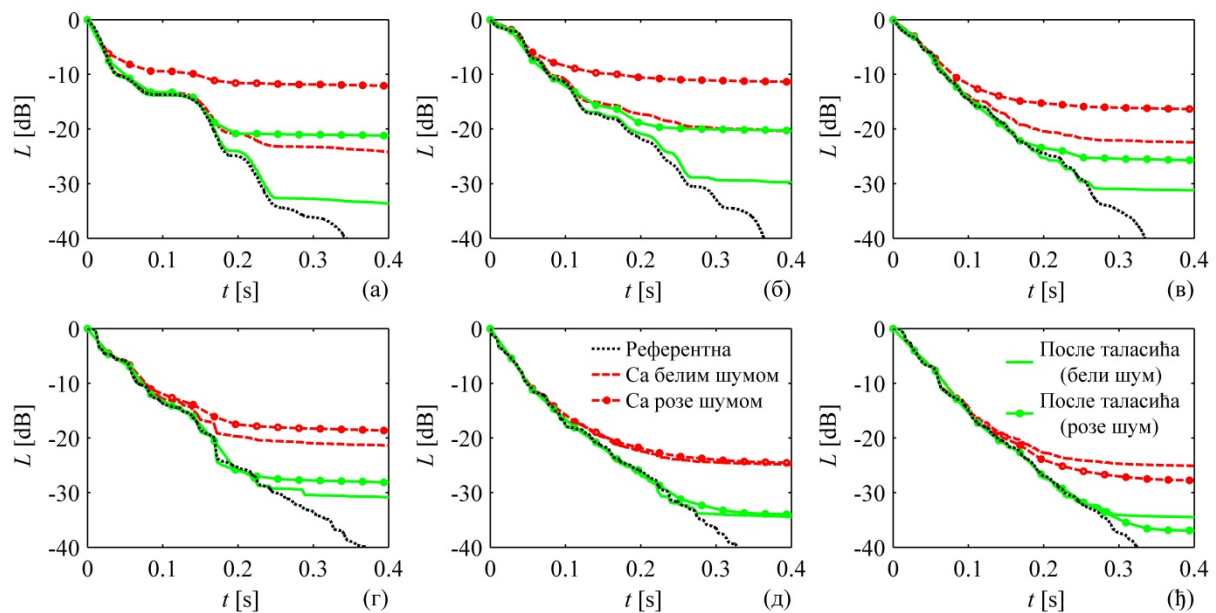


Слика 4.33. Ефекат промене вредности амплитуда у времену белог шума нивоа -50 dB (прва врста) и -60 dB (друга врста) генерисаног у 10 понављања приликом примене *Haar* таласића на два синтезисована импулсна одзива просторије: (а) и (в) *ISM*. (б) и (г) *ED*, са поменутиим белим шумом у опсегу терце на 1 kHz

У свим приказаним случајевима готово да су се све криве опадања поклопиле, чиме се показује да промене амплитуде код случајног шума немају утицај на резултате

отклањања шума применом таласића. При томе, добијено је значајно повећање динамичког опсега. Употребљен је *Haar* таласић и оптимални скуп параметара са нивоом декомпозиције 5.

На Слици 4.34 је на једном синтетизованом импулсном одзиву урађена слична анализа као у претходном случају, с тим што је сада одзиву додат розе шум, а за филтрирање одзива са шумом су коришћени терцни филтри различите централне фреквенције. И овде је шум добијен у 10 понављања извршења модула за генерисање розе шума. Употребљен је исти таласић и скуп параметара таласића као у претходном случају, с тим што је ниво декомпозиције таласића зависио од централне фреквенције терцног филтра.



Слика 4.34. Ефекат промене вредности амплитуда у времену белог и розе шума нивоа - 50 dB генерисаног у 10 понављања приликом примене *Haar* таласића на синтетизовани *ISM* импулсни одзив просторије са поменутиим белим и розе шумом у опсегу терци на:

(a) 125 Hz (б) 250 Hz (в) 500 Hz (г) 1 kHz (д) 2 kHz и (ђ) 4 kHz

4.4.6. Ефекат промене фамилије таласића

Промена фамилије таласића код ускопојасних импулсних одзива просторије може такође изазвати различите промене у повећању динамичког опсега, као и у смањењу прага шума. Као што је било урађено за широкопојасне импулсне одзиве и овде ће акценат бити стављен само на одређене врсте таласића и биће приказани само примери од интереса, при чему је целокупно истраживање урађено са већим бројем фамилија таласића. И овога пута су бели и розе шум нивоа -50 dB додати синтетизованим импулсним одзивима који су иза тога филтрирани терцним филтром централне фреквенције од 1 kHz. У свим случајевима је коришћен оптималан скуп параметара таласића, а ниво декомпозиције је негде био 5, а негде 6. Повећање динамичког опсега за све примењене таласиће ће бити приказано у Табели 4.8.

Табела 4.8. Повећање динамичког опсега синтетизованих импулсних одзива са додатим белим и розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz применом различитих врста таласића

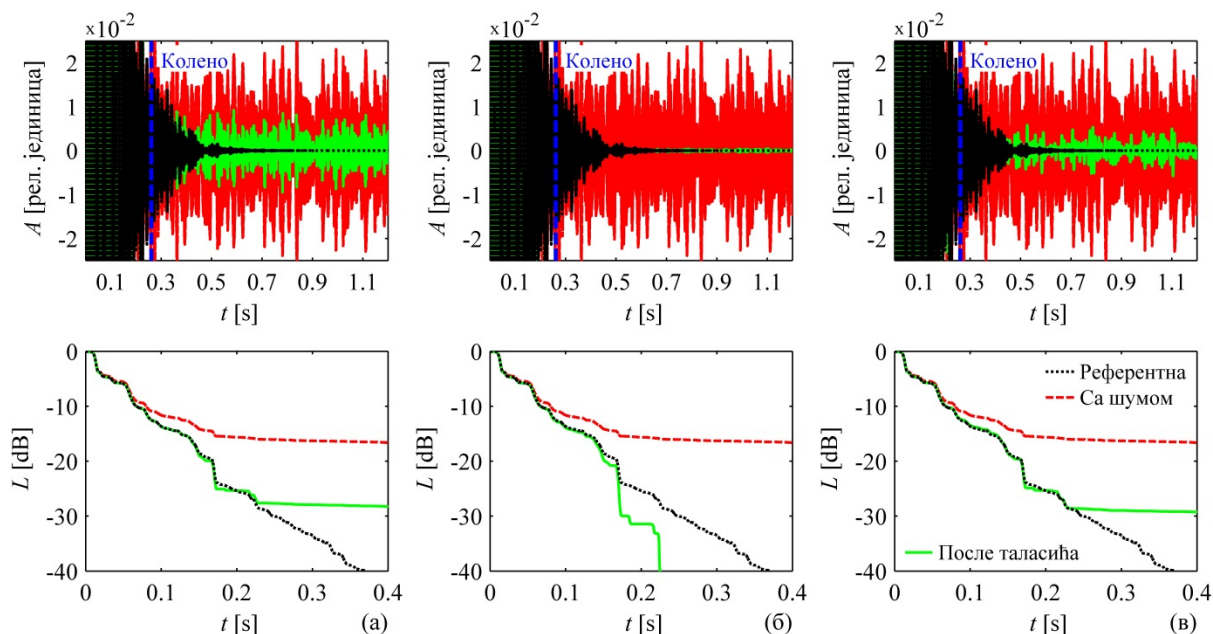
	повећање динамичког опсега				
	<i>Daubechies 1</i>	<i>Daubechies 2</i>	<i>Daubechies 4</i>	<i>Daubechies 6</i>	<i>Daubechies 8</i>
бели шум	11.75 dB	12.54 dB	11.6 dB	9.79 dB	7.23 dB
розе шум	11.87 dB	11.58 dB	10.41 dB	10.28 dB	10.21 dB
	<i>Daubechies 15</i>	<i>Coiflet 3</i>	<i>Coiflet 5</i>	<i>Symlet 2</i>	<i>Symlet 8</i>
бели шум	7.71 dB	7.54 dB	7.79 dB	12.54 dB	7.71 dB
розе шум	10.23 dB	7.78 dB	7.3 dB	11.58 dB	7.31 dB
	<i>Symlet 15</i>	<i>biorthogonal 1.1</i>	<i>biorthogonal 1.5</i>	<i>biorthogonal 2.8</i>	<i>biorthogonal 3.3</i>
бели шум	7.3 dB	10.95 dB	11.49 dB	9.79 dB	8.73 dB
розе шум	10.19 dB	11.87 dB	11 dB	10.24 dB	7.87 dB
	<i>reverse biorthogonal 1.1</i>	<i>reverse biorthogonal 2.2</i>	<i>reverse biorthogonal 4.4</i>	<i>reverse biorthogonal 5.5</i>	дискретни Meyer
бели шум	10.95 dB	12.43 dB	11.61 dB	7.03 dB	7.59 dB
розе шум	11.87 dB	7.93 dB	10.37 dB	7.65 dB	7.19 dB

Код одзива са белим шумом, одређени таласићи показују посебну стабилност примене јер не доводе до озбиљних изобличења кривих опадања. Криве добијене на овај начин се не налазе испод референтне криве, а имају повећање динамичког опсега чије су бројне вредности прихватљиво велике. У ту групу таласића спадају: *Haar*, *Daubechies 1*, *Daubechies 2*, *Symlet 2*, *biorthogonal 1.1* и *reverse biorthogonal 1.1*. Такође,

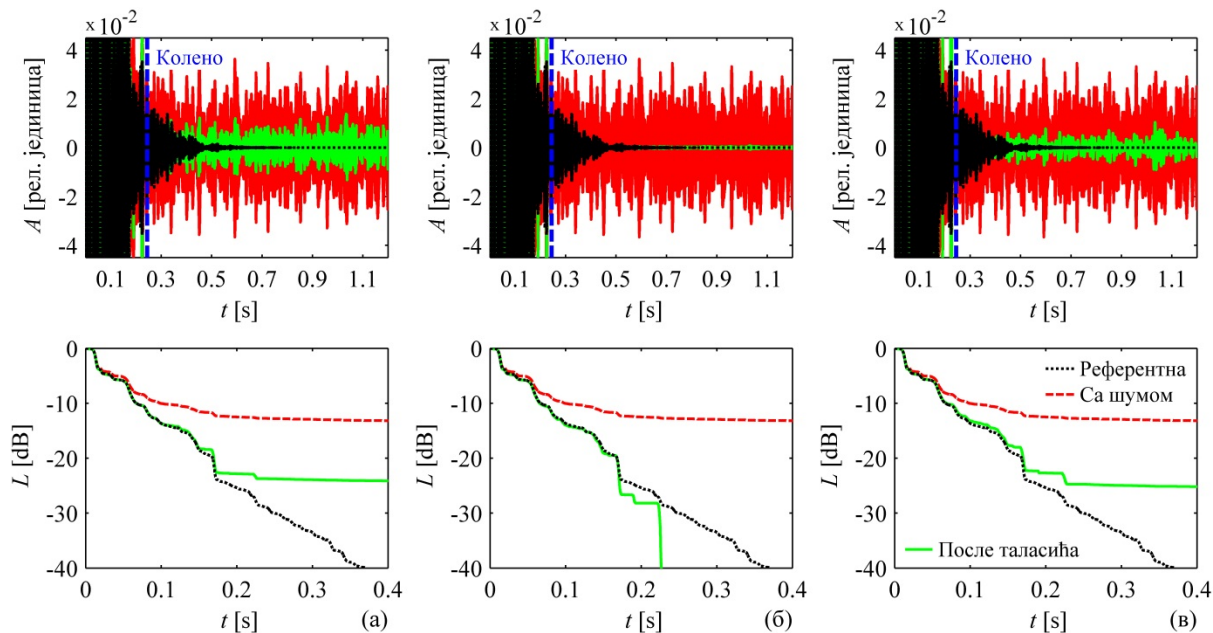
треба поменути да овакве резултате имају још неки таласићи који овде нису приказани, као што је *Coiflet* 1. Оно што се на први поглед може закључити да је *Daubechies* 1 дао исти резултат као и *Haar*, што је и логично јер су та два алгоритма иста. *Daubechies* 2 и *Symlet* 2 имају такође исти резултат, њихови таласни облици су као лик у огледалу. Одређени таласићи имају неповољан тренд, а то је да крива опадања добијена после примене таласића одступа од трајекторије референтне криве опадања и налази се испод ње, без обзира што су бројне вредности повећања динамичког опсега добре. Посебно се у том негативном контексту истичу *Daubechies* 8 и 15, *Symlet* 8 и 15, *reverse biorthogonal* 4.4 и 5.5 и дискретни *Meyer*.

Када се анализирају импулсни одзиви са розе шумом и криве опадања добијене на основу њих, ситуација са повећањем динамичког опсега као последица примене таласића је таква да се добијају значајне вредности повећања. *Coiflet* 1, који није приказан у Табели 4.8, заједно са *Haar*, *Daubechies* 1, *Daubechies* 2, *Symlet* 2, *biorthogonal* 1.1 и *reverse biorthogonal* 1.1 показују најстабилније и најбоље резултате, што је исти случај као и код белог шума. Када се каже најстабилније, мисли се на такав облик кривих опадања добијених после примене таласића које се не налазе испод референтне криве за нивое декомпозиције 5 и 6 (у зависности од избора таласића), и за добијање довољно великог повећања динамичког опсега (већег од, на пример, 5 dB или 6 dB). У свим осталим случајевима, за добијање довољно великог повећања динамичког опсега, крива опадања добијена након примене таласића се чак и у делу реверберантног опадања налази испод референтне криве опадања. Посебно се у том негативном контексту истичу *Daubechies* 8 и 15, *Symlet* 8 и дискретни *Meyer*.

На Сликама 4.35 и 4.36 приказани су неки од карактеристичних случајева импулсних одзива просторије са белим и розе шумом и кривих опадања добијених после примене различитих врста таласића.



Слика 4.35. Ефекат промене врсте таласића: (а) *Daubechies* 2, (б) *Daubechies* 15 и (в) *biorthogonal* 3.3 примењених на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим белим шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz, при чему су у горњем реду приказани импулсни одзиви у временском домену, а у доњем реду криве опадања



Слика 4.36. Ефекат промене врсте таласића: (а) *Daubechies* 2, (б) *Daubechies* 15 и (в) *biorthogonal* 3.3 примењених на синтетизован импулсни одзив просторије са додатим розе шумом нивоа -50 dB у опсегу терце на 1 kHz, при чему су у горњем реду приказани импулсни одзиви у временском домену, а у доњем реду криве опадања

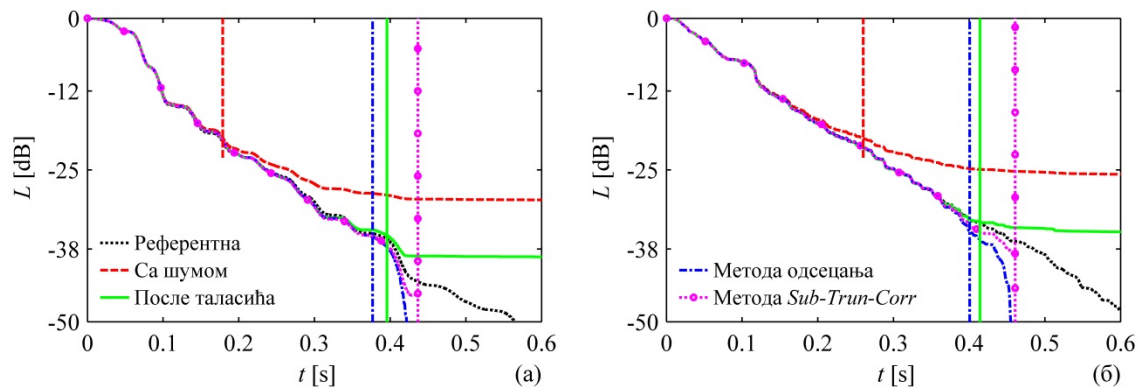
Специјалан случај код обе врсте шума даје *biorthogonal* 3.3 таласић код кога се употребљава ниво декомпозиције 7, што представља одступање од статистичких вредности нивоа декомпозиције за терцни опсег на 1 kHz. Овакви случајеви су веома ретки независно од централне фреквенције терцног опсега који се анализира.

4.5. Поређење методе примене таласића са другим методама за смањење ефеката шума на криве опадања добијене из импулсних одзива просторије

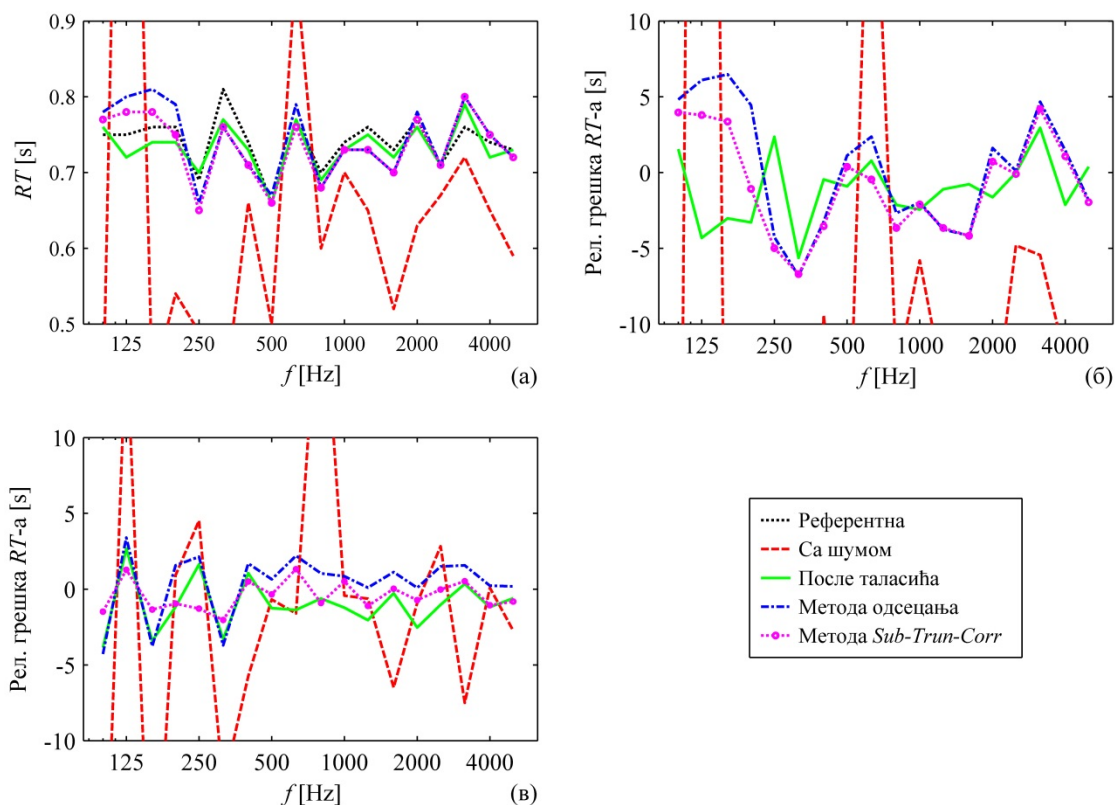
Две методе за смањење ефеката шума на генерисање кривих опадања на основу импулсних одзива просторије су коришћене овде:

- одсецање импулсног одзива (енгл. *Truncation*);
- одузимање средње квадратне вредности шума, одсецање одзива и корекција одсецања (енгл. *Subtraction-Truncation-Correction*).

Ове методе се често срећу у литератури. Одсецање импулсног одзива се помиње у стандарду ISO 3382-1 [46], док је друга метода дефинисана у радовима [49, 112]. Обе методе су искоришћене у овом случају ради поређења са методом која је коришћена до сада, а заснива се на примени таласића. У случају примене таласића, коришћен је оптимални сет параметара таласића на ускопојасном импулсном одзиву просторије, при чему су приказана два случаја, један када је централна фреквенција терцног филтра 250 Hz, и други када је централна фреквенција терцног филтра 2 kHz. Ниво белог шума који је коришћен у овим примерима је -60 dB. Резултати приказани на Слици 4.37, указују да примена таласића омогућава упоредиво смањење ефеката шума на криве опадања као и друге две методе, чак је метода заснована на примени таласића у оба случаја дала нешто бољи резултат од методе засноване на одсецању импулсног одзива. Претходно описана анализа је ограничена само на поменута два терцна опсега и одабрану врсту таласића и шума. Ако би се ситуација сагледала са ширег аспекта, у анализу је укључено 14 синтетизованих импулсних одзива просторије и више врста шумова (нивоа -70 dB, -60 dB и -50 dB), креирани су статистички подаци у виду графика представљених на Слици 4.38, где су узети у обзир терцни опсези од 100 Hz до 5 kHz.



Слика 4.37. Смањења ефекта шума применом три методе на ускопојасним синтетизованим импулсним одзивом просторије са додатим белим шумом нивоа -60 dB у опсегу терце централне фреквенције: (а) 250 Hz и (б) 2 kHz



Слика 4.38. Поређења три методе за смањење ефекта шума код кривих опадања, односно одређивања времена реверберације на основу ових кривих: (а) времена реверберације, (б) релативна грешка времена реверберације у процентима, (в) средња вредност релативне грешке времена реверберације у процентима

На Слици 4.38 приказана су три случаја. У првом случају (Слика 4.38 (а)) који се односи на импулсни одзив коришћен за резултате приказане на Слици 4.37, израчунато је време реверберације за све три методе и све централне фреквенције терцног филтра. График приказује и резултате криве са шумом и криве без шума ради поређења. Као што се са слике види, највећа одступања времена реверберације у односу на криву без шума се јављају код криве са шумом на коју нису примењени таласићи, што је и било за очекивати. Поређењем резултата добијених применом три методе за смањење ефеката шума, може се видети да су резултати слични, са малим одступањима у појединим терцним опсезима. Слика 4.38 (б) показује резултате за релативну грешку времена реверберације у процентима, где се метода заснована на таласићима одлично показала у свим терцним опсезима. На Слици 4.38 (в) је приказана средња вредност релативне грешке времена реверберације за 14 импулсних одзива и три поменута нивоа шума. На основу Слика 4.37, било је за очекивати да метода која се заснива на примени таласића даје сличне резултате као и метода одсецања импулсног одзива, док нешто боље резултате даје метода која се заснива на одузимању средње квадратне вредности шума, одсецању одзива и корекцији одсецања. Без обзира да ли се ради о само једном импулсном одзиву просторије или више њих, резултати су слични.

Применом таласића на импулсне одзиве просторија се генерално добија значајно смањење негативних ефеката шума на криве опадања, и резултати добијени на овај начин су упоредиви са резултатима који се добијају применом две методе које се често користе у литератури. Резултати добијени применом таласића су добра основа за примену таласића у отклањању шума из импулсних одзива просторије, односно смањењу негативних ефеката шума код кривих опадања.

4.6. Примена таласића на мерене импулсне одзиве за смањење утицаја шума

Поред синтетизованих импулсних одзива просторије, таласићи су примењени и на мерене импулсне одзиве за смањење утицаја шума. Како је код мерених импулсних одзива могуће контролисати њихове параметре само у одређеној мери, анализа ефеката примене таласића и приказ резултата је краћи у односу на синтетизоване.

Мерени импулсни одзиви су снимани на више различитих локација (у више просторија) у условима ограничене контроле (која се односи на ниво побудног сигнала и ниво амбијенталне буке). У просторије у којима су вршена мерења спадају: факултетске лабораторије, ходници, студио и др. Као и код синтетизованих одзива, и овде су таласићи примењивани и на широкопојасне и на ускопојасне мерене импулсне одзиве.

Код мерених импулсних одзива не постоји крива опадања добијена без шума (која се код синтетизованих одзива користила као референтна крива опадања). Референтна крива опадања је коришћена за одређивање повећања динамичког опсега после примене таласића. Овај проблем је превазиђен тако што се за референтни импулсни одзив узео онај одзив који је добијен применом најдуже побудног сигнала, односно одзив са највећим динамичким опсегом у поређењу са осталим мереним импулсним одзивима.

4.6.1. Утицај таласића на широкопојасне мерене импулсне одзиве

Код примене таласића на широкопојасне мерене импулсне одзиве, оптималан скуп параметара таласића, који је у претходним секцијама био коришћен, показао се као најбоље решење. Он се састоји од: *minimaxi* правила избора прага, грубог постављања прага, *mln* ре-скалирања са нивоом декомпозиције 3 или 4. Постоје и одређени мерени импулсни одзиви код којих су боље резултате дали нивои декомпозиције 5 или 6. Код њих је праг шума нешто већи, па је из тог разлога потребан

и виши ниво декомпозиције, али су овакви одзиви ретки. *Haar* таласић је и овде имао улогу најстабилнијег таласића, а свеукупно је за испитивања коришћено више од 20 различитих мерених импулсних одзива.

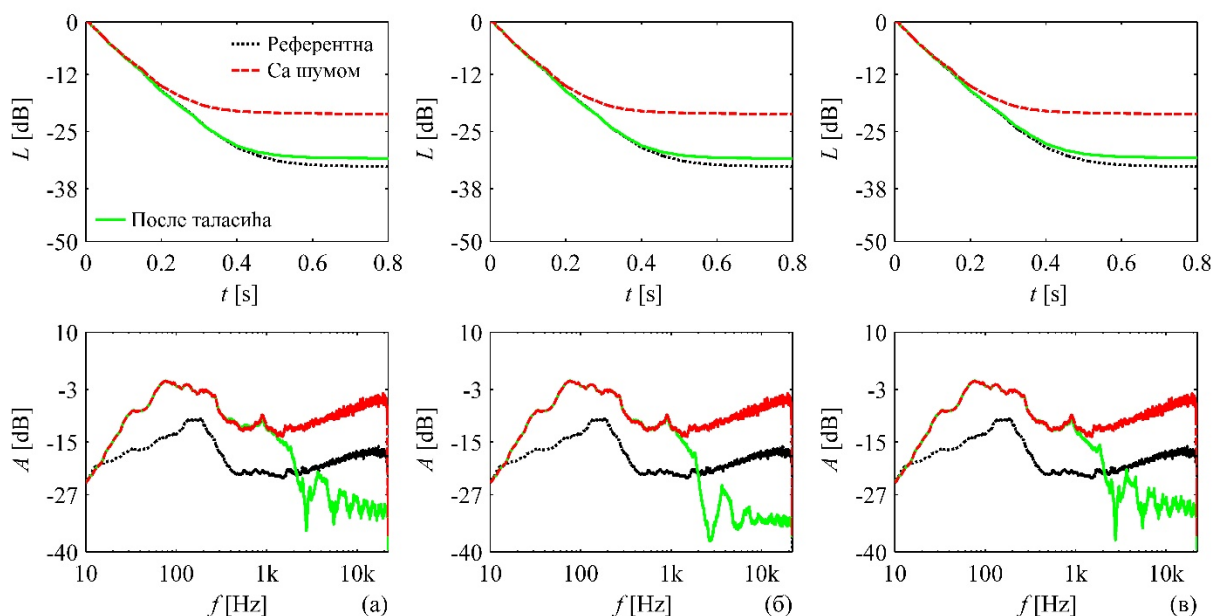
Ако се посматра само један мерени импулсни одзив, повећање динамичког опсега (узимајући као референтни одзив који служи за генерисање референтне криве опадања одзив са највећим динамичким опсегом) применом различитих врста таласића је приказано у Табели 4.9.

Табела 4.9. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића на широкопојасни мерени импулсни одзив

повећање динамичког опсега				
<i>Haar</i>	<i>Daubechies 2</i>	<i>Daubechies 4</i>	<i>Daubechies 6</i>	<i>Daubechies 8</i>
18.26 dB	17.8 dB	17.45 dB	17.31 dB	17.25 dB
<i>Daubechies 15</i>	<i>Coiflet 3</i>	<i>Coiflet 5</i>	<i>Symlet 2</i>	<i>Symlet 8</i>
17.24 dB	17.28 dB	17.25 dB	17.8 dB	17.26 dB
<i>Symlet 15</i>	<i>biorthogonal 1.1</i>	<i>biorthogonal 1.5</i>	<i>biorthogonal 2.8</i>	<i>biorthogonal 3.3</i>
17.26 dB	18.26 dB	12.83 dB	17.31 dB	15.96 dB
<i>reverse biorthogonal 1.1</i>	<i>reverse biorthogonal 2.2</i>	<i>reverse biorthogonal 4.4</i>	<i>reverse biorthogonal 5.5</i>	дискретни <i>Meyer</i>
18.26 dB	13.81 dB	15.85 dB	16.13 dB	17.21 dB

Оно што је битно истаћи, када су широкопојасни мерени импулсни одзиви у питању, повећања динамичког опсега дата у Табели 4.9 су доста велика. Ретко који таласић је имао знатно мање повећање динамичког опсега (*biorthogonal 1.5* и *reverse biorthogonal 2.2* на пример), при чему су чак и ови таласићи довели до значајног повећања динамичког опсега. Са друге стране, повећање динамичког опсега и код других мерених импулсних одзива је углавном било преко 10 dB.

На Слици 4.39 приказани су неки примери ефеката примене различитих таласића из Табеле 4.9, где су дате криве опадања у комбинацији са спектрима.

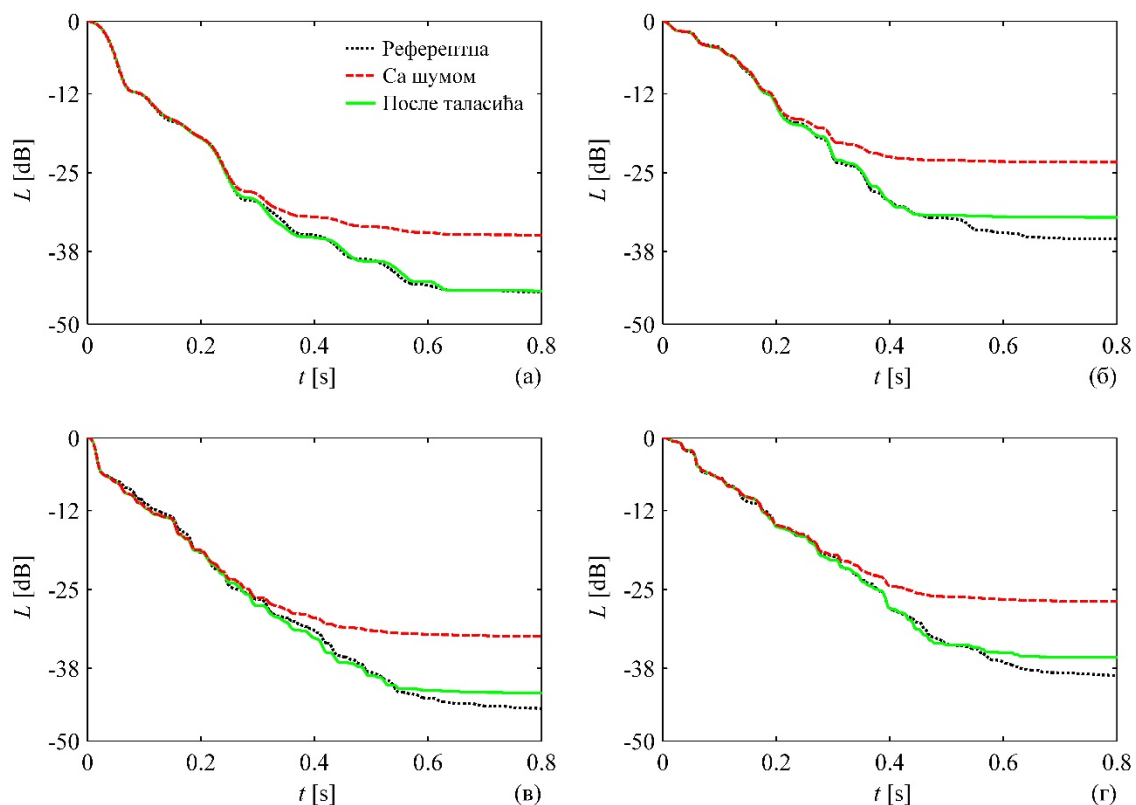


Слика 4.39. Ефекат промене таласића: (а) *Haar*, (б) *Daubechies 2*, (в) *biorthogonal 1.5*, на широкопојасни мерени импулсни одзив просторије, при чему су у првој врсти (горе) дате криве опадања, а у другој врсти (доле) спектри

Сагледавајући Слика 4.39 и криве опадања у сва три случаја, визуелно се стиче утисак да су ефекти примене различитих таласића слични, и да је повећање динамичког опсега слично. Међутим, бројне вредности из Табеле 4.9 потврђују да *biorthogonal 1.5* води до значајно мањег повећања динамичког опсега.

4.6.2. Утицај таласића на ускопојасне мерене импулсне одзиве

Ускопојасни мерени импулсни одзиви се добијају филтрирањем мерених широкопојасних одзива терцним и октавним филтрима. На Слици 4.40 приказане су криве опадања у 4 ситуације када су примењени терцни филтри различитих централних фреквенција. У свим случајевима је употребљен *Haar* таласић са оптималним скупом параметара. Нивои декомпозиције су изабрани сходно централној фреквенцији.



Слика 4.40. Ефекат примене *Haar* таласића са оптималним скупом параметара на мерени импулсни одзив филтриран терцним филтром централне фреквенције: (а) 125 Hz, (б) 250 Hz, (в) 500 Hz и (г) 1 kHz

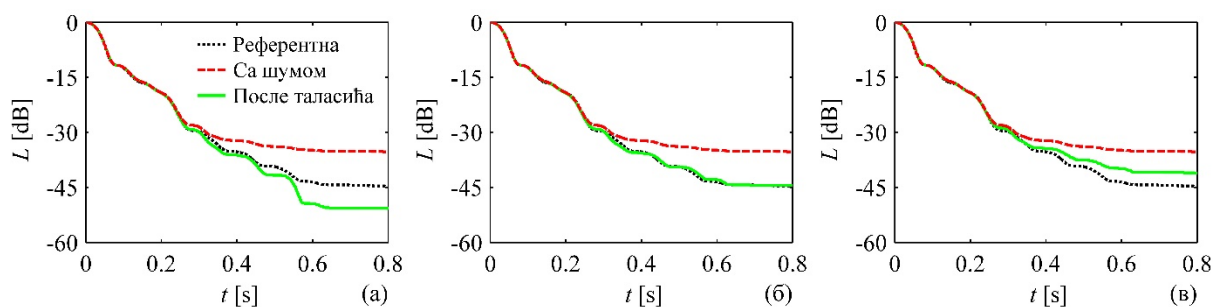
Резултати дати у Табели 4.10 дају јаснију слику о утицају промене врсте таласића код мерених импулсних одзива. У овом случају коришћен је терцни филтар централне фреквенције 125 Hz. Најстабилније резултате када се упореде криве опадања и повећање динамичког опсега дају *Haar*, *Daubechies 2*, *Symlet 2*, *biorthogonal 1.1*, *biorthogonal 3.3* и *reverse biorthogonal 1.1*. Крива опадања добијена применом таласића за поменуте таласиће се не налази испод референтне криве, што уобичајено доводи до стабилнијих резултата. У свим осталим случајевима, употреба таласића даје деформисану криву опадања која иде испод референтне криве, иако је повећање динамичког опсега велико, што се може видети и из Табеле 4.10 код *Daubechies 4*, *Daubechies 15*, *biorthogonal 1.5*, *reverse biorthogonal 2.2* и дискретног *Meyer* таласића. *Biorthogonal 3.3* даје значајно повећање динамичког опсега на нивоу декомпозиције 8 па чак и 9 и 10 (разлике су неколико десетина децибела), а да се крива опадања не налази испод референтне, што је био случај и код синтетизованих ускопојасних импулсних одзива. Код *biorthogonal 3.3* таласића ниво декомпозиције је већи од уобичајеног за предвиђену централну фреквенцију. Такође, треба напоменути да је

ситуација код ускопојасних мерених импулсних одзива слична ситуацији код синтетизованих ускопојасних импулсних одзива. Ово показује да таласић има сличан утицај без обзира на извор и начин настанка импулсног одзива.

Табела 4.10. Повећање динамичког опсега применом различитих врста таласића на ускопојасни мерени импулсни одзив у опсегу терце на 125 Hz

повећање динамичког опсега				
<i>Haar</i>	<i>Daubechies 2</i>	<i>Daubechies 4</i>	<i>Daubechies 6</i>	<i>Daubechies 8</i>
13.36 dB	13.62 dB	13.76 dB	6.27 dB	6.45 dB
<i>Daubechies 15</i>	<i>Coiflet 3</i>	<i>Coiflet 5</i>	<i>Symlet 2</i>	<i>Symlet 8</i>
14.86 dB	6.7 dB	6.11 dB	13.62 dB	6.62 dB
<i>Symlet 15</i>	<i>biorthogonal 1.1</i>	<i>biorthogonal 1.5</i>	<i>biorthogonal 2.8</i>	<i>biorthogonal 3.3</i>
6.9 dB	13.36 dB	13.71 dB	6.77 dB	12.14 dB
<i>reverse biorthogonal 1.1</i>	<i>reverse biorthogonal 2.2</i>	<i>reverse biorthogonal 4.4</i>	<i>reverse biorthogonal 5.5</i>	дискретни <i>Meyer</i>
13.36 dB	13.04 dB	7 dB	6.63 dB	13.71 dB

Криве опадања за неколико специфичних случајева из Табеле 4.10 су приказане на Слици 4.41.



Слика 4.41. Ефекат промене врсте таласића: (а) *Daubechies 4*, (б) *biorthogonal 1.1*, (в) *biorthogonal 3.3*, код кривих опадања мереног импулсног одзива просторије у опсегу терцне централне фреквенције 125 Hz

4.7. Дискусија резултата

Употреба таласића у отклањању шума из импулсних одзива просторије се показала као сврсисходна метода за ову намену. Преглед коришћене литературе је указивао на велики потенцијал таласића у области отклањања шума из сигнала, али готово да није било радова који су повезивали таласиће и импулсне одзиве просторије. Значајан задатак је био утврдити на који начин ће таласићи отклонити шум у што већем обиму, а да користан део импулсних одзива просторије остане непромењен. Огромну улогу у томе имају параметри таласића који се морају детаљно испитати како би се добио оптимални скуп параметара који се може препоручити у даљим истраживањима. Било да је реч о широкопојасним импулсним одзивима просторије или ускопојасним (који су претходно филтрирани у опсегу октава и терци), поменути скуп параметара који је дао најбоље резултате је: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага, *mln* ре-скалирање. Овај скуп параметара је важио и за синтетизоване и за мерене импулсне одзиве просторије. Оптимални ниво декомпозиције таласића је варирао у зависности од самих импулсних одзива просторије, филтра (октавног или терцног), као и од употребљеног шума, тако да се он кретао у опсегу од 2 до 15.

Како би квантификовао ефекат примене таласића са одговарајућим параметрима, односно како би се квантификовало колико су таласићи били ефикасни у отклањању шума из импулсних одзива просторије, уведене су две мере помоћу којих су се поредили добијени резултати. Једна од мера је повећање динамичког опсега, које је достигало вредности и до око 20 dB. Друга мера је смањење прага шума, која је достигала вредности и до око 9 dB. Резултати код ускопојасних сигнала добијени применом таласића су упоређени са резултатима добијеним другим стандардним методама за отклањање шума. Примена таласића се у овим поређењима показала као метода која не одступа значајно од других стандардних метода, чак и у неким случајевима даје и боље резултате, што је и показано у секцији 4.5.

5. ОДРЕЂИВАЊЕ КОЛЕНА У ИМПУЛСНИМ ОДЗИВИМА ПРОСТОРИЈЕ

Последњих неколико деценија импулсни одзиви просторије су међу најзначајнијим карактеристикама када се говори о акустици просторије, посебно из разлога да се на основу њих могу одредити параметри који комплетно описују просторију са акустичког аспекта.

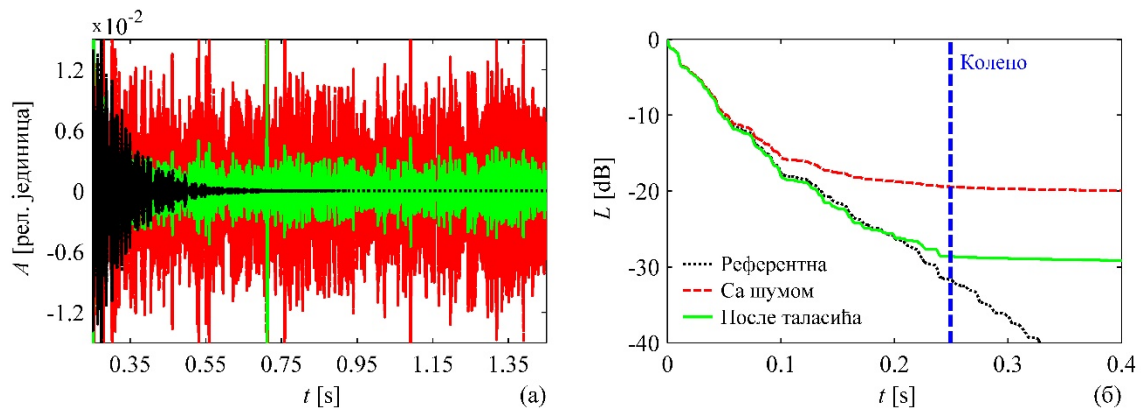
Један од битних корака у обради импулсног одзива просторије је добијање интегралне криве опадања применом *Schroeder*-ове интеграције [54, 108, 109]. За добијање овакве криве опадања, шум у импулсном одзиву просторије представља један од највећих проблема, односно ометајућих фактора [49, 103, 104, 110]. Постојање шума доводи до формирања специфичног облика криве опадања и смањења динамичког опсега криве, што отежава поуздано издвајање акустичких параметара на основу криве опадања. Претходна поглавља показала су да таласићи могу са великим успехом да смање утицај шума у импулсним одзивима просторије, односно да повећају динамички опсег добијен на основу импулсних одзива просторије.

Један од битних појмова који треба узети у обзир, када је смањење утицаја шума у обради импулсног одзива просторије, је тачка одсецања (*truncation point*) [47, 53, 112]. Процес проналажења места колена у пракси није лак задатак и неколико метода у литератури је до сада презентовано [50, 54]. Аутор ове дисертације је један од твораца идеје да се таласићи могу применити и за одређивање колена импулсног одзива просторије. У наставку ће бити приказани неки од карактеристичних случајева који се јављају при одређивању колена применом таласића. У упоредном приказу биће коришћена метода базирана на нелинеарном моделу опадања звучне енергије (*nonlinear decay model*) [53] за одређивања колена, који је описан раније.

5.1. Дефинисање параметара таласића за одређивање колена у импулсним одзивима просторије

У циљу испитивања могућности примене таласића за одређивање колена одзива коришћени су синтетизовани *ISM* импулсни одзиви на које је додат шум нивоа од -70 dB до -50 dB. У овој дисертацији приказани су случајеви са шумом нивоа -60 dB. И у овом случају су испитане фамилије таласића као и код отклањања шума: *Haar*, *Daubechies*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* и дискретни *Meyer*. Параметри таласића које треба узети у обзир чине: ниво декомпозиције, правило избора прага, метода постављања прага и ре-скалирање прага. Оптимални скуп параметара таласића и код одређивања колена чине: *minimax* избор прага, грубо постављање прага и *mln* ре-скалирање прага. Декомпозиција је извршена од нивоа 3 до нивоа 15. Занимљиво је истаћи да се овде у већини случајева добијају бољи резултати када је ниво декомпозиције релативно велики (најчешће 15), односно значајно већи него код отклањања шума из импулсних одзива, где је ниво декомпозиције максимално ишао до 9 у случају када је централна фреквенција терцног и октавног филтра била 100 Hz и спуштао се минимално до 2 на вишим фреквенцијама. Поступак за одређивање места колена применом таласића је илустрован на блок дијаграму у глави 4.2, на Слици 4.3.

Класичан пример одређивања колена импулсног одзива просторије (односно криве опадања) применом таласића приказан је на Слици 5.1, где је коришћен импулсни одзив синтетизован *ISM* методом, филтриран терцним филтром централне фреквенције 1 kHz. Коришћен је *Haar* таласић нивоа декомпозиције 5. Са Слике 5.1 се може видети да је шум значајно редукован иза колена. Ако се упореде криве опадања пре и након примене таласића, може се закључити да крива опадања добијена применом таласића има сличан облик као и крива добијена без примене таласића, односно могу се уочити три карактеристична дела криве опадања: реверберантно опадање, опадање са мањом стрмином као последица кумулативног сабирања шума и нагли пад на крају криве због коначне границе интеграције. Ипак, крива добијена применом таласића је значајно испод криве добијене без примене таласића, односно примена таласића доводи до повећања динамичког опсега.



Слика 5.1. Одређивање колена импулсног одзива просторије синтетизованог *ISM* методом у опсегу терце на 2 kHz применом *Haar* таласића: (а) импулсни одзиви у временском домену иза колена и (б) криве опадања

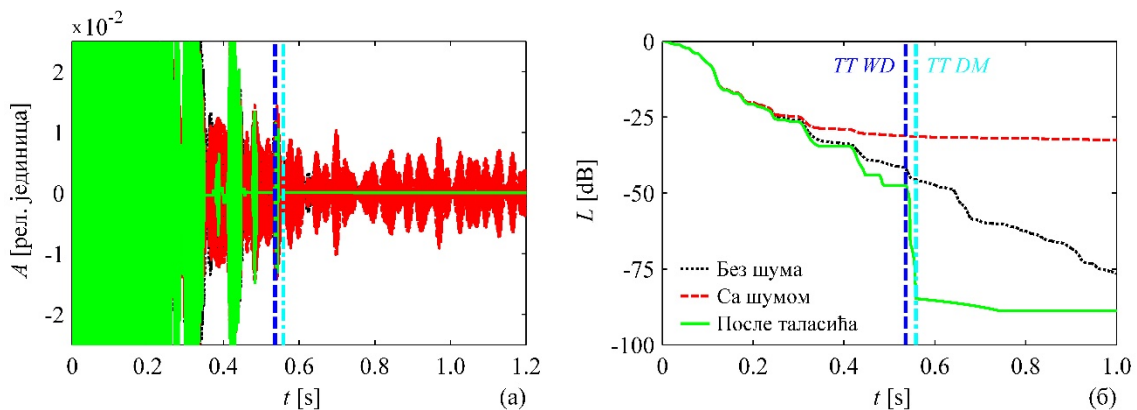
За одређивање колена применом таласића, користе се увек исти параметри таласића који припадају претходно поменутом оптималном скупу параметара, а ниво декомпозиције добија релативно велике вредности. Важно је напоменути да се при одређивању колена на овај начин јавља неколико карактеристичних случајева који ће бити објашњени у наставку. Ради поређења, приказани су и резултати одређивања колена добијени применом нелинеарног модела опадања.

5.1.1. Место колена на месту стрмог пада криве опадања

Карактеристичан пример који се јавља често приликом одређивања колена применом таласића је приказан на Слици 5.2, где је место колена одређено таласићем обележено са *TT WD* (*Truncation time wavelet de-noising*), а место колена применом нелинеарног модела опадања са *TT DM* (*Truncation time nonlinear decay model*) [53]. Ове ознаке важиће за све примере у наставку. У питању је случај када примена таласића на импулсни одзив доводи до формирања криве опадања која има специфичан облик (јавља се стрми пад (стрмина)) на одређеном месту криве опадања, и управо је то место које се сматра коленом. Поменути нагли пад код криве опадања је последица наглог смањења амплитуде шума од одређеног временског тренутка до краја одзива, што се може видети на Слици 5.2 (а) (амплитуда шума постаје блиска 0). Оно што је такође важно напоменути је да упоређујући место колена добијено применом таласића и место колена добијено нелинеарним моделом опадања, одступања су минимална, односно оба

приступа дају готово идентично колена. Овим је показано да се таласићи могу користити за одређивање колена импулсног одзива просторије.

Ипак, у неким случајевима се дешава да је нагли пад у амплитуди шума померен у односу на место колена. Претежно се ови случајеви јављају код ускопојасних импулсних одзива, односно одзива у опсезима терци и октава на ниским и средњим фреквенцијама. За случај приказан на Слици 5.2, централна фреквенција терцног филтра је 315 Hz, а ниво декомпозиције таласића је 15.



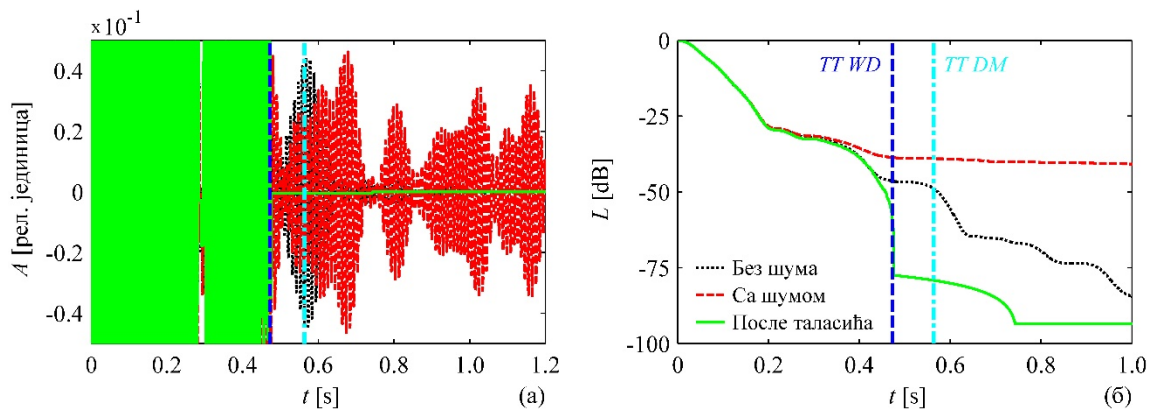
Слика 5.2. Одређивање колена применом *Haar* таласића на синтетизовани *ISM* импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 315 Hz, када се јавља стрми пад у кривој опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања

5.1.2. Место колена код стрмог пада криве опадања када се јавља међу-регион

У овом случају место колена одређено нелинеарним моделом опадања је нешто удаљеније од места које је одређено таласићем, као што је приказано на Слици 5.3, која се односи на одзив у опсегу терце на 100 Hz, где је ниво декомпозиције таласића 15. Карактеристично за овај случај је што се након наглог пада криве опадања јавља један међу-регион. Ако се анализирају импулсни одзиви у временском домену (Слика 5.3 (а)), место колена одређено таласићем није тачно на месту где амплитуда импулсног одзива пада на занемариво мале вредности (блиске нултој вредности). Постојање

поменутог међу-региона у временском домену доводи до тога да се јавља деформација криве опадања која прати овај међу-регион (видети Сliku 5.3 (б)).

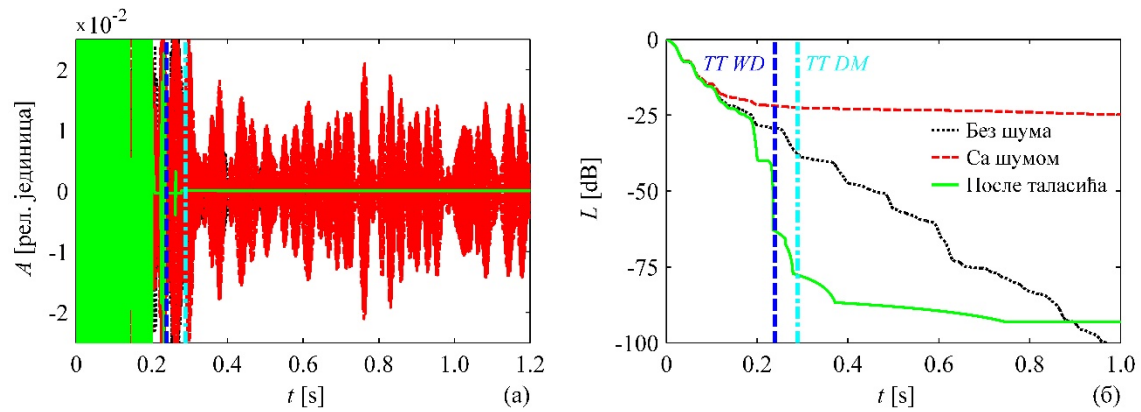
Овај случај се најчешће јавља код ускопојасних импулсних одзива у опсезима терци и октава на ниским фреквенцијама. Могуће решење за превазилажење утицаја међу-региона је да се место колена постави на средину међу-региона.



Слика 5.3. Одређивање колена применом *Haar* таласића на синтетизовани *ISM* импулсни одзив просторије у опсегу терчне централне фреквенције 100 Hz када се јавља стрми пад и међу-регион у кривој опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања

5.1.3. Место колена код стрмог пада криве опадања када се јавља више међу-региона

Могу се јавити и случајеви слични претходном (са међу-регионом), уз разлику да се сада јавља више међу-региона након наглог пада криве опадања. Овај случај је компликованији за одређивање места колена, и најбољи резултати се добијају када се место колена постави на крај првог међу-региона, као што је то приказано на Слици 5.4 за импулсни одзив у опсегу терце на 315 Hz, и ниво декомпозиције таласића 15. Треба истаћи да је овај случај доста редак у односу на претходна два случаја, што донекле олакшава целокупан процес.

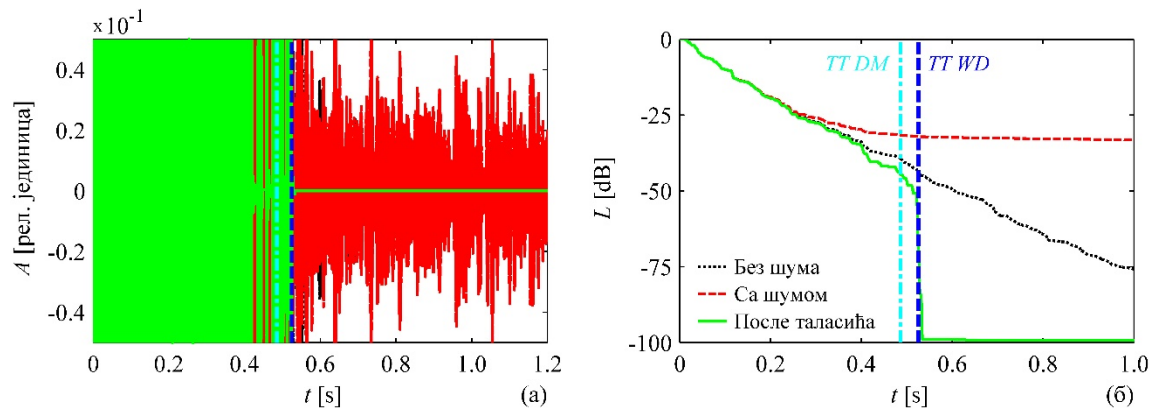


Слика 5.4. Одређивање колена применом *Haar* таласића на синтетизовани *ISM* импулсни одзив просторије у опсегу терчне централне фреквенције 315 Hz, када се јавља стрми пад и више међу-региона: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања

5.1.4. Место колена код стрмог пада криве опадања након места колена одређеног нелинеарним моделом опадања

Четврти случај који се овде описује је такође врло редак у односу на прва два, и углавном се појављује код ускопојасних одзива у опсегу терце и октаве на фреквенцијама између 1 kHz и 2.5 kHz. Овде се место почетка стрмине (наглог пада) код криве опадања добијене применом таласића јавља иза колена добијеног нелинеарним моделом опадања (видети Сliku 5.5 која приказује одзив у опсегу терце на 1.25 kHz и одговарајућу криву опадања када је примењен ниво декомпозиције таласића 15).

Код оваквог случаја није једноставно увести корекцију која би кориговала добијено место колена. Ипак, како је претходно поменуто, овај случај се јако ретко јавља у пракси.

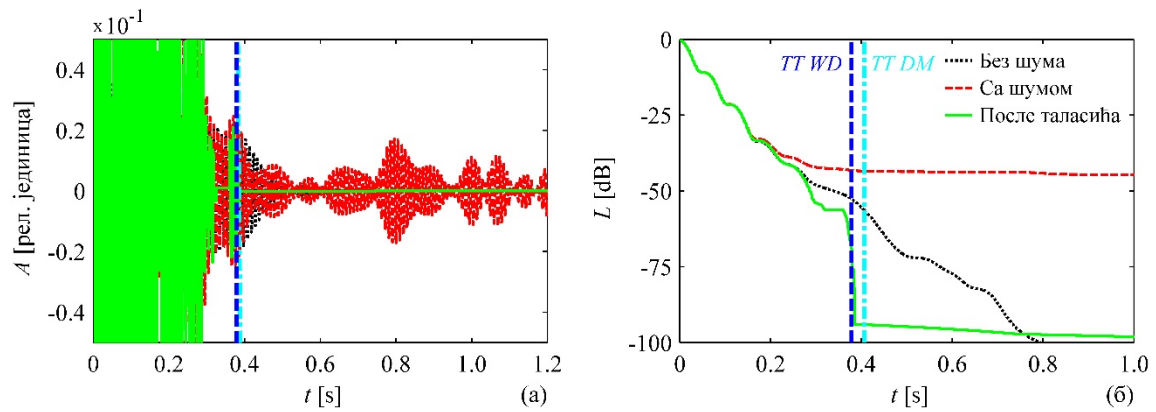


Слика 5.5. Одређивање колена применом *Haar* таласића на синтетизовани *ISM* импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 1.25 kHz, када се јавља стрми пад криве опадања након колена које је одређено нелинеарним моделом опадања: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања

5.1.5. Одређивање колена код других сигнала

Одређивање места колена код импулсних одзива просторије применом таласића је дало добре резултате. Метода у свим поменутих случајевима је аутоматизована, тако да не постоји потреба да крајњи корисник било какву активност спроводи мануелно (ручно). Идентификовани случај када метода даје благо одступање резултата од нелинеарног модела опадања се ретко јавља у пракси и добијено одступање није велико.

У претходним примерима коришћен је импулсни одзив просторије синтетизован *ISM* методом. Овде треба нагласити да и други импулсни одзиви дају сличне резултате, па је на Слици 5.6 приказан пример са импулсним одзивом са експоненцијалним опадањем (*ED*). Приказани пример се односи на први случај код импулсног одзива просторије синтетизованог *ISM* методом где се јавља стрми пад код криве опадања добијене после примене таласића управо на месту колена. И овде се ради о ускопојасном одзиву у опсегу терце централне фреквенције 100 Hz, а ниво декомпозиције таласића је 15.



Слика 5.6. Одређивање колена применом *Haar* таласића на синтетизовани *ED* импулсни одзив просторије у опсегу терцне централне фреквенције 100 Hz, када се јавља стрми пад у кривој опадања на месту колена: (а) импулсни одзиви у временском домену и (б) криве опадања

5.2. Дискусија резултата

Сумирајући све резултате, показано је да се таласићи поред примене за отклањање шума импулсних одзива просторије и повећање динамичког опсега, могу применити и за одређивање колена импулсних одзива просторије. Најповољнији случај је приказан на Слици 5.2, када се за колено узима место стрмог пада криве опадања након употребе таласића. У највећем броју случајева се стрми пад криве опадања који се сматра коленом појављује или на месту колена или нешто испред места колена које је одређено нелинеарним моделом опадања. Само у ретким случајевима се може десити да се колено одређено применом таласића налази иза места колена одређеног нелинеарним моделом опадања (Слика 5.5). Разлика места колена добијеног помоћу поменуте две методе износи углавном мање од 20 ms, чак је у доста случајева и мања од 10 ms. Врло ретко ова разлика може да иде и до 60 ms, или евентуално 100 ms. Ако се у процесу одређивања колена таласићима појаве међу-региони, као на Сликама 5.3 и 5.4, тада поменута разлика између колена износи обично између 20 ms и 30 ms. Важно је још додати да се одређеним корекцијама ове разлике могу смањити, али на уштрб повећања комплексности развоја аутоматског метода одређивања колена.

6. ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА АУДИО СИГНАЛА

Под параметризацијом сигнала се овде подразумева представљање сигнала преко релевантних параметара, где параметри представљају величине које карактеришу и описују сигнал са одређеног аспекта. Узимајући у обзир дату дефиницију, под параметрима сигнала могу се сматрати и атрибути, дескриптори или обележја (*Features* на енглеском језику). Представљање сигнала преко параметара је веома важан процес у поступку класификације аудио сигнала. Метода која се све чешће појављује, подразумева употребу таласића као модела за издвајања обележја из сигнала [64, 68, 69]. Особина таласића везана за декомпозицију на коефицијенте детаља и апроксимације је директно везана за параметризацију сигнала, било да је реч о аудио сигнаlima, говору или слици [122, 123]. Издвојена обележја применом таласића су одлична припрема за каснију класификацију [64, 68, 73, 124].

Поменути метода базирана на примени таласића може се искористити и за издвајање обележја аудио сигнала снимљених при раду различитих мотора. Многи истраживачи су са успехом успели да уз помоћ таласића издвоје важна обележја из аудио сигнала и дали јасне смернице ка даљем коришћењу истих у разним прегледаним радовима [64, 68, 69, 73, 124]. У наставку дисертације стављен је акценат на моторе једносмерне струје, чији рад је сниман у погону фабрике и лабораторији. Аудио сигнали поменутих мотора даље су коришћени у временско-фреквенцијској анализи и издвајању обележја применом таласића.

Пошто је акценат овог поглавља на издвајању обележја из аудио сигнала мотора једносмерне струје применом таласића, важно је поменути и друге алтернативе за издвајање обележја. Пре тога, треба указати и на грешке које се јављају у раду мотора и њиховој конструкцији, а најчешће грешке се детектују у статору и ротору мотора [67]. Неке од њих су: грешке у намотајима и језгру статора, грешке у намотајима ротора, грешке оштећења осовине ротора, грешке изазване оштећеним лежајевима, и друге [67]. Снимањем звука (аудио сигнала) који се генерише приликом рада мотора, могуће је издвојити одређена обележја која указују да у раду тог мотора управо постоји грешка [64, 67]. Предност анализе аудио сигнала у оваквим системима често се везује за саму

апаратуру за снимање, јер се она доминантно односи на микрофон који ће бити постављен близу мотора и где није неопходан физички контакт. Међутим, у оваквом приступу се појављују и одређени недостаци, као што је амбијентална бука, која може да утиче на квалитет снимљених сигнала [74].

Обележја која се издвајају из аудио сигнала (звуча) мотора једносмерне струје, су углавном она која припадају скупу обележја у временском или фреквенцијском домену [64, 67]. У складу са тим, обележја из аудио сигнала се издвајају применом обраде сигнала, попут брзе Фуријеове трансформације, краткотрајне Фуријеове трансформације, издвајање спектра густине снаге (енгл. *Power Spectral Density – PSD*), примена корелације [125, 126], итд.

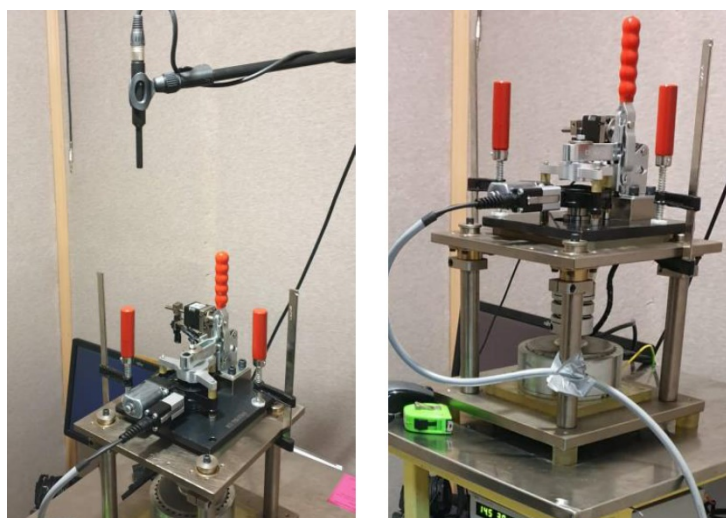
Издвојена обележја из аудио сигнала се углавном даље користе за класификацију одговарајућим методама машинског и дубоког учења, попут *KNN* методе (енгл. *K-nearest neighbors*), неуронским мрежама и другим методама [125]. Ефикасност ових метода у значајној мери зависи и од избора обележја. Један од приступа класификације који за припрему обележја користи таласиће у предпроцесирању је *Kohonen Self-Organizing Map – SOM* [126].

6.1. Примењене методе

Преко 120 различитих мотора једносмерне струје је тестирано у циљу проналажења јасних разлика између мотора који имају у свом раду неку грешку (дефект) и оних који немају грешку. Звукови који се генеришу при раду мотора су снимани у полу-анехоичним условима, где се рефлексија звука јавља само од пода просторије. Звукови су снимани у два окружења, један је погон фабрике, а други је лабораторија. Сви мотори су постављани на клупу за тестирање пре снимања. Клуба за тестирање је конструисана тако да може да обезбеди адекватне услове и оптерећење мотора као у реалним условима, тако да су снимљени аудио сигнали у себи садржали све потребне информације рада мотора у реалним условима. Снимања су вршена тако да је сваки мотор имао ротације у оба смера, где је укупно снимање трајало око 8 секунди по смеру када се ради о погону и око 2 секунде у лабораторијским условима. Микрофон је био удаљен око 40 cm од мотора. Сваки тестирани мотор је био смештен у

семи-анехоичну комору која се налази у погону како би се добили семи-анехоични услови приликом снимања. Како се ради о индустријском окружењу, амбијентална бука је представљала значајан проблем. Њен утицај је умањен тако што се снимање обављало у условима када остале машине у погону не раде (најчешће викендом, то јест нерадним данима). У таквим околностима, утицај амбијенталне буке се повећава са смањењем фреквенције, и она постаје значајан ометајући фактор на фреквенцијама испод 300 Hz.

Како би се избегли делови сигнала који у себи не носе корисну информацију о моторима (делови сигнала генерисани приликом стартовања мотора и након заустављања мотора), сви сигнали из погона су обрађени пре примене методе издвајања обележја. Тиме су сви сигнали скраћени на 5 секунди корисног сигнала. Ниво амбијенталне буке у лабораторији је знатно нижи, тако да су услови за снимање звука били повољнији. Фреквенција одмеравања сигнала приликом снимања је била 16 kHz. Илустрација поставке мерне опреме за снимање звука мотора је дата на Слици 6.1.



Слика 6.1. Приказ поставке за снимање звука мотора једносмерне струје [73]

Неке од важних карактеристика мотора су: напајање од 12 V до 13 V, излазна снага од 18 W до 25 W, и оквирне димензије $16 \times 13.5 \times 4.5$ cm. Када се каже оквирне димензије, мисли се на то да нису сви мотори били исте врсте и потпуно истих димензија. Најчешћи дефекти који су се јављали код мотора су везани за грешке које изазива комутатор, механичка оштећења и неизбалансираност елемената у мотору, проблеми са лежајевима и друго.

Иницијално истраживање је почело са приказом аудио сигнала у временском и фреквенцијском домену у циљу проналажења разлика између мотора без грешке и оних са грешком. У већини случајева (поготово за временски домен), разлике између мотора су минималне јер се ради о новим моторима тек изашлим из производње, и примена само временског домена не даје довољно велике разлике за класификацију.

Да би се разлике између звука мотора сагледале са другог аспекта и касније приступило класификацији, снимљени аудио сигнали мотора једносмерне струје су обрађени применом таласића. Ова метода подразумева декомпозицију сигнала неком врстом таласића на коефицијенте апроксимације и детаља. На сваком нивоу се врше поређења између коефицијената детаља два мотора која се у том тренутку анализирају. Ниво декомпозиције креће од вредности 1 и узима вредности до 8. Многи аутори се баве проблемом одређивања оптималног нивоа декомпозиције. У одређеним радовима ниво декомпозиције износи 8 или 9 [64, 68, 70], док неки аутори користе ниво декомпозиције 3, 4 или 5 [61, 67]. Одређена врста таласића има важну улогу у издвајању обележја и класификацији, па је у одређеним радовима приказана анализа везана за адекватан избор врсте таласића [64, 72]. Као и у претходним разматрањима, и овде се користе следеће фамилије таласића: *Haar*, *Daubechies*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* и дискретни *Meyer*.

Процесирање базирано на примени таласића се обавља на два начина, где се код првог таласићи примењују на читав аудио сигнал у трајању од 5 s, док се код другог начина најпре врши сегментација аудио сигнала на сегменте трајања 50 ms, а затим се таласићи примењују на ове сегменте аудио сигнала. У оба случаја се као излаз добијају коефицијенти детаља и апроксимације који се посматрају као параметри (обележја) сигнала. Код сегментираних аудио сигнала се одређује и средња вредност коефицијената детаља из сваког од сегмената, као и стандардна девијација [62, 122]. Анализа овако добијених обележја треба да покаже да ли она носе довољно информација да се користе у алгоритмима за класификацију како би се детектовала разлика између мотора са грешком и мотора без грешке.

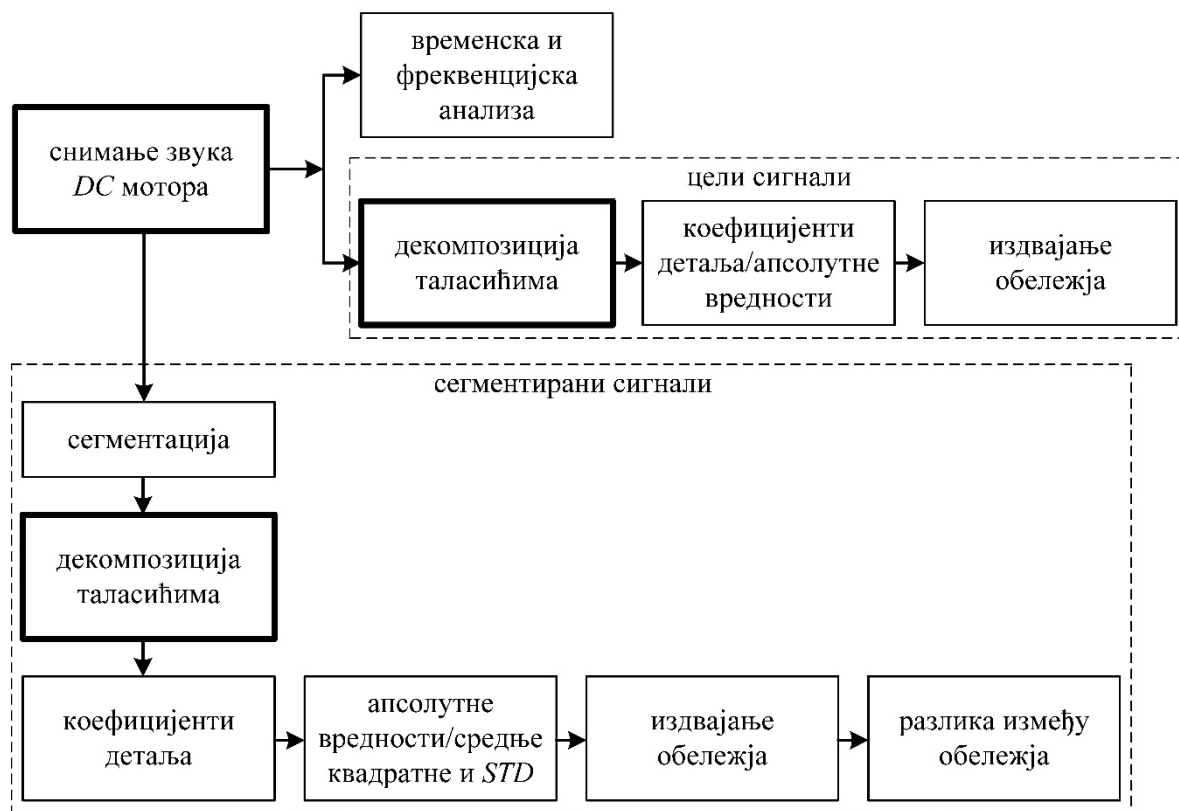
За разлику од примене таласића у процесу отклањања шума из аудио сигнала које је било презентовано у претходним поглављима, издвајање обележја применом таласића у програмском пакету *Matlab* је мало поједностављено. Наиме, сада не треба пратити већину параметара који су раније били описани већ само ниво декомпозиције и

фамилију таласића. Параметри: правило избора прага, метода постављања прага и рескалирање се овде не користе, из разлога што су ти параметри везани за процес отклањања шума, а не за параметризацију. Основне три функције које се употребљавају у овом случају су [127]:

- *wavedec* – врши декомпозицију сигнала за избрани ниво декомпозиције и фамилију таласића;
- *apprcoef* – издваја коефицијенте апроксимације приликом декомпозиције;
- *detcoef* – издваја коефицијенте детаља приликом декомпозиције.

Поред описане генералне анализе, уведен је још један параметар који приказује меру разлике између коефицијената детаља на различитим нивоима декомпозиције као нумеричку вредност. Ова мера која је названа разлика између обележја, се израчунава као средња вредност разлике обележја мотора без грешке и мотора са грешком нормализована средњом вредношћу коефицијената на сваком нивоу понаособ [72, 73].

Описани процес обраде са додатним детаљима који су објашњени у наставку је приказан на блок дијаграму на Слици 6.2.



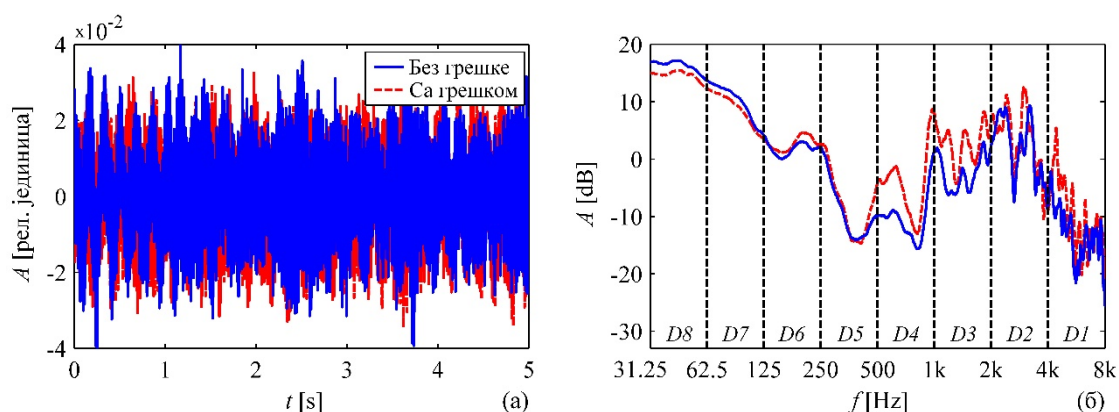
Слика 6.2. Блок дијаграм обраде аудио сигнала мотора једносмерне струје

6.2. Резултати издвајања обележја

За илустрацију резултата, издвојени су само репрезентативни случајеви који су овде приказани. Најпре су дати резултати примене таласића на читавим сигналимa, а након тога резултати примене таласића над сегментираним сигналимa. Декомпозиција таласића је вршена до нивоa 8 и коришћени су сви наведени таласићи у анализи.

6.2.1. Издвајање обележја код читавих сигнала

Иницијално истраживање се заснивало на примени таласића у издвајању обележја над целим сигналимa. У овом случају није вршена сегментација сигнала. На Слици 6.3 приказани су респективно сигнали мотора са грешком и без грешке из погона у временском и фреквенцијском домену.

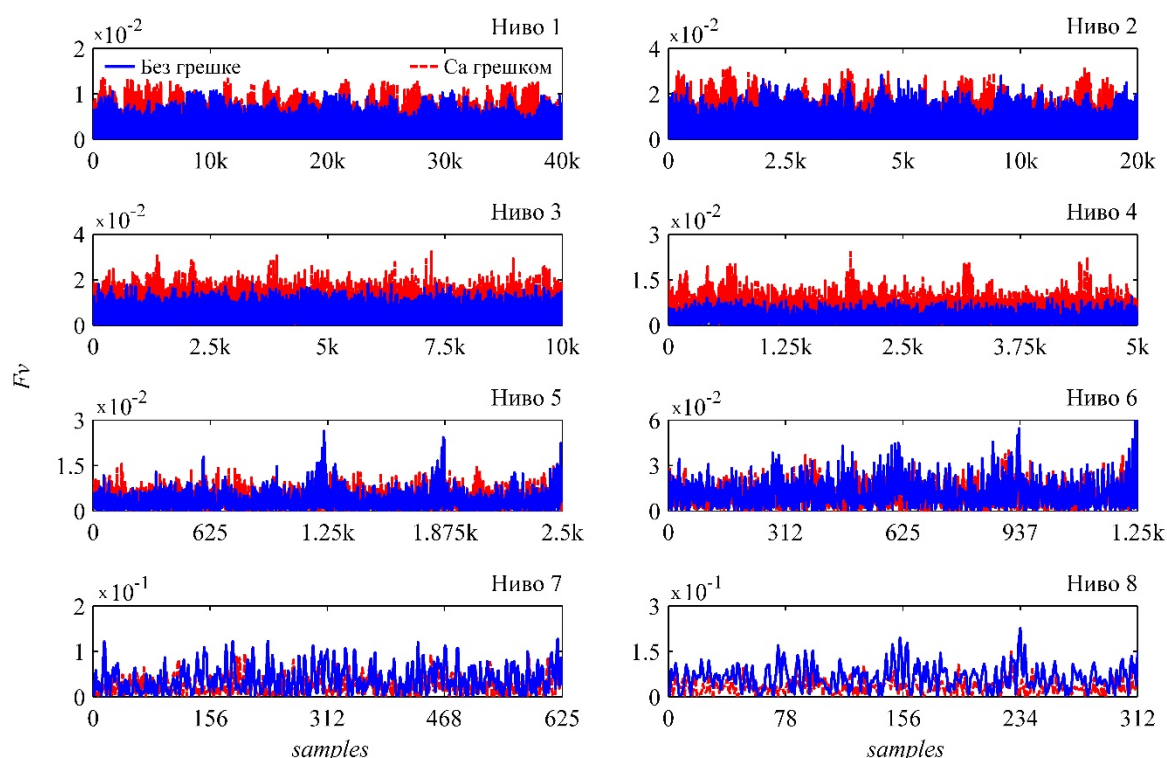


Слика 6.3. Аудио сигнали мотора једносмерне струје у смеру ротације 1 без грешке (плаво) и са грешком (црвено) у: (а) временском домену, (б) фреквенцијском домену

Као што се са Слике 6.3 (а) може видети сигнали мотора једносмерне струје са грешком и без грешке се врло мало разликују. Веома је тешко успоставити јасну разлику између ова два мотора у временском домену. Ако се посматра фреквенцијски домен и спектар ова два сигнала (Слика 6.3 (б)), ситуација је боља, али и даље те разлике нису велике. Како је циљ видети да ли се ситуација мења после издвајања одређених обележја из приказаних сигнала, приступа се методи декомпозиције сигнала применом таласића. Коришћен је *Daubechies 2* таласић. Како се у литератури уместо

самих коефицијената детаља често користи апсолутна вредност ових коефицијената [69, 122], таков приступ је и овде примењен.

На Слици 6.4 приказана је декомпозиција сигнала са Слике 6.3 на коефицијенте детаља до нивоа 8. Разлике сада на одређеном нивоу декомпозиције могу бити уочљивије. На пример, на Слици 6.4, на нивоу 3 и 4 постоје одређене разлике у амплитуди коефицијената детаља које се могу узети у обзир. Приликом повећавања нивоа декомпозиције, смањује се број коефицијената детаља (Слика 6.4). Свако повећање нивоа декомпозиције за један доводи до смањења броја коефицијената детаља за половину, што и јесте у складу са теоријом таласића.



Слика 6.4. Апсолутне вредности коефицијената детаља након примене *Daubechies 2* таласића на цео сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8

Важно је напоменути да постоји одређена зависност између коефицијената детаља и фреквенцијског домена посматраних сигнала. Ако се обрати пажња на Сliku 6.3 (б), види се да је спектар сигнала мотора са грешком и без грешке подељен у 8 опсега обележених ознакама од *D1* до *D8*. Како су сигнали одмеравани фреквенцијом 16 kHz, максимална фреквенција у сигналу је 8 kHz. Декомпозиција сигнала креће од

нивоа 1 где се сигнали пропуштају кроз нископропусни и високопропусни филтар. Сигнали који су прошли кроз нископропусни филтар се поново одмеравају новом фреквенцијом одмеравања која је двоструко мања и образују коефицијенте апроксимације нивоа 1. Сигнали који су прошли кроз високопропусни филтар образују коефицијенте детаља нивоа 1. Коефицијенти апроксимације се даље истим поступком обрађују на нивоу 2 и тако даље до крајњег нивоа. На основу поменутог се закључује да фреквенцијски опсег од 4 kHz до 8 kHz одговара коефицијентима детаља нивоа 1. Сагласно томе, за нивое декомпозиције од 1 до 8 важи зависност у Табели 6.1.

Табела 6.1. Веза нивоа декомпозиције и фреквенцијских опсега коефицијената детаља

ниво декомпозиције	фреквенцијски опсег коефицијената детаља
1	4 kHz – 8 kHz
2	2 kHz – 4 kHz
3	1 kHz – 2 kHz
4	500 Hz – 1 kHz
5	250 Hz – 500 Hz
6	125 Hz – 250 Hz
7	62.5 Hz – 125 Hz
8	31.25 Hz – 62.5 Hz

6.2.2. Издајање обележја код сегментираних сигнала

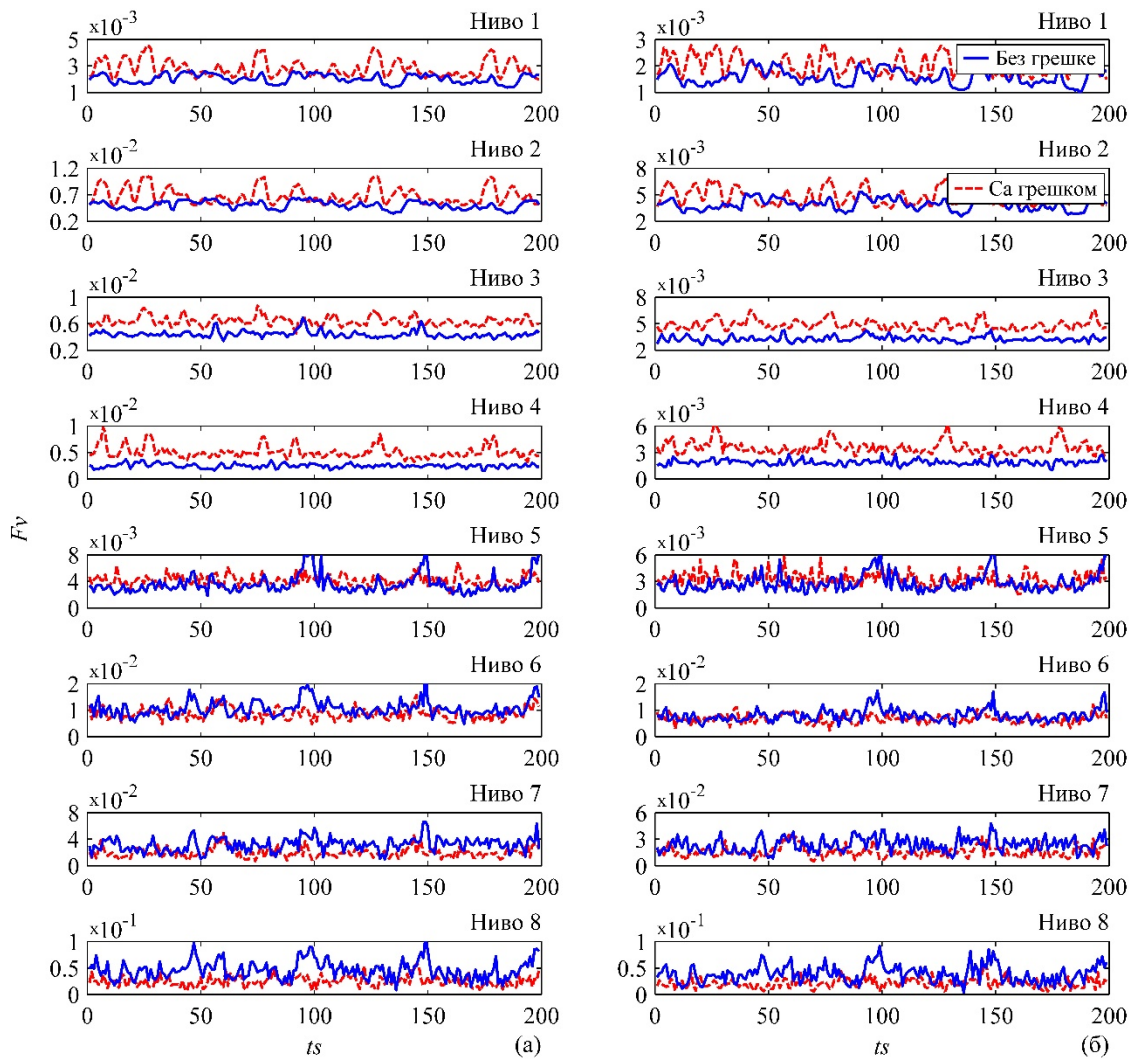
Многи аутори су предложили да се пре примене таласића у издајању обележја сигнал прво подели на мање сегменте и декомпозиција применом таласића примени на сваки сегмент посебно [124, 128]. Оваква процедура издајања обележја је посебно погодна за дуге сигнале, али се генерално може применити на сигнал било које дужине. Из претходног примера се види напредак у јаснијој разлици између аудио сигнала мотора без грешке и мотора са грешком, али та разлика још увек није довољно велика да би се могло доћи до конкретних закључака у вези примене таласића на издајању обележја.

Приликом сегментирања, сваки сигнал се дели на мање сегменте чија је дужина у конкретном случају била 50 ms. Многи аутори користе да се између свака два суседна сегмента уведе преклапање, па је то реализовано и у овом случају. Преклапање између сегмената је износило 50%, то јест 25 ms. У литератури се могу наћи различите

вредности за преклапање између сигнала које може износити и до 75% [124]. Постоје и одређена истраживања у којима аутори не користе преклапање [68, 69]. На сваком добијеном сегменту примењени су таласићи на исти начин као што је то било реализовано над целим сигнаlima. *Daubechies 2* таласић је и у овом случају коришћен, при чему је декомпозиција вршена до нивоа 8. Као и код примене таласића на читаве сигнале, и овде се најпре одреди њихова апсолутна вредност. Из добијених коефицијената детаља у сваком од сегмената, израчуната је њихова средња квадратна вредност и стандардна девијација. При томе, сваки сегмент је дао једну вредност као резултат.

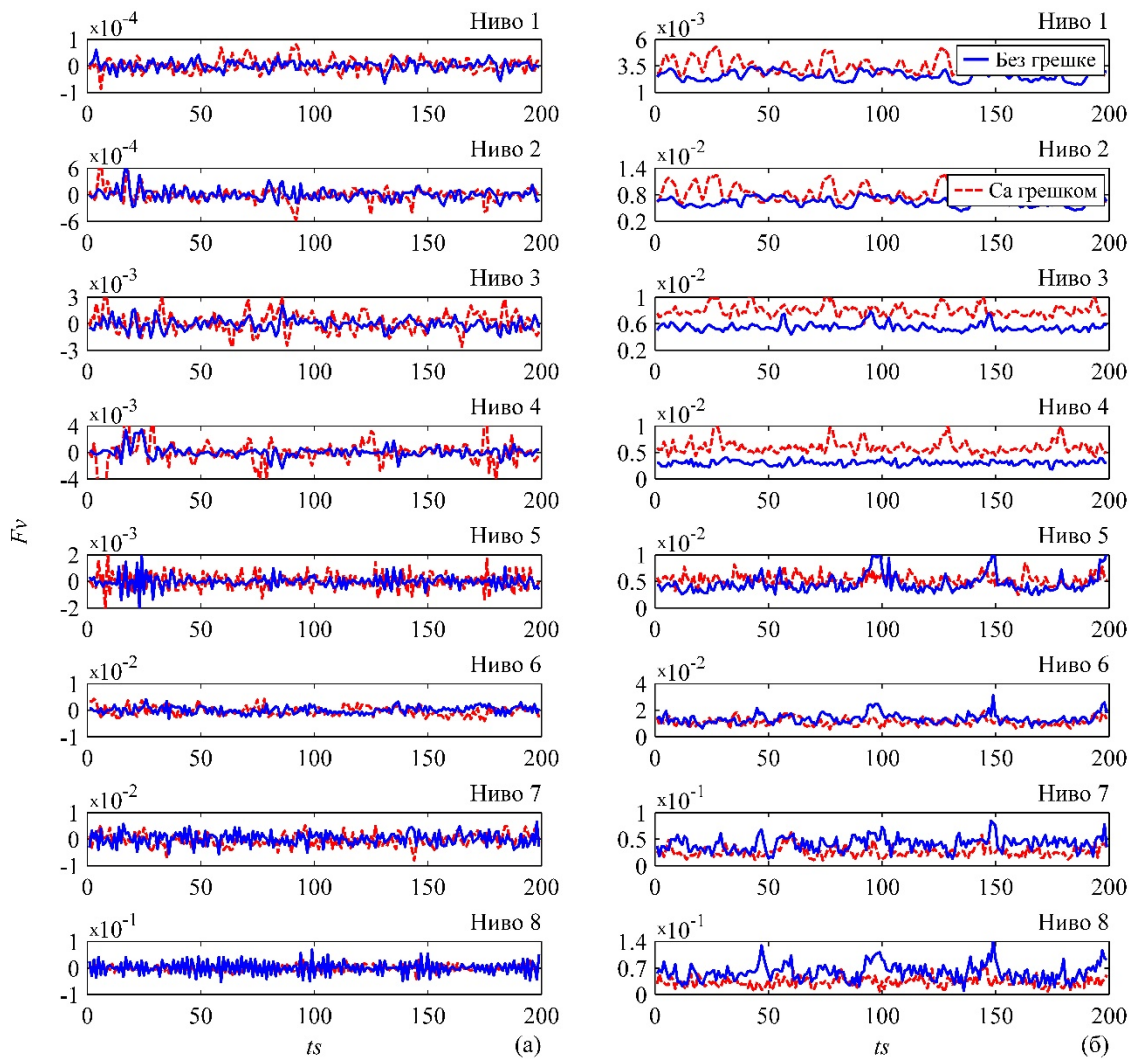
Добијени резултати на одређеном нивоу декомпозиције из сваког од сегмената су укључени у излазни вектор коефицијената детаља који представља параметар сигнала, односно његово обележје. Примера ради, ако су обрађивани сигнали имали 200 сегмената, на нивоу декомпозиције 1 излазни вектор ће имати 200 вредности. На Слици 6.5 приказани су коефицијенти детаља на нивоима декомпозиције од 1 до 8 добијени претходно описаном методом, при чему лева колона под (а) припада резултатима добијеним применом средње квадратне вредности, а десна колона под (б) применом стандардне девијације.

Резултати приказани на Слици 6.5 су показали да се средње квадратна вредност и стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената могу користити за издвајање обележја из сигнала. Нивои декомпозиције 3 и 4 су се и у овом случају издвојили и дали највеће разлике између мотора без грешке и мотора са грешком, што је био случај и са резултатима приказаним на Слици 6.4. Међутим, разлике између мотора у овом случају су очигледније. Такође, разлике између мотора су се у одређеном проценту појавиле и на нивоима декомпозиције 1 и 2, па се чак може рећи и да су нивои 7 и 8 дали разлике до одређене мере. Резултати добијени на овај начин (Слика 6.5) поклапају са резултатима које приказује спектар сигнала (Слика 6.3 (б)) где су највеће разлике у опсегу од 1 kHz до 2 kHz што одговара нивоу декомпозиције 3, и у опсегу од 500 Hz до 1 kHz што одговара нивоу декомпозиције 4. Посматрајући паралелно леву и десну колону са Сlike 6.5, може се закључити да су код резултата средње квадратне вредности уочљивије разлике између мотора са грешком и без грешке него код резултата добијених стандардном девијацијом. Поред тога, примена средње квадратне вредности на коефицијенте детаља из сегмената даје доста стабилније резултате по питању тренда разлика између мотора.



Слика 6.5. Коefицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коefицијената детаља из сегмената

У литератури је презентован и приступ где се обележје базирано на таласићима добија као средње квадратна вредност и стандардна девијација биполарних коefицијената детаља, дакле не примењује се прво апсолутна вредност на коefицијенте детаља. Овде је испитан и овакав приступ. На Слици 6.6 приказани су резултати коefицијената детаља применом средње квадратне вредности и стандардне девијације без примене апсолутне вредности на нивоима декомпозиције од 1 до 8.



Слика 6.6. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација биполарних вредности коефицијената детаља из сегмената

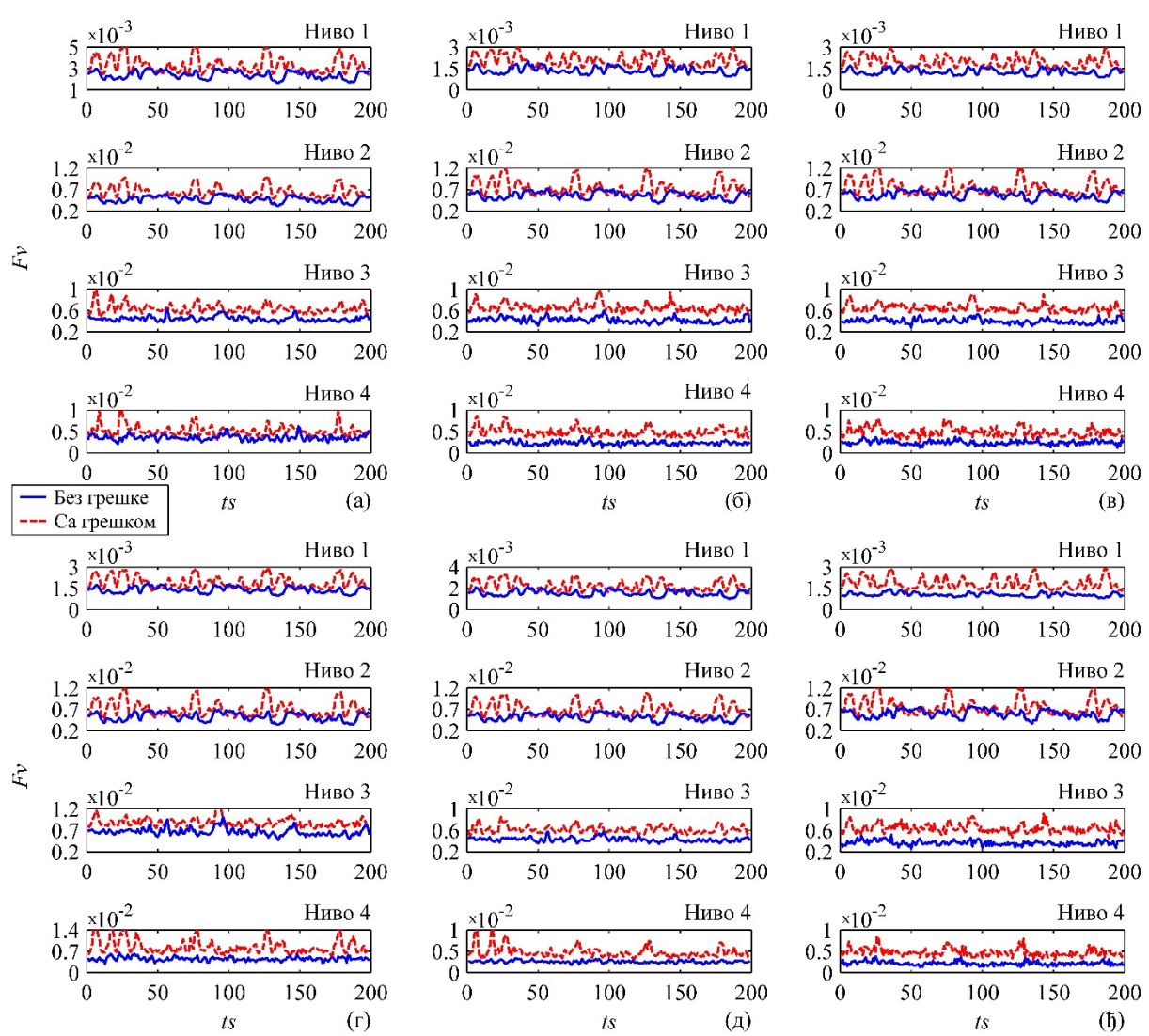
Сигнали који су коришћени за приказ резултата са Сlike 6.5 су такође употребљени и у случају резултата са Сlike 6.6. Као што се са слике може видети, резултати без примене апсолутне вредности (бар када је реч о средње квадратној вредности) су лошији у односу на оне добијене применом апсолутне вредности. Ако се посматра само десна колона, резултати добијени стандардном девијацијом су готово идентични са онима са Сlike 6.5, али се то мора приписати чињеници да у изразу за стандардну девијацију (Слика 6.6 (б)) постоји апсолутна вредност у израчунавању стандардне девијације. Узимајући у обзир све аспекте добијених резултата без апсолутне вредности, овај приступ не даје боље резултате него када се примењује

апсолутна вредност, тако да се овај приступ неће даље анализирати, већ ће бити само приказани резултати који су добијени применом апсолутне вредности на коефицијенте детаља.

6.2.3. Ефекат промене врсте таласића

До сада су илустровани само резултати добијени применом *Daubechies 2* таласића. Имајући у виду да постоје и друге фамилије таласића са којима се може успешно извршити параметризација сигнала, потребно је видети и како промена врсте таласића утиче на добијене резултате. Фамилије таласића које су овде коришћене, поред *Daubechies* фамилије, су: *Haar*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal*, дискретни *Meyer*. Из сваке поменуте фамилије један таласић је употребљен за издвајање обележја по већ описаној процедури за нивое декомпозиције од 1 до 4 (видети Сliku 6.7).

Haar таласић се у много случајева показао као таласић који даје најстабилније резултате, али то не мора нужно да значи да су то уједно и најбољи резултати по питању прављења разлика између мотора без грешке и са грешком. Ово је такође добијено и у истраживању презентованом у претходним поглављима где се вршило отклањање шума из сигнала. У овом случају *Haar* таласић је дао нешто лошије резултате по питању поменутих разлика између мотора у односу на *Daubechies 2*, што се и може видети на Слици 6.7 (а). *Symlets* фамилија таласића је по свом таласном облику као лик у огледалу у односу на *Daubechies* фамилију па је и за очекивати да резултати буду слични. *Coiflets* и дискретни *Meyer* су такође дали поприлично добре резултате. *Biorthogonal 2.2* и *reverse biorthogonal 1.5* који су приказани на Слици 6.7 под (г) и (д) респективно, су имали јако интересантне резултате на нивоу декомпозиције 4, где су разлике између коефицијената мотора без грешке и мотора са грешком мало израженије у односу на друге таласиће. Посебно се истичу јако изражени пикови за мотор са грешком код оба таласића, највише у почетним сегментима нивоа декомпозиције 4.



Слика 6.7. Средње квадратне вредности апсолутних вредности коефицијената детаља након примене (а) *Haar*, (б) *Symlet 8*, (в) *Coiflet 5*, (г) *biorthogonal 2.2*, (д) *reverse biorthogonal 1.5*, (ж) дискретног *Meyer* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 4

6.3. Специфични случајеви издвајања обележја

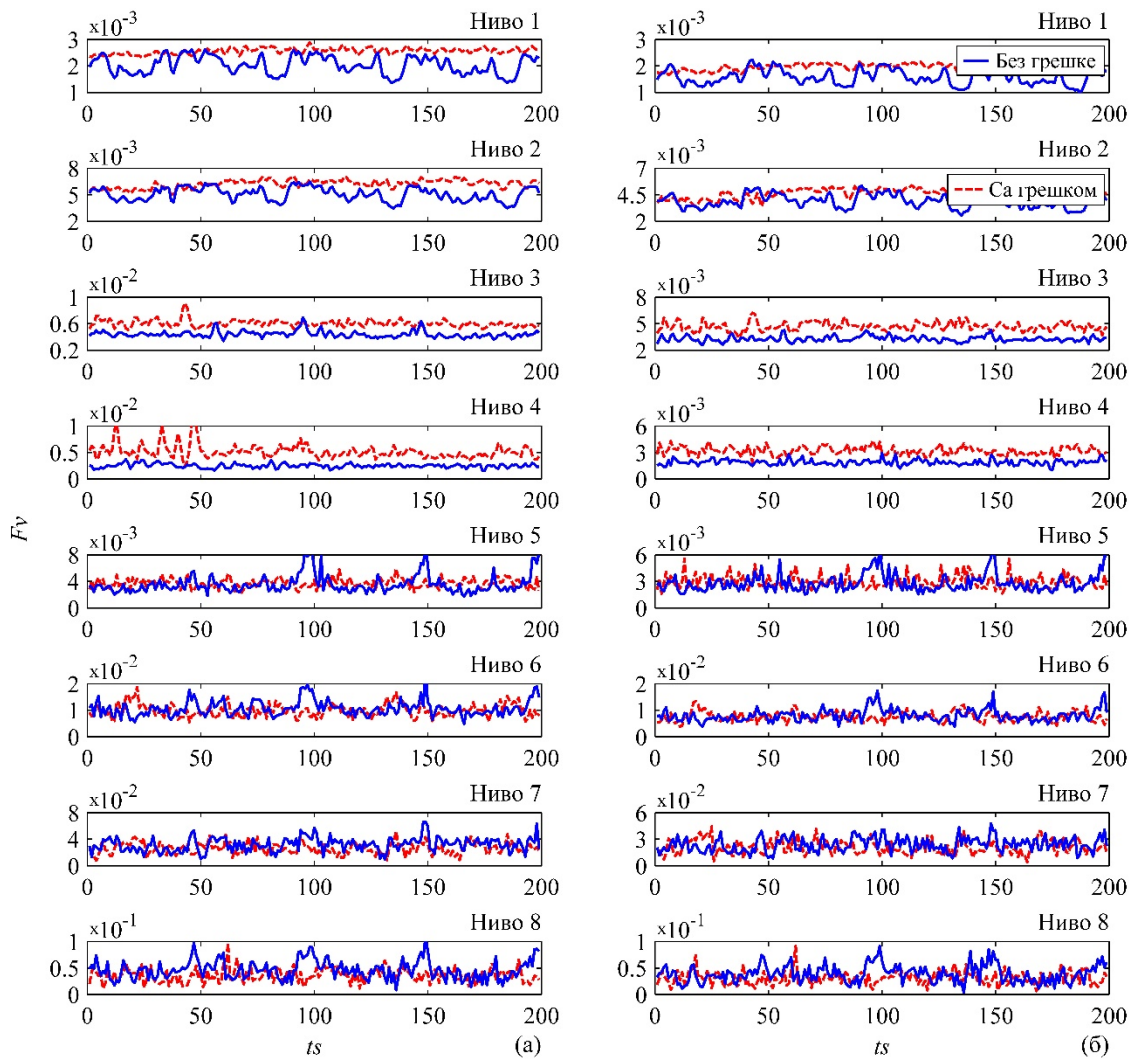
У току истраживања на параметризацији аудио сигнала мотора једносмерне струје дошло се до закључака да постоји неколико специфичних случајева који се јављају упоређујући моторе са грешком и моторе без грешке преко њихових спектра и коефицијената детаља. Неки случајеви се јављају чешће док се неки случајеви врло ретко појављују, али и као такви се морају узети у обзир. У наредном делу приказани су и објашњени сви карактеристични случајеви.

За квантитативно поређење добијених резултата, односно разлика између мотора без грешке и са грешком, коришћена је мера претходно дефинисана као разлика између обележја. Вредности ове мере су дате у наставку.

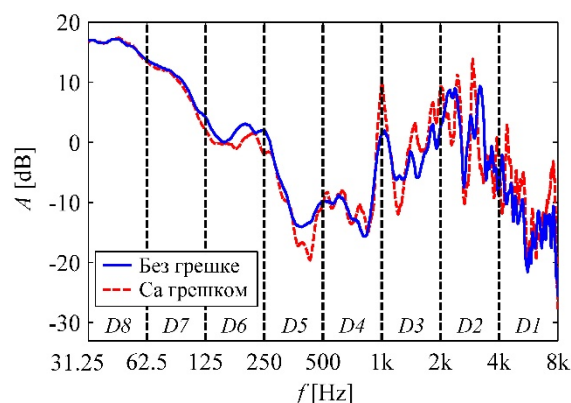
6.3.1. Јасне разлике између мотора снимљених у погону

Најчешћи случај који се појављује осликава јасне разлике између мотора са грешком и мотора без грешке. Оваква јасна разлика између мотора се и очекује узимајући у обзир хипотезу да мотори са грешком имају неки дефект у свом раду који ће довести до тога да се звук који они генеришу разликује од звука који генеришу мотори без грешке. Коефицијенти детаља прате промене у спектру и обратно. За репрезентативни пример сада су узета два потпуно нова сигнала. Слика 6.8. приказује средње квадратну вредност и стандардну девијацију апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената.

На Слици 6.9 приказани су спектри посматраних сигнала. Највеће разлике посматрајући и коефицијенте детаља и спектар сигнала су добијене на нивоима од 1 до 4. Овде као и у свим претходним и наредним случајевима се мора узети у обзир и чињеница да су тестирани мотори потпуно нови, тек скинути са производне траке. У том смислу тешко је очекивати да ће велики број мотора имати неку велику грешку у свом раду, то јест озбиљан дефект. Самим тим, и разлика у звуку између мотора без грешке и оних са грешком неће бити тако велика.

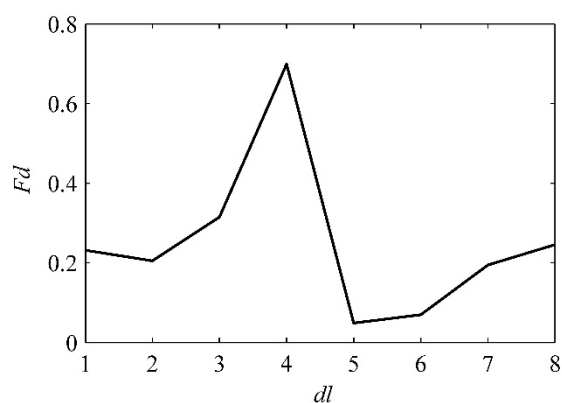


Слика 6.8. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су изражене разлике између мотора



Слика 6.9. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су изражене разлике између мотора

Израчунате разлике између добијених обележја (мера разлике) са Сликe 6.8 су представљене на Слици 6.10 и у Табели 6.2.



Слика 6.10. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције

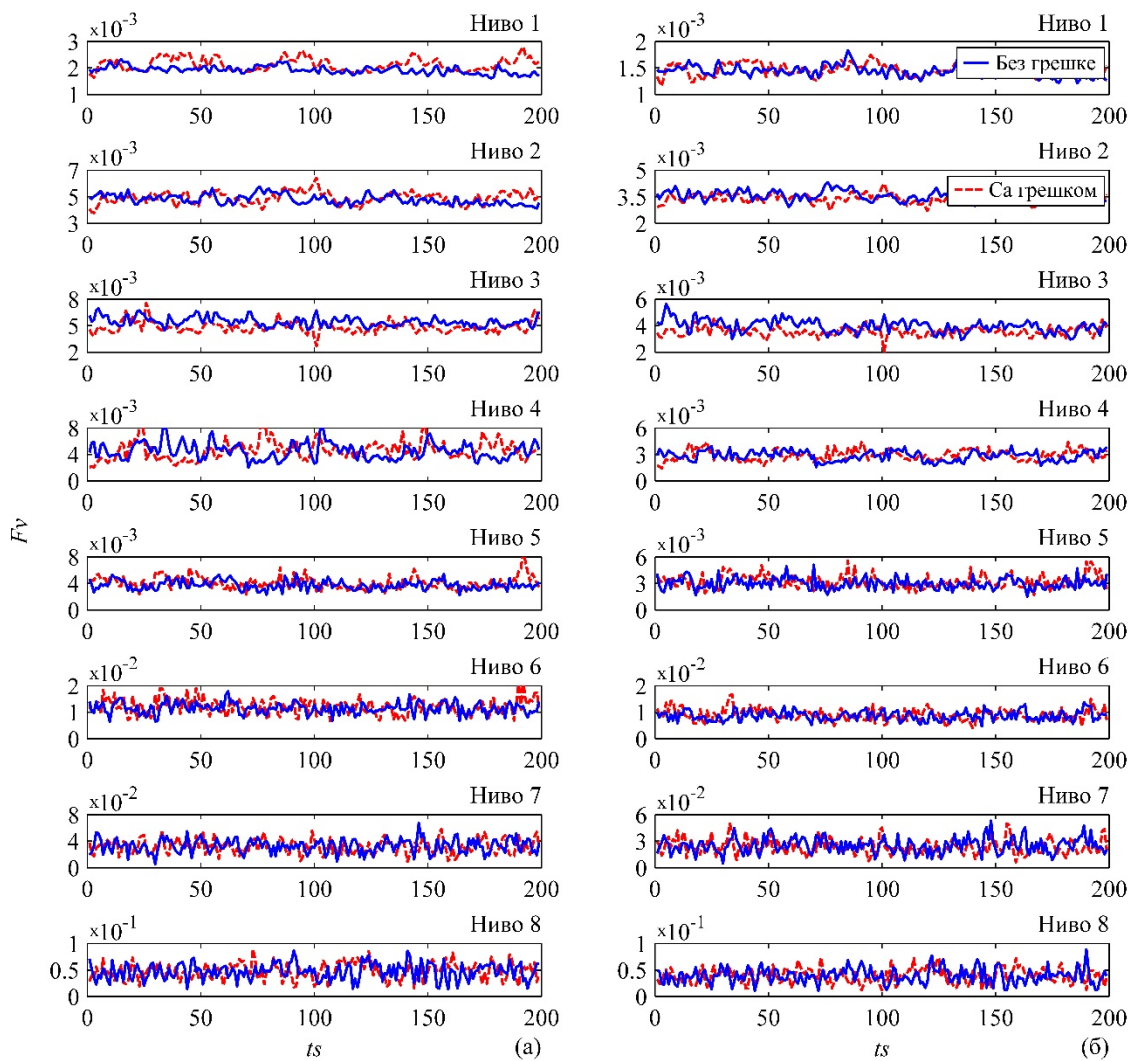
Табела 6.2. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.10

ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.23	0.21	0.32	0.70	0.05	0.07	0.20	0.25

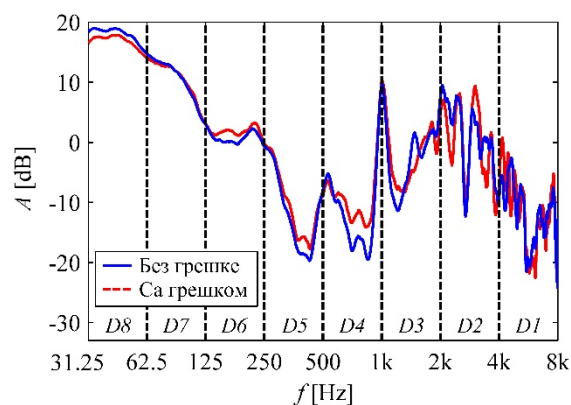
Претходна запажања су нумерички потврђена преко разлика између обележја датих на Слици 6.10 и у Табели 6.2. Дакле, највеће разлике између мотора без грешке и са грешком су се јавиле на нивоу 3 и 4, док су најмање разлике на нивоу 5 и 6.

6.3.2. Минималне разлике између мотора снимљених у погону

Већ је поменуто да одређен број мотора који је тестиран и селектован у категорију мотора са грешком генерише звук који се готово не разликује од звука који генеришу мотори без грешке. Такве моторе је јако тешко разликовати од мотора без грешке. Један такав пример је приказан на Слици 6.11. Спектар такође потврђује опажање да су разлике између мотора минималне, скоро да не постоје, и то је приказано на Слици 6.12.

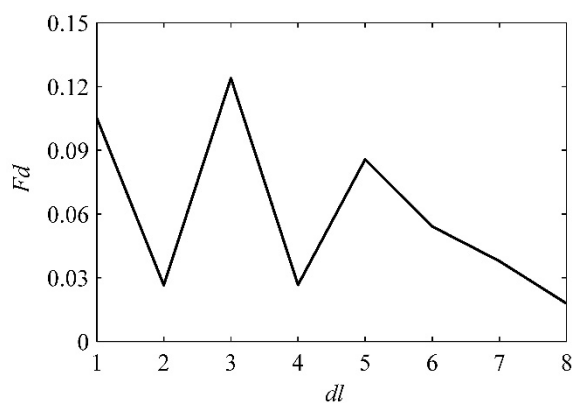


Слика 6.11. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су разлике између мотора минималне



Слика 6.12. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су разлике између мотора минималне

Израчунате разлике између добијених обележја су представљене на Слици 6.13 и у Табели 6.3.



Слика 6.13. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције

Табела 6.3. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.13

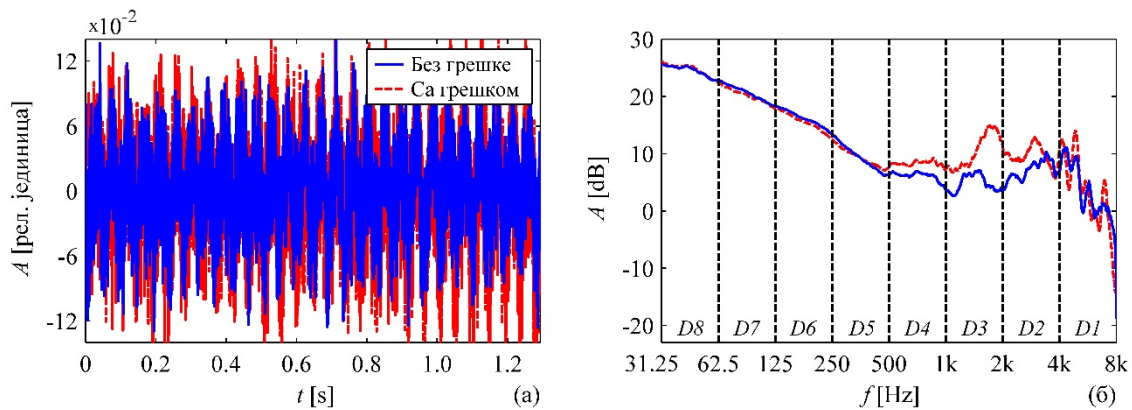
ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.11	0.026	0.12	0.026	0.08	0.05	0.037	0.018

Практично су резултати потврђени кроз два приказа. Мотори у овом случају нису остварили значајне разлике, што се потврђује Сликама 6.13 и Табелом 6.3. Разлике на одређеним нивоима декомпозиције приказаним на Слици 6.13 узрок су јако малих вредности израчунатих разлика (вредности на у-оси), па самим тим ако се негде јаве одређена одступања она су мало више наглашена. У сваком случају, нумеричке вредности у Табели 6.3 су доста мале ако се упореде са вредностима из Табеле 6.2.

6.4. Испитивање сигнала мотора снимљених у лабораторији

У претходним случајевима су анализирани мотори чији је звук снимљен у погону. Треба напоменути да су испитани сви могући случајеви, а илустровани су у дисертацији кроз два конкретна примера: када постоје јасне разлике у коефицијентима детаља таласића и спектру сигнала између мотора без грешке и мотора са грешком и други пример где тих конкретних разлика готово да није било. У наредним редовима биће приказани сви случајеви који се појављују у испитивању обележја аудио сигнала мотора једносмерне струје снимљених у лабораторијским условима.

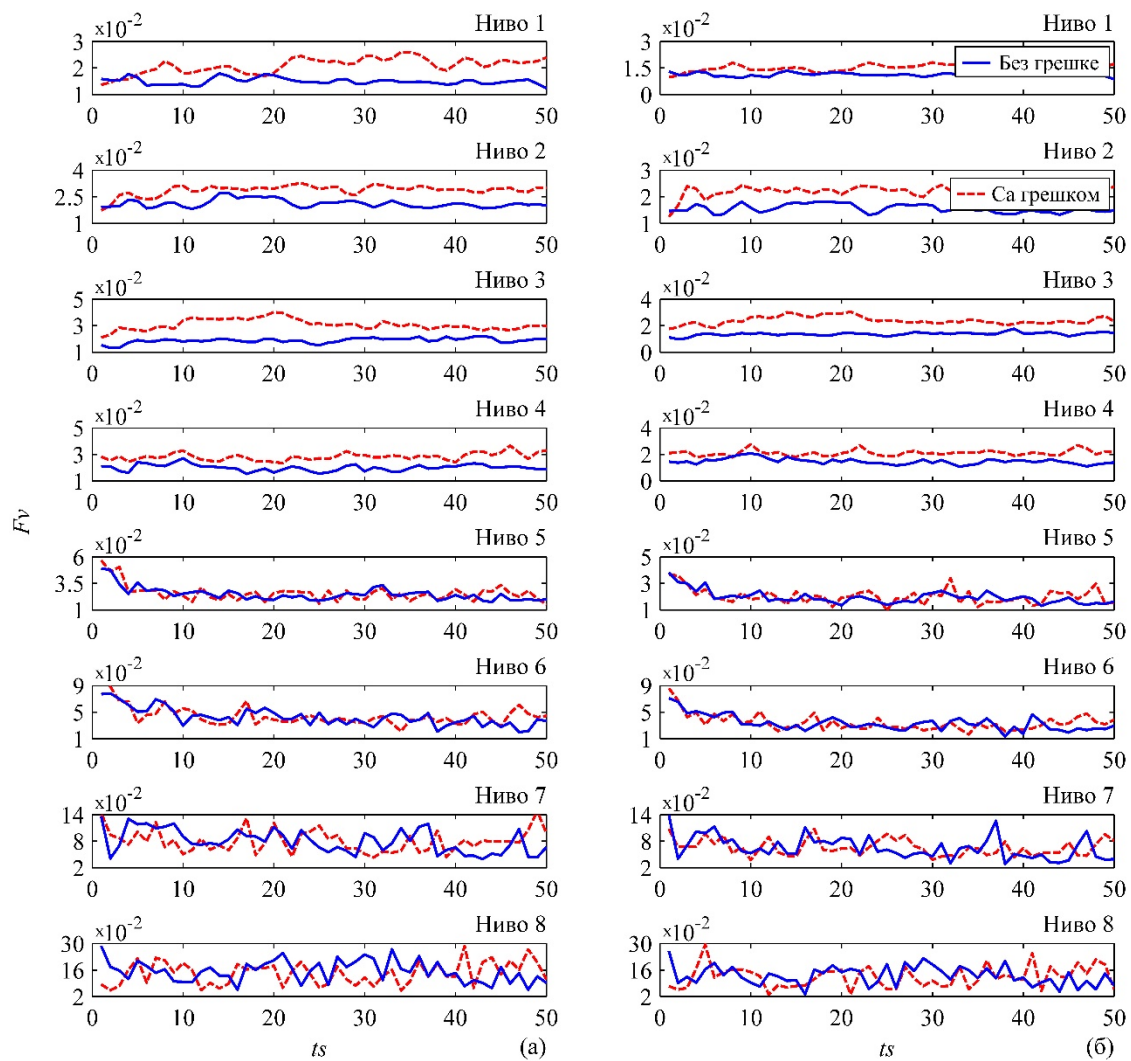
Упоређујући Сликама 6.3 где су били представљени временски и фреквенцијски облик сигнала мотора једносмерне струје са грешком и без грешке из погона и Сликама 6.14 где је то исто урађено само са сигнаlima из лабораторије, може се закључити да су сигнали из лабораторије у временском домену скоро идентични и врло је тешко дефинисати било какву разлику између сигнала. Такав случај је био и код сигнала снимљених у погону, али су одређене флукуације наглашавале минималне разлике на појединим деловима. Ако се посматра фреквенцијски домен, ту постоје одређене разлике у оба случаја, што даје добар основ за даље испитивање применом таласића и издвајањем обележја.



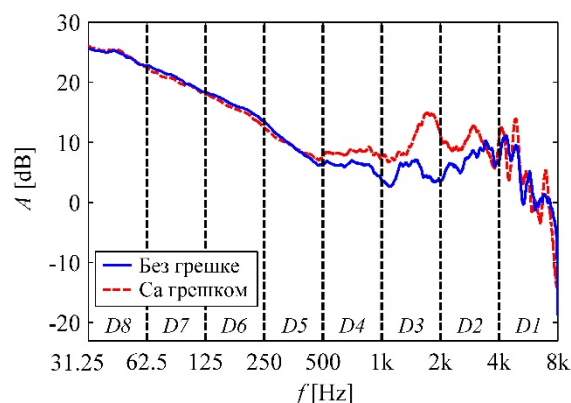
Слика 6.14. Аудио сигнали мотора једносмерне струје снимљени у лабораторији у смеру ротације 1 без грешке (плава крива) и са грешком (црвена крива) у: (а) временском домену, (б) фреквенцијском домену

6.4.1. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији

За овај пример употребљени су сигнали мотора са Сlike 6.14. Исти случај као што је био и код сигнала из погона - промене у коефицијентима детаља прате промене у спектру сигнала. Сигнали који су снимани у лабораторији су краћег трајања од оних у погону, самим тим ако се узме у обзир да је иста величина сегмената коришћена, мањи је број сегмената у оптицају што се може и закључити са Сlike 6.15 где је број тачака за средње квадратну вредност и стандардну девијацију по x -оси мањи у односу на сигнале из погона. Као што се може видети са Сlike 6.15 постоје јасне разлике које се за ове одабране сигнале огледају на нивоима декомпозиције од 1 до 4. Ако се посматрају спектри сигнала приказани на Слици 6.16, разлике су и ту очигледне у фреквенцијским доменима који одговарају нивоима декомпозиције таласића од 1 до нивоа 4.

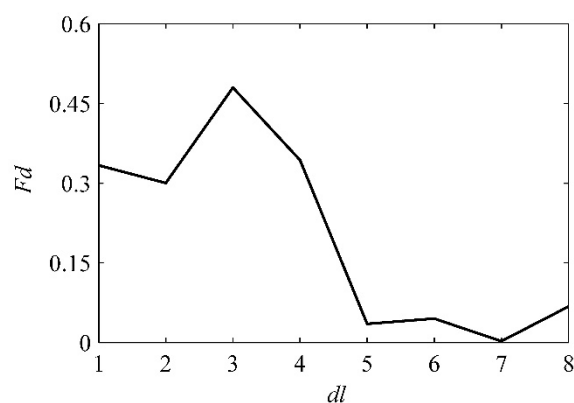


Слика 6.15. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су изражене разлике између мотора снимљених у лабораторији



Слика 6.16. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су изражене разлике између мотора снимљених у лабораторији

Израчунате разлике између обележја (мера разлике) су представљене на Слици 6.17 и Табели 6.4.



Слика 6.17. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције

Табела 6.4. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.17

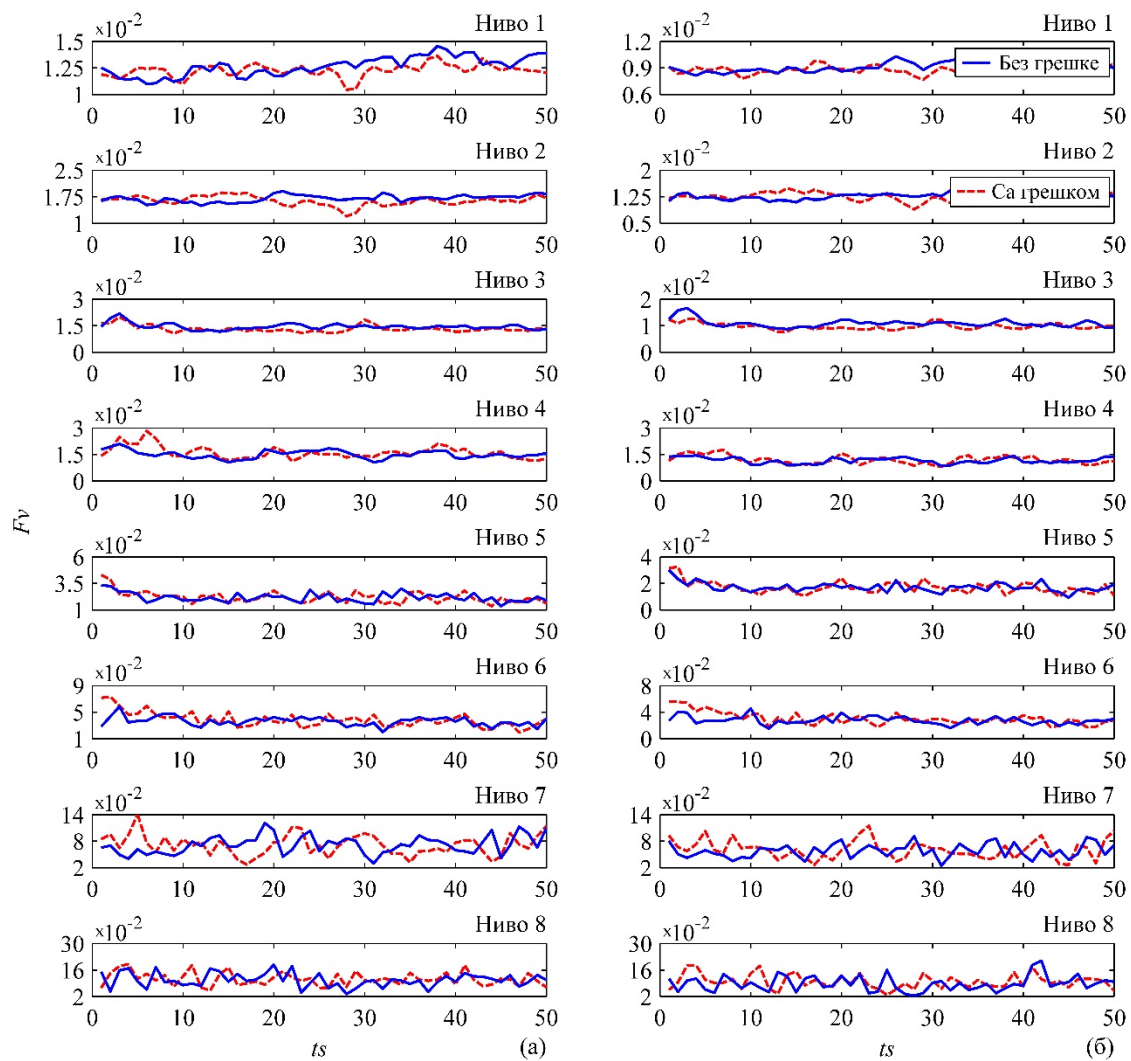
ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.33	0.30	0.48	0.35	0.035	0.045	0.002	0.068

Као што је био случај код сигнала снимљених у погону, и овде се разлике јасно уочавају применом мере разлике између обележја.

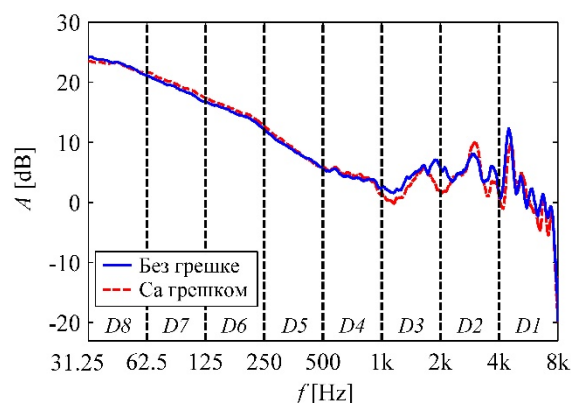
6.4.2. Минималне разлике између мотора снимљених у лабораторији

И овде се анализира мала група сигнала која не даје јасне разлике између аудио сигнала мотора једносмерне струје без грешке и са грешком. Као што је претходно поменуто, дефекти које ови мотори имају су мали тако да су и разлике у звуку које они генеришу у односу на звук мотора без грешке једва приметне или нису ни мало приметне. Такав пример приказан је на Сликама 6.18 и 6.19.

Посматрајући добијене коефицијенте детаља и спектре сигнала очигледно је да је звук мотора са грешком скоро идентичан звуку мотора без грешке. Разлике су врло мале у неким сегментима, али недовољне да би се извукли јасни закључци о разликама између мотора као у претходном примеру. Оваквих случајева има врло мало у сету анализираних мотора.

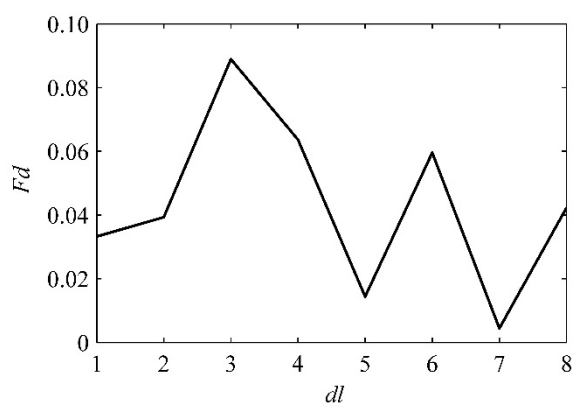


Слика 6.18. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља из сегмената у случају када су разлике између мотора минималне



Слика 6.19. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када су разлике између мотора минималне

Израчунате разлике између обележја (мера разлике) су представљене на Слици 6.20 и Табели 6.5.



Слика 6.20. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора са грешком и мотора без грешке по нивоима декомпозиције када су разлике између мотора минималне

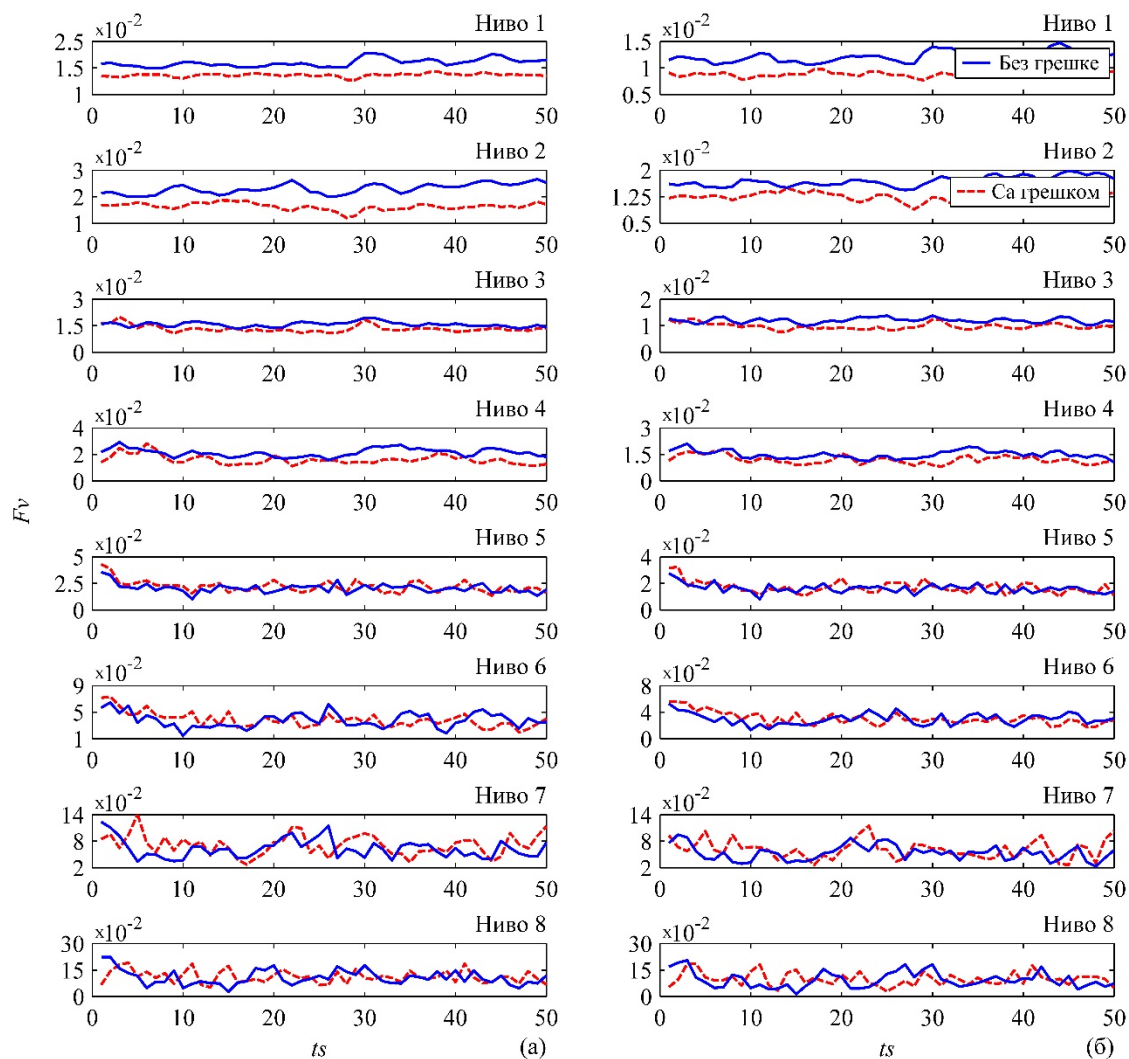
Табела 6.5. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.20

ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.033	0.039	0.089	0.064	0.014	0.060	0.004	0.042

Добијене вредности мера разлике између обележја и даље прати тренд који приказују коефицијенти детаља за специфичан случај мотора. Нумеричке вредности као и графички приказ показују у овом случају минималне разлике између мотора.

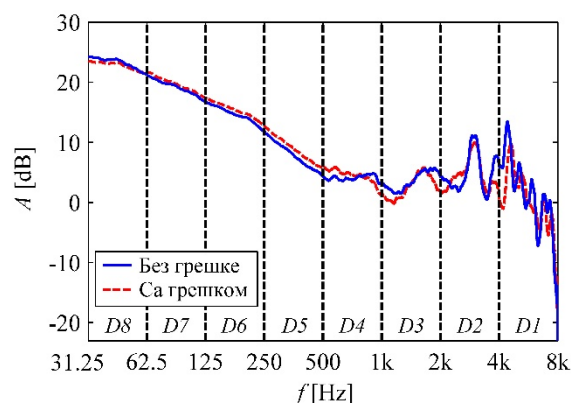
6.4.3. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији у коефицијентима детаља али са минималним разликама у спектру

Овде се анализирају сигнали мотора који показују јасне разлике у коефицијентима детаља, али не и у спектру сигнала. Оваквих мотора има значајно мање од мотора где су јасне разлике и у коефицијентима детаља и у спектрима посматраних сигнала. Ово је управо пример који показује праву корист сагледавања аудио сигнала са другог аспекта, односно примене таласића за издвајање обележја. Са Слике 6.21 се виде јасне разлике на одређеним нивоима (најизраженије на нивоу 1 и 2).



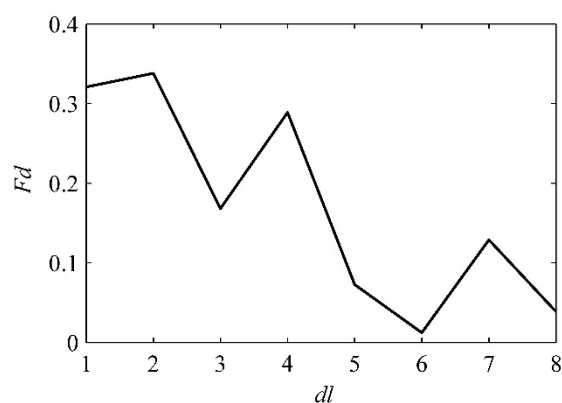
Слика 6.21. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 1 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља у случају када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља

На Слици 6.22 је приказан спектар анализираних сигнала. У спектру на деловима где би требало да буду јасне разлике у складу са резултатима који су добијени применом таласића, тих разлика нема, или бар нису толико изражене. Употреба таласића у примеру попут овога добија још већи значај јер омогућава издвајање разлика између мотора као последица разлика између класичне примене Фуријеове трансформације и таласића.



Слика 6.22. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 1 у случају када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља

Израчунате разлике између обележја (мера разлике) су представљене на Слици 6.23 и у Табели 6.6.



Слика 6.23. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције када постоје разлике између мотора у коефицијентима детаља

Табела 6.6. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.23

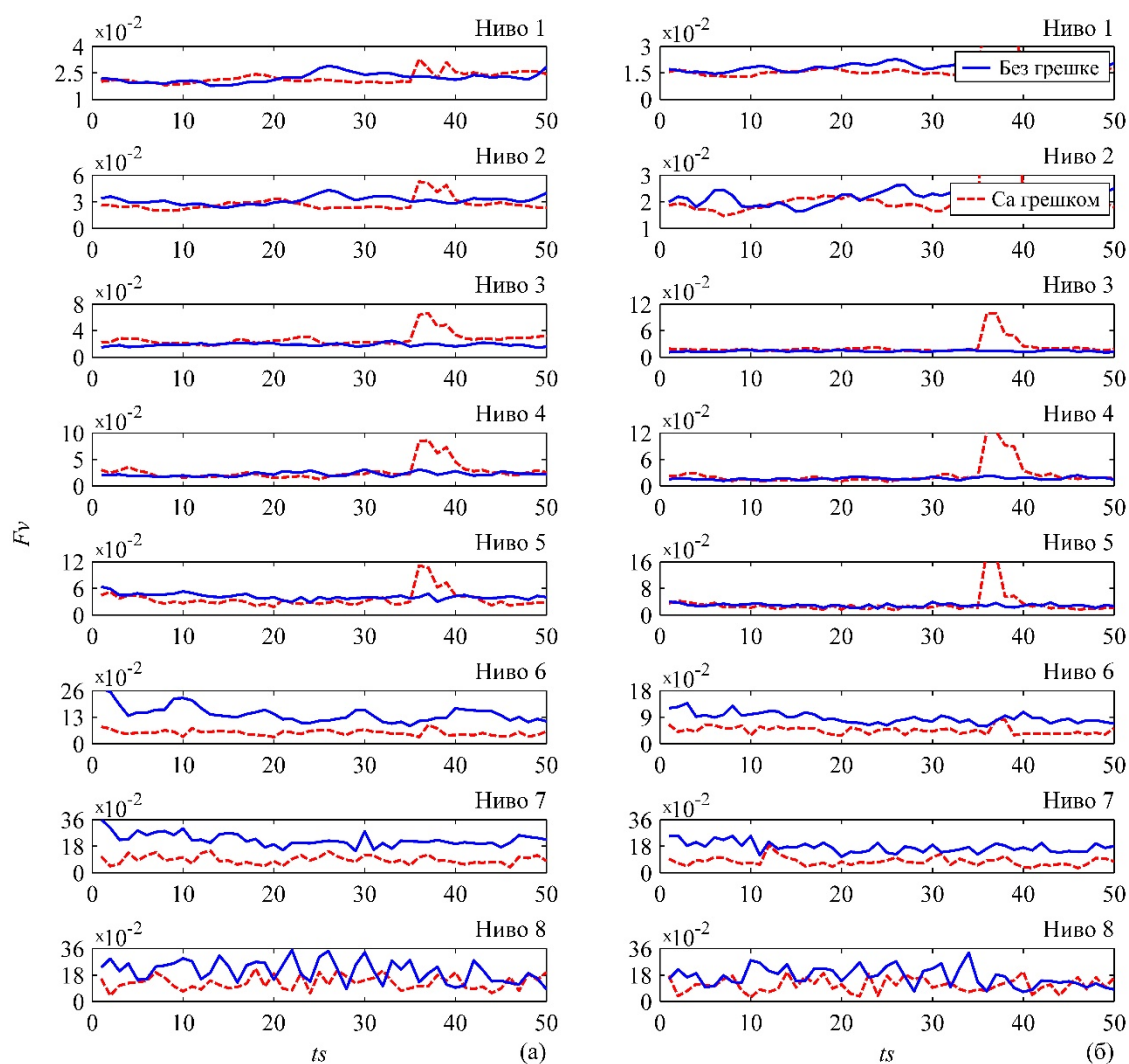
ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.32	0.34	0.17	0.29	0.073	0.012	0.13	0.039

Као што је напоменуто коефицијенти детаља су дали јасне разлике, док спектар није. Израчунате разлике између обележја приказане на Слици 6.23 и у Табели 6.6 потврђују чињеницу да разлике између мотора постоје без обзира на спектре истих.

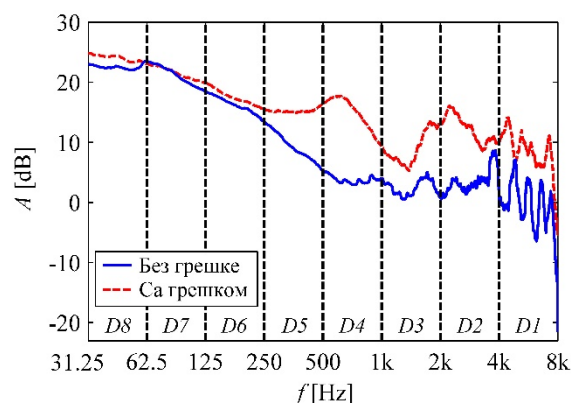
6.4.4. Јасне разлике између мотора снимљених у лабораторији на различитим деловима посматрајући коефицијенте детаља и спектре сигнала

Редак и специфичан случај описан је у наредним редовима. Посматрајући коефицијенте детаља и спектре сигнала (Слика 6.24 и Слика 6.25, респективно), долази се до закључка да ове две анализе не дају исте резултате. На прва 4 нивоа декомпозиције се само у одређеним деловима јављају флукуације у виду пикова коефицијената детаља код мотора са грешком и то претежно негде око вредности 40 на х-оси. Тек се на нивоима од 6 до 8 уочавају јасније разлике у коефицијентима детаља које се као у претходно анализираним примерима могу сматрати валидним.

У спектру сигнала је ситуација другачија. Посматрајући Сliku 6.25 јасне разлике се уочавају у фреквенцијским опсезима који одговарају нивоима декомпозиције од 1 до 5, а у опсезима који одговарају нивоима од 6 до 8 разлике готово да нема. Упоредјујући ове резултате са оним добијеним на основу коефицијената детаља, види се да резултати нису исти, напротив да се разлике јављају у различитим деловима спектра. Овакав случај је врло редак али је врло занимљив за анализу и даље испитивање које води до одређених закључака зашто се уопште појављују овакви резултати. Како би се отклониле недоумице, анализа за овај конкретни случај се шири у наредној секцији где се поред примене таласића користи и филтрирање сигнала пропусником опсега и врши се праћење одређених делова сигнала преко средње квадратне грешке.

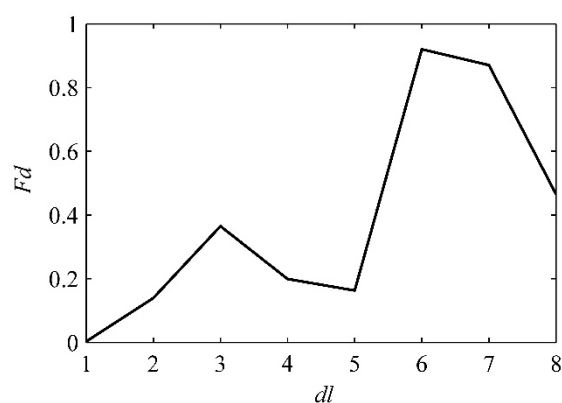


Слика 6.24. Коефицијенти детаља након примене *Daubechies 2* таласића на сегментиран сигнал за мотор без грешке (плаве криве) и мотор са грешком (црвене криве) у смеру ротације 2 и нивоа декомпозиције од 1 до 8: (а) средње квадратна вредност и (б) стандардна девијација апсолутних вредности коефицијената детаља у случају када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља



Слика 6.25. Спектар целих сигнала мотора без грешке (плава крива) и мотора са грешком (црвена крива) у смеру ротације 2 у случају када постоје разлике између мотора

Израчунате разлике између обележја су представљене на Слици 6.26 и у Табели 6.7.



Слика 6.26. Разлике између обележја базираних на таласићима мотора без грешке и мотора са грешком по нивоима декомпозиције када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља

Табела 6.7. Нумеричке вредности разлика између обележја базираних на таласићима приказаних на Слици 6.26

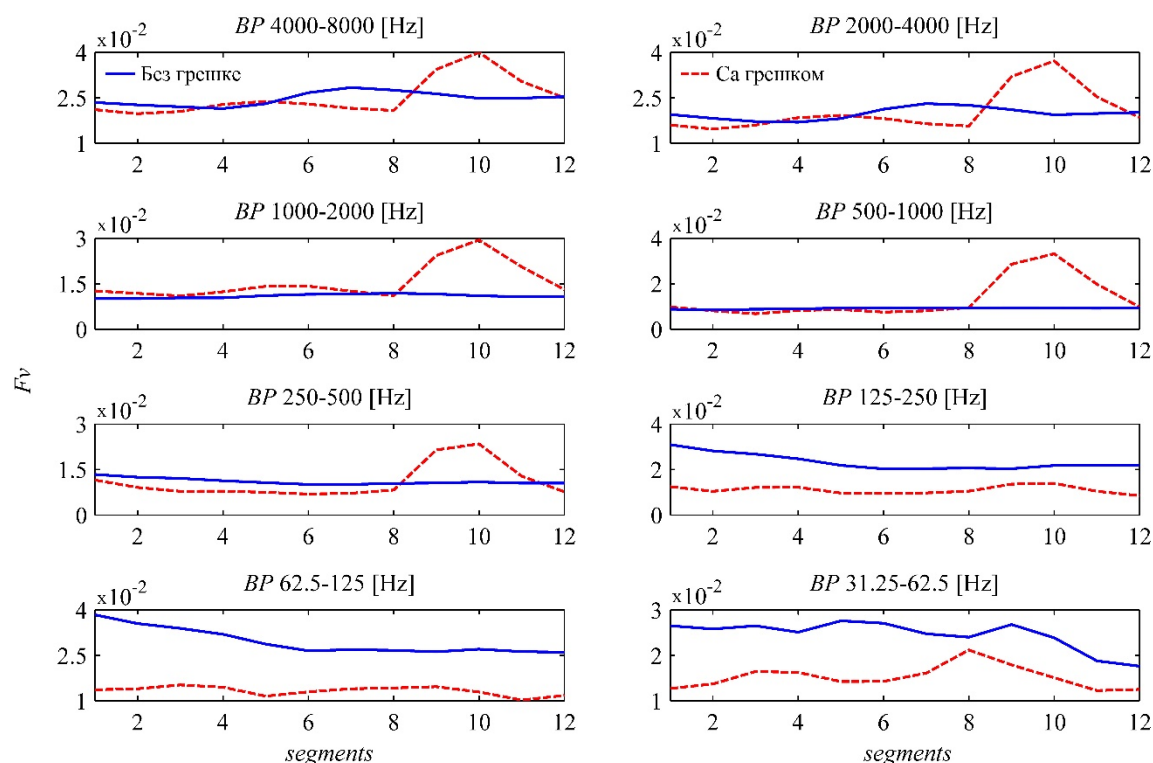
ниво декомпозиције	1	2	3	4	5	6	7	8
разлике између обележја	0.0035	0.14	0.38	0.20	0.16	0.92	0.87	0.47

Конкретне разлике приказане на Слици 6.26 и у Табели 6.7 су се јавиле на нивоима 6, 7 и 8 што се поклапа са резултатима датим на Слици 6.24 где су приказани коефицијенти детаља за овај специфичан случај.

6.4.4.1. Примена филтра пропусника опсега

Како би се детаљније анализирао претходни случај сигнала мотора примењени су филтри пропусници опсега над сигнаlima. Филтри су примењени са циљем да се умањи утицај шума и амбијенталне буке присутне приликом снимања сигнала, а који могу изазвати разлике у спектрима тамо где тих разлика нема у коефицијентима детаља. Поред додатних филтара, примењено је и одређивање средње квадратне вредности сегмената филтрираних сигнала.

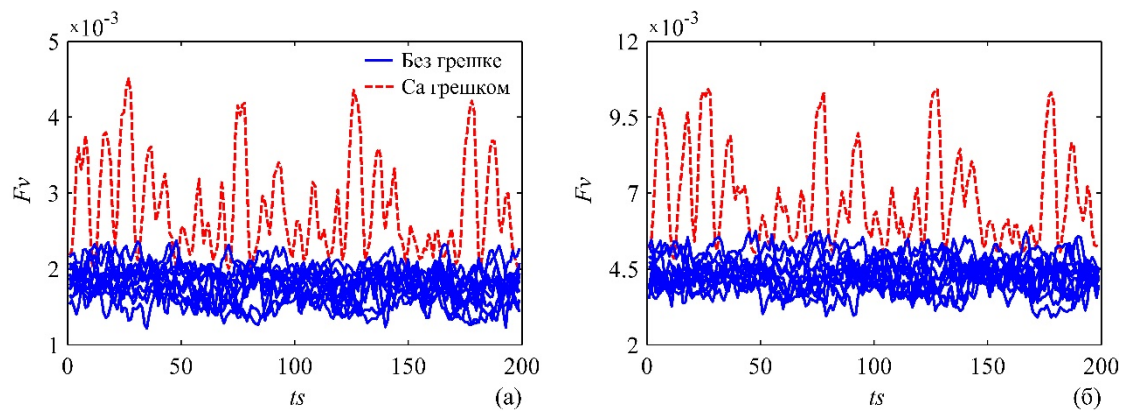
Поступак је следећи. Цео сигнал се дели на веће сегменте (укупно 12 сегмената) са преклапањем од 50%. Креирано је 8 филтара пропусника опсега чији су опсези пропуштања: 31.25-62.5 Hz, 62.5-125 Hz, 125-250 Hz, 250-500 Hz, 500-1000 Hz, 1000-2000 Hz, 2000-4000 Hz, 4000-8000 Hz. Сваки сегмент из временског домена је пропуштен кроз свих 8 филтара, укупно 12 сегмената (фрејмова) у овом случају кроз 8 филтара. Затим је израчуната средње квадратна вредност за сваки од ових филтрираних сегмената, и на тај начин се добија 1 вредност (тачка криве) из једног сегмента филтрираног једним филтром, укупно 12 вредности за 12 сегмената филтрираних једним филтром. Тако добијени резултати графички су приказани на Слици 6.27. Оно што се одмах закључује из добијених резултата је да приказ средње квадратних вредности одговара добијеним резултатима применом таласића који су приказани на Слици 6.27. Ови резултати указују да постоје случајеви који су ретки, али могу изазвати одређене недоумице по питању доношења закључака, ако се не изврше додатне анализе попут анализе овде приказане.



Слика 6.27. Средње квадратна вредност сегмената сигнала филтрираних пропусницима опсега када су разлике између мотора само на одређеним деловима коефицијената детаља

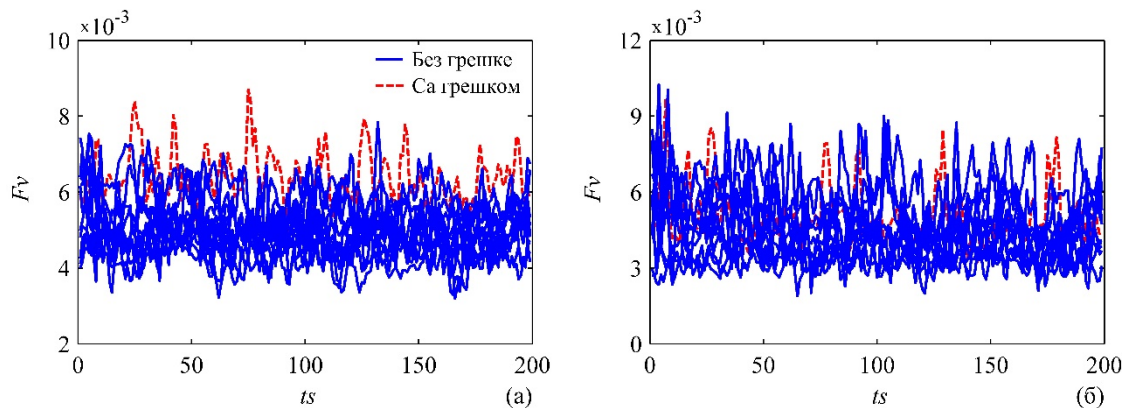
6.5. Варијације између мотора са грешком и мотора без грешке

Како би се показало у којој мери се добијене карактеристике мотора са грешком разликују у односу на карактеристике мотора без грешке, направљена је још једна додатна анализа где је узето у обзир више мотора истовремено. Наиме, на Слици 6.28 приказана су два случаја где су одабрани коефицијенти детаља на нивоима 1 (Слика 6.28 (а)) и на нивоима 2 (Слика 6.28 (б)). Узет је само један мотор са грешком и 11 мотора без грешке. Са Слике 6.28 јасно се види да у оба случаја постоји јасна разлика између коефицијената детаља мотора са грешком и коефицијената детаља свих 11 мотора без грешке. Све вредности приказаних коефицијената детаља су добијене раније описаном методом где се узимала средња вредност апсолутних вредности коефицијената детаља.



Слика 6.28. Варијације између коефицијената детаља мотора са грешком (црвена крива) и 11 мотора без грешке (плаве криве) на нивоу декомпозиције: (а) 1, (б) 2

У досадашњим приказима се видело да код неких мотора нема јасних разлика на одређеним нивоима декомпозиције. За даље разјашњење ових случајева, искоришћена је иста метода са Сlike 6.28, па су на Слици 6.29 приказани коефицијенти детаља на нивоима декомпозиције 3 и 4, који осликавају минималне варијације између мотора са грешком и 11 мотора без грешке. Чак те варијације за поједине моторе скоро и да не постоје.



Слика 6.29. Варијације између коефицијената детаља мотора са грешком (црвена крива) и 11 мотора без грешке (плаве криве) на нивоу декомпозиције: (а) 3, (б) 4

Као што се са Сlike 6.29 и види, коефицијенти детаља 11 мотора без грешке скоро да се поклапају са коефицијентима детаља мотора са грешком. Ова поклапања су нешто израженија на нивоу декомпозиције 4.

6.6. Дискусија резултата

Издавање обележја из аудио сигнала који садрже звук генерисан приликом рада мотора једносмерне струје применом таласића је дало резултате који се даље могу користити у класификацији неком од метода вештачке интелигенције. На овај начин је добијена још једна научна област за примену таласића, поред примене у отклањању шума и одређивању места колена код импулсних одзива просторије. Издавање аудио обележја базираних на таласићима се може реализовати као аутоматизована метода у програмском пакету *Matlab* где се захтева само дефинисање фамилије таласића и нивоа декомпозиције, чиме је доста олакшан посао када је реч о параметрима таласића. Декомпозиција таласића на коефицијенте детаља и апроксимације је и даље кључан поступак када се говори о издавању аудио обележја базираних на таласићама.

Добијени резултати су показали да коефицијенти детаља као обележја базирана на таласићима не само да дају конкретне разлике између мотора једносмерне струје без грешке и са грешком, већ и разне варијације у резултатима. Те варијације се односе на случајеве када је мотор са грешком погрешно сврстан у ту категорију (у његовом раду нема изразитих грешака), када поједине сметње или амбијентална бука утичу на сигнале, када нема изражених разлика у спектрима сигнала итд.

Дефинисана је и мера за нумеричку квантификацију разлика обележја базираних на таласићима између мотора на одређеним нивоима декомпозиције.

7. ЗАКЉУЧАК

Употреба таласића данас је све више заступљена у разним научним областима, поготово ако је реч о обради сигнала, као што су акустички или аудио сигнали, на пример говор. Предности таласића у односу на друге алгоритме обраде сигнала омогућиле су њихове вишеструке примене. Процес отклањања шума из сигнала је озбиљан истраживачки задатак и предмет је великог броја истраживања. Значајну улогу у том процесу, поред стандардних метода за отклањање шума из сигнала, имају управо и таласићи. Они су се показали као моћан математички апарат који може са великим успехом умањити утицај шума у различитим врстама сигнала, а да се при том корисне информације сигнала не изгубе, то јест да не дође до велике деградације сигнала.

Поред примене у отклањању шума из сигнала, таласићи се могу користити и у другим апликацијама. Једна од таквих представља издвајање обележја из сигнала и припрему за даљу класификацију или детекцију аудио догађаја користећи алгоритме вештачке интелигенције. Ова примена таласића уско је повезана са особином декомпозиције сигнала таласићима на коефицијенте детаља и апроксимације. У литератури је приказан одређени број примена таласића у овој области.

У овој дисертацији је коришћена једна врста специјалних акустичких сигнала - импулсни одзиви просторије. Ови сигнали увек садрже шум који негативно утиче на даљу обраду одзива. У литератури су презентоване различите методе за смањење утицаја шума, али свака од тих метода носи одређене недостатке. Имајући у виду могућности таласића генерално у отклањању шума из сигнала, циљ је био испитати потенцијале таласића за смањење утицаја шума из импулсних одзива просторије.

У том контексту, таласићи су примењени на синтетизоване и мерене импулсне одзиве просторије, прво код широкопојасних сигнала, а након тога код сигнала који су били пропуштени кроз филтре у опсегу октава и терци. Главни задатак је био пронаћи оптималан скуп параметара таласића који ће у што већој мери отклонити шум, било да се ради о широкопојасним или ускопојасним сигнаlima. Бели и розе шум нивоа -40 dB, -50 dB, -60 dB и -70 dB је коришћен за ову анализу. Како би се омогућила квантификација добијених резултата, уведене су две мере: повећање динамичког опсега

кривих опадања и смањење прага шума импулсног одзива просторије. Криве опадања су добијене из импулсних одзива просторије применом *Schroeder*-ове интеграције.

Истраживање је започето са иницијалним скупом параметара таласића које је дало одређене квалитативне помаке, али не и задовољавајуће резултате у процесу отклањања шума. Поменути скуп параметара подразумевао је: *sqtwolog* правило избора прага, фино постављање прага (*Soft thresholding*) и *mln* ре-скалирање. У циљу оптимизације смањења негативних ефеката шума код импулсних одзива просторије, било је потребно детаљно истражити све комбинације параметара таласића, и при том водити рачуна и о врсти импулсних одзива просторије као и о врсти шума. Оптимални скуп параметара таласића, који је дао најбоље резултате са аспекта повећања динамичког опсега кривих опадања и смањења прага шума одзива, обухватао је: *minimaxi* правило избора прага, грубо постављање прага (*hard thresholding*) и *mln* ре-скалирање. Дефинисање нивоа декомпозиције таласића је такође важан део процедуре приликом утврђивања оптималног скупа параметара. У случају широкопојасних импулсних одзива, ниво декомпозиције је најчешће био 3, а у ретким ситуацијама 2 или 4 када је одзив садржао бели шум, док је у случају постојања розе шума у одзивима ниво декомпозиције најчешће био 14 или 15, а у ретким случајевима 12 или 13. Поред претходно поменутих параметара таласића, и промена фамилије таласића може имати значајну улогу у процесу отклањања шума. У старту се, уз иницијалан скуп параметара, кренуло са *Haar* таласићем, а касније су испитане и друге фамилије таласића: *Daubechies*, *Coiflets*, *Symlets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* и дискретни *Meyer*. *Haar* таласић је показао највећу стабилност остварених резултата, али су поједини таласићи, као на пример таласићи из фамилије *Daubechies*, остварили веће повећање динамичког опсега у знатном броју ситуација. Сагледавајући генерално целокупну слику за широкопојасне импулсне одзиве просторије, повећање динамичког опсега је достигло вредности чак и до око 20 dB, било за бели или розе шум са оптималним скупом параметара таласића.

Када је реч о синтетизованим импулсним одзивима просторије у опсегу октава и терци, поменути оптимални скуп параметара је дао највеће повећање динамичког опсега кривих опадања и смањење прага шума импулсних одзива, али се посебан акценат морао ставити на ниво декомпозиције који је директно зависио од октавног и терцног филтра, то јест централне фреквенције ових филтара. У анализи која је детаљно објашњена у овој дисертацији, ниво декомпозиције се кретао у највећем броју

случајева од 8 па све до 2, за централне фреквенције октавних и терцних филтара од 100 Hz до 5 kHz, респективно. У неким ретким случајевима ниво декомпозиције варира за ± 1 што зависи најчешће од врсте импулсног одзива просторије и шума. У ускопојасним импулсним одзивима, повећање динамичког опсега је достигало вредности преко 15 dB.

Код мерених импулсних одзива просторије ситуација је врло слична оној код синтетизованих одзива када је реч о параметрима таласића, врсти таласића и нивоу декомпозиције, без обзира да ли је реч о широкопојасним или ускопојасним импулсним одзивима просторије. Ово значи да је утицај таласића у процесу отклањања шума исти без обзира на извор и начин настанка импулсног одзива. Оно што још треба истаћи када су мерени импулсни одзиви у фокусу је то да је било теже одредити повећање динамичког опсега у поређењу са синтетизованим, јер је теже било дефинисати референтну криву опадања, па се за ту намену користио измерени импулсни одзив са највећим динамичким опсегом добијен применом најдуже побудног сигнала.

Један важан параметар који се појављује у обради импулсних одзива просторије је место пресека (реверберационе) стрмине криве опадања и прага шума (нивоа шума), које се у литератури назива колена. Место колена је такође једна од тема од значаја у истраживању којим се ова дисертација бави у контексту примене таласића. У испитивању употребе таласића при отклањању шума дошло се до закључка да би се и таласићи могли употребити као нова метода за одређивање места колена. Оно што треба истаћи је да оптимални скуп параметара и овде даје најбоље резултате, али се ниво декомпозиције мења у зависности од одабране централне фреквенције октавног или терцног опсега или врсте употребљеног импулсног одзива просторије. Постоји неколико специфичних случајева који се појављују и детаљно су описани у дисертацији, али је најчешћи случај онај када се колена налази на месту стрмог пада криве опадања добијене после примене таласића. У овом случају, колена је на месту или у непосредној близини колена које је одређено применом методе из литературе (применом нелинеарног модела опадања звучне енергије). Тиме је потврђена још једна могућа примена таласића за обраду импулсних одзива просторија.

Једна од актуелних тема последњих година подразумева издвајање обележја из аудио сигнала и каснију класификацију коришћењем вештачке интелигенције (машинског, односно дубоког учења). Циљ овакве обраде је пронаћи обрасце (енгл.

Patterns) понашања одређених категорија сигнала. Таласићи су и овде нашли примену, где су аудио обележја издвојена из сигнала који су садржали звук мотора једносмерне струје снимани у фабричким и лабораторијским условима. У процесу производње одређених производа попут мотора једносмерне струје, отворено је питање на који начин детектовати грешку у производу (у конструкцији производа) која се одражава на рад мотора. Један од приступа за решење овог проблема је користити звук који мотори генеришу при свом раду. Како би се издвојили мотори који немају грешку од оних који имају грешку, коришћени су таласићи где је над сваким аудио сигналом извршена декомпозиција таласићима до нивоа 8. Коефицијенти детаља на сваком нивоу су представљали аудио обележја која су упоређивана ради проналажења разлике између мотора без грешке и мотора са грешком. Генерални је закључак да разлике у звуку мотора узроковане грешком мотора доводе до разлика у аудио обележјима базираним на таласићима. Ове разлике су често корелисане са разликама у спектрима сигнала, и то са разликама у одређеним деловима спектра који су у директној вези са коефицијентима детаља добијеним на одређеним нивоима декомпозиције. Декомпозиција таласићима у неким случајевима омогућава да разлике између мотора са грешком и без грешке постану видљиве и када то није случај са спектрима сигнала. Уведена мера разлике између коефицијената детаља директно поткрепљује и квантификује добијене резултате.

Посматрано са генералног аспекта, у овом раду приказане су вишеструке примене таласића у обради акустичких и аудио сигнала, чији су најзначајнији доприноси следећи:

- примена таласића у отклањању шума из импулсних одзива просторије омогућава значајно повећања динамичког опсега кривих опада, односно смањења шума одзива које је упоредиво са резултатима добијеним стандардним методама из литературе;
- таласићи доводе до сличних резултата и код синтетизованих и код мерених импулсних одзива;
- таласићи се до сада нису примењивали у обради импулсних одзива просторије;
- таласићи се са успехом могу користити за одређивања места колена код кривих опадања звука у просторији;

- својство таласића да врши декомпозицију сигнала на коефицијенте детаља и апроксимације дала је могућност њихове примене на издвајање обележја из аудио сигнала;
- аудио обележја издвојена применом таласића на звук мотора једносмерне струје су садржала значајне разлике између мотора са грешком и мотора без грешке;

У будућим истраживањима ће један од акцената бити на употреби и других фамилија таласића које нису коришћене у овој дисертацији. Научна истраживања таласића се настављају, па треба очекивати и појаву нових фамилија таласића. Обрада сигнала се генерално развија и шири веома брзо, што је случај и са обрадом акустичких и аудио сигнала, тако да апликације за примену таласића постају све бројније. У контексту обраде импулсних одзива просторије, примена таласића се може разматрати и шире узимајући у обзир и различите алгоритме за обраду одзива и добијање акустичких параметара на основу одзива. Поред тога, показани потенцијали таласића у смањењу негативних ефеката шума код импулсних одзива просторије се могу учинити доступнијим развојем аутоматизованих процедура и софтверских модула којима се реализује обрада описана у овој дисертацији.

По питању примене таласића за издвајање релевантних аудио обележја, резултати презентовани у овој дисертацији дају снажну индикацију да аудио обележја базирана на таласићима имају своје место међу обележјима од значаја за задатке аудио аналитике, као и примене вештачке интелигенције за класификацију и детекцију у области аудио сигнала. Будућа истраживања треба да укључе и друге опције за формирање релевантних аудио обележја базирана на таласићима, пре свега она која се односе на друге статистичке мере примењене на коефицијенте детаља и апроксимације издвојене из сегмената аудио сигнала. Поред тога, треба размотрити опције примене таласића у пред-обради сигнала која се односи на отклањање шума из сигнала пре издвајања аудио обележја. Применљивост и предности аудио обележја базираних на таласићима за класификацију и детекцију треба испитати и кроз реализацију конкретних архитектура машинског и дубоког учења.

Било да је реч о импулсним одзивима просторије или аудио сигнаlima који садрже звук мотора једносмерне струје, све поменуте методе примене таласића треба испитати и користећи додатне сигнале снимљене у другачијим условима и уз присуство различитих шума и амбијенталне буке. На крају, дефинисане методе треба

применити и на другим врстама сигнала и искористити поменуте погодности таласића и у другим областима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Muangjaroen, T. Yingthawornsuk, “A study of noise reduction in speech signal using FIR filtering”, *International Conference on Advances in Electrical and Electronics Engineering*, Pattaya, Thailand, Apr. 2012, pp. 51–54.
- [2] V. Jagan Naveen, T. Prabhakar, J. Venkata Suman , P. Devi Pradeep, “Noise suppression in speech signals using adaptive algorithms”, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 3, no. 3, 2010.
- [3] A. Kashyap, M. Prasad, “Audio Noise Cancellation using Wiener filter based LMS algorithm using LabVIEW”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 599–601, 2013.
- [4] Đ. Damnjanović, M. Gojković, D. Ćirić, “Audio signal de-noising using wavelets algorithm in Matlab and LabVIEW”, in *Proceedings of the 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering “IcETRAN 2014”*, Vrnjačka banja, Serbia, Jun. 2014, pp. AKI1.2.1–6.
- [5] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. Taylor & Francis e-Library, 2001.
- [6] J. E. K. Foreman, *Sound analysis and noise control*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [7] C. E. Stilp, M. Kiefte, K. R. Kluender, “Discovering acoustic structure of novel sounds”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, no. 4, pp. 2460–2473, 2018.
- [8] A. Carpinteri, G. Lacidogna, F. Accornero, “Fluctuations of 1/f Noise in Damaging Structures Analyzed by Acoustic Emission”, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, pp. 1–14, 2018.
- [9] P. Górski, L. Morzyński, “Active noise reduction algorithm based on NOTCH filter and genetic algorithm”, *Archives of Acoustics*, vol. 38, no. 2, pp. 185–190, 2013.
- [10] F. Jin; P. Fieguth; L. Winger; E. Jernigan, “Adaptive Wiener filtering of noisy images and image sequences”, in *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing*, Barcelona, Spain, Sep. 2003, pp. III–349.
- [11] L. Tan, J. Jiang, *Digital Signal Processing*. 3rd Edition. USA: Academic Press, 2018.

- [12] M. Gojković, Đ. Damnjanović, R. Krneta, V. Aleksić, “Optimalno i adaptivno filtriranje primenom Matlab Simulink-a”, in *Elektronski zbornik radova 56. konferencije ETRAN*, Zlatibor, Srbija, Jun. 2012, pp. EK 2.7–1–4.
- [13] C. Paleologu, J. Benesty, S. Ciochină, “Widely linear general Kalman filter for stereophonic acoustic echo cancellation”, *Signal Processing*, vol. 94, pp. 570–575, 2014.
- [14] R. Krneta, M. Acović, A. Dostanić, *Signali i sistemi sa MATLAB ® primerima*. II dopunjeno izdanje. Čačak: Tehnički fakultet Čačak, 2009.
- [15] M. Sifuzzaman, M. R. Islam, M. Z. Ali, “Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform”, *Journal of Physical Sciences*, vol. 13, pp. 121–134, 2009.
- [16] R. J. E. Merry, *Wavelet Theory and Applications: a literature study*. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Jun. 2005.
- [17] B. Ergen, “Signal and image denoising using wavelet transform,” in *Advances in wavelet theory and their applications in engineering*, Physics and Technology, In-Tech, 2012, pp. 495–515.
- [18] J. M. Gorriz, J. Ramirez, S. Cruces-Alvarez, C. G. Puntonet, E. W. Lang, D. Erdogmus, “A novel LMS Algorithm applied to adaptive cancellation”, *IEEE Signal Process. letters*, vol. 16, no. 1, pp. 34–37, 2009.
- [19] B. Widrow, J. R. Glover, J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, Jr. Eugene Dong, R. C. Goodlin, “Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1692–1716, 1975.
- [20] T. Tajdari, “Adaptive method to predict and track unknown system behaviors using rls and lms algorithms”, *FACTA UNIVERSITATIS*, vol. 34, no. 1, pp. 133–140, 2021.
- [21] Đ. Damnjanović, R. Krneta, D. Živković, “Online Identification of Unknown System in Adaptive Filtering Laboratory”, in *Proceedings of the 4th Experiment@ International Conference (exp.at'17)*, Demo paper, University of Algarve, Faro, Portugal, Jun. 2017, pp. 99–100.
- [22] F. Yang, Y. Cao, M. Wu, F. Albu, J. Yang, “Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights”, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 11, pp. 1–20, 2018.
- [23] M. Gojković, Đ. Damnjanović, R. Krneta, “State Estimation of the Voltage Conversion Process in a Solar Power System with Kalman Filter”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 359–376, Oct. 2019.

- [24] Desanka P. Radunović, *Talasići*. Beograd: Akademska misao, 2005.
- [25] D. L. Donoho, “Nonlinear wavelet methods of recovery for signals, densities, and spectra from indirect and noisy data”, Stanford University, California, Technical report 437, Aug. 1993.
- [26] D. L. Donoho, “De-noising by soft-thresholding”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613–627, May 1995.
- [27] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, 1992.
- [28] C. Valens, *A Really Friendly Guide to Wavelets*. 1999.
- [29] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Third Edition. Academic Press, 2008.
- [30] G. Luo, D. Zhang, “Wavelet denoising”, in *Advances in wavelet theory and their applications in engineering*, Physics and Technology, InTech, 2012, pp. 59–81.
- [31] M. Y. Gokhale, D. K. Khanduja, “Time Domain Signal Analysis Using Wavelet Packet Decomposition Approach”, *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 321–329, Mar. 2010.
- [32] G. Kaushik, H.P. Sinha, L. Dewan, “Biomedical signals analysis by dwt signal denoising with neural networks”, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 62, no. 1, pp. 184–198, Apr. 2014.
- [33] L. Brechet, M.-F. Lucas, C. Doncarli, D. Farina, “Compression of biomedical signals with mother wavelet optimization and best-basis wavelet packet selection”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 12, pp. 2186–2192, Nov. 2007.
- [34] E. Güzel, M. Canyılmaz, M. Türk, “Application of wavelet based denoising techniques to remote sensing very low frequency signals”, *Radio Science*, vol. 46, no. 2, pp. 1–9, Apr. 2011.
- [35] H. Om, M. Biswas, “An Improved Image Denoising Method Based on Wavelet Thresholding”, *Journal of Signal and Information Processing*, vol. 3, no. 1, pp. 109–116, Feb. 2012.
- [36] B. Dehda, K. Melkemi, “Image denoising using new wavelet thresholding function”, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, vol. 16, no. 2, pp. 55–65, 2017.
- [37] S. Ruikar, D. D. Doye, “Image Denoising Using Wavelet Transform”, *International Conference on Mechanical and Electrical Technology*, Singapore, Sep. 2010, pp. 509–515.

- [38] T. A. Lonare, M. R. Bachute, “Speech Denoising using Wavelet Transform”, *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing (IOSR-JVSP)*, vol. 6, no. 3, pp. 36–41, 2016.
- [39] M. S. Chavan, M. N. Chavan, M. S. Gaikwad, “Studies on Implementation of Wavelet for Denoising Speech Signal”, *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 3, no. 2, pp. 1–7, Jun. 2010.
- [40] N. Trivedi, V. Kumar, S. Singh, S. Ahuja, R. Chadha, “Speech Recognition by Wavelet Analysis”, *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 15, no. 8, pp. 27–32, Feb. 2011.
- [41] S. Yadav , M. Chavan, “Blind Source separation and Echo cancellation using Discreet Wavelet transform and ICA”, *International Journal of scientific research and management (IJSRM)*, vol. 3, no. 6, pp. 3062–3064, 2015.
- [42] P. Khattar, A. Rai, S. Tripathi, “Audio De-noising using Wavelet Transform”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 3, no. 7, pp. 489–493, Jul. 2016.
- [43] G. Yu, E. Bacry, S. Mallat, “Audio Signal Denoising with Complex Wavelets and Adaptive Block Attenuation”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*, Honolulu, HI, USA, Apr. 2007.
- [44] D. Guangbo, X. Guihai, S. Zengqi, “Real-time Audio De-noising DSP System Based on Wavelet Analysis and Pattern Recognition”, *International Conference on Neural Networks and Brain*, Beijing, China, Oct. 2005, pp. 826–830.
- [45] B. K. Munegowda, “Performance and Comparative Analysis of Wavelet Transform in Denoising Audio Signal from Various Realistic Noise”, The School of Engineering and the Built Environment Edinburgh, Napier University, Project report, May 2016.
- [46] “ISO 3382-1: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces”, International Organization for Standardization, Geneva, 2009.
- [47] C. C. J. M. Hak, R. H. C. Wenmaekers, L. C. J. van Luxemburg, “Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters”, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 98, no. 6, pp. 907–915, 2012.
- [48] Z. Chen, “An investigation of acoustic impulse response measurement and modeling for small rooms”, Ph.D. dissertation, Montana State University, Bozeman, Montana, 2007.
- [49] M. Guski, M. Vorländer, “Comparison of Noise Compensation Methods for Room Acoustic Impulse Response Evaluations”, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, no. 2, pp. 320–327, 2014.

- [50] Dejan G. Ćirić, Miroslava A. Milošević, “Optimal Determination of the Truncation Point of Room Impulse Responses”, *BUILDING ACOUSTICS*, vol. 12, no. 1, pp. 15–30, 2005.
- [51] C. Schüldt, P. Händel, “On Implications of the ISO 3382 Backward Integration Method for Automated Decay Rate Estimation”, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 63, no. 3, pp. 161–173, Mar. 2015.
- [52] J. B. Allen, D. A. Berkley, “Image method for efficiently simulating small-room acoustics”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, no. 4, pp. 943–950, Apr. 1979.
- [53] M. Janković, D. G. Ćirić, A. Pantić, “Automated estimation of the truncation of room impulse response by applying a nonlinear decay model”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 139, no. 3, pp. 1047–1057, Mar. 2016.
- [54] D. G. Ćirić, “Doprinos razvoju postupka merenja i obrade impulsnog odziva prostorije pri određivanju akustičkih karakteristika”, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija, 2006.
- [55] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, “Applying of Wavelets in De-noising of Room Impulse Responses”, in *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering “IcETRAN 2016”*, Zlatibor, Serbia, Jun. 2016, pp. AKI 1.4.1–6.
- [56] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, A. Đorđević, “Effects of the parameters of wavelets applied in de-noising of room impulse responses”, in *Proceedings of the 45th International Congress and exposition on Noise Control engineering “INTER-NOISE 2016”*, Hamburg, Germany, Aug. 2016, pp. 3640–3649.
- [57] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, “Analysis of Wavelet Usage in De-noising of Room Impulse Responses”, in *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering “IcETRAN 2017”*, Kladovo, Serbia, Jun. 2017, pp. AKI1.6.1–6.
- [58] Đ. M. Damnjanović, D. G. Ćirić, B. B. Predić, “De-Noising of a Room Impulse Response by Applying Wavelets”, *Acta Acustica United With Acustica, Journal of the European Acoustics Association (EAA) - International Journal on Acoustics*, vol. 104, no. 3, pp. 452–463, Jun. 2018.
- [59] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, “Usage of Wavelet De-noising for Estimation of Room Impulse Response Truncation Time”, in *Proceedings of the 5th International Conference*

- on *Electrical, Electronic and Computing Engineering "IcETran 2018"*, Palić, Serbia, Jun. 2018, pp. 565–570.
- [60] A. Phinyomark, A. Nuidod, P. Phukpattaranont, C. Limsakul, "Feature Extraction and Reduction of Wavelet Transform Coefficients for EMG Pattern Classification", *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA (Electronics and Electrical Engineering)*, vol. 122, no. 6, pp. 27–32, 2012.
 - [61] P. de Chazal, B. G. Celler, R. B. Reilly, "Using Wavelet Coefficients for the Classification of the Electrocardiogram", *22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Chicago, IL, USA, Jul. 2000.
 - [62] A. Hashemi, H. Arabalibiek, K. Agin, "Classification of Wheeze Sounds Using Wavelets and Neural Networks", *International Conference on Biomedical Engineering and Technology*, Singapore, Jun. 2011, vol. 11, pp. 127–131.
 - [63] A.Kandaswamy, C. S. Kumar, Rm. Pl. Ramanathan, S. Jayaraman, N. Malmurugan, "Neural classification of lung sounds using wavelet coefficients", *Computers in Biology and Medicine*, vol. 34, no. 6, pp. 523–537, Sep. 2004.
 - [64] M. Daniels, "Classification of Percussive Sounds Using Wavelet-Based Features", Stanford University, Stanford, USA, Fall 2010.
 - [65] D. Gerhard, "Audio Signal Classification: History and Current Techniques", University of Regina, Regina, Saskatchewan, CANADA, Technical Report, Nov. 2003.
 - [66] L. Lu, H.-J. Zhang, H. Jiang, "Content Analysis for Audio Classification and Segmentation", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 10, no. 7, pp. 504–516, Dec. 2002.
 - [67] P. Sharma, N. Saraswat, "Diagnosis of Motor Faults Using Sound Signature Analysis", *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 80–83, May 2015.
 - [68] A. Glowacz, "Diagnostics of direct current machine based on analysis of acoustic signals with the use of symlet wavelet transform and modified classifier based on words", *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 16, no. 4, pp. 554–558, 2014.
 - [69] A. Glowacz, "DC Motor Fault Analysis with the Use of Acoustic Signals, Coiflet Wavelet Transform, and K-Nearest Neighbor Classifier", *Archives of Acoustics*, vol. 40, no. 3, pp. 321–327, 2015.

- [70] C. da Costa, M. Kashiwagi, M. H. Mathias, “Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition”, *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 1, pp. 15–26, 2015.
- [71] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, Z. Perić, “Analysis of DC Motor Sounds Using Wavelet-Based Features”, in *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering “(Ic)ETTRAN 2019”*, Srebrno jezereo, Serbia, Jun. 2019, pp. 17–22.
- [72] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, M. Miletić, Dejan Vujičić, “Usage of Different Wavelet Families in DC Motor Sounds Feature Analysis”, *7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering “IcETTRAN 2020”*, Belgrade, Niš, Novi Sad and Čačak, Serbia, Sep. 2020, pp. AKI 1.2.1–1.2.6.
- [73] Đ. Damnjanović, D. Ćirić, Z. Perić, “Wavelet-Based Audio Features of DC Motor Sound”, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics*, vol. 34, no. 1, pp. 71–88, Mar. 2021.
- [74] P. A. Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios, J. G. Avina-Cervantes, H. Rostro-Gonzalez, R. de J. Romero-Troncoso, “Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 83, pp. 568–589, Jan. 2017.
- [75] A. A. Silva, A. M. Bazzi, S. Gupta, “Fault diagnosis in electric drives using machine learning approaches”, *International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, IL, USA, May 2013, pp. 722–726.
- [76] S.-Y. Shao, W.-J. Sun, R.-Q. Yan, P. Wang, R. X Gao, “A Deep Learning Approach for Fault Diagnosis of Induction Motors in Manufacturing”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, pp. 1347–1356, Oct. 2017.
- [77] M. Z. Ali, M. N. S. K. Shabbir, X. Liang, Y. Zhang, T. Hu, “Machine Learning-Based Fault Diagnosis for Single- and Multi-Faults in Induction Motors Using Measured Stator Currents and Vibration Signals”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2378–2391, Jan. 2019.
- [78] A. Haar, “On the Theory of Orthogonal Function Systems”, in *Fundamental Papers in Wavelet Theory*, Princeton University Press, 2006, pp. 155–188.
- [79] J. Cooley, P. Lewis, P. Welch, “Historical notes on the fast Fourier transform”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, no. 2, pp. 76–79, Jun. 1967.
- [80] A. Graps, “An Introduction to Wavelets”, *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 50–61, 1995.

- [81] P. M. Crowley, “A Guide to Wavelets for Economists”, *Journal of Economic Surveys*, vol. 21, no. 2, pp. 207–415, Apr. 2007.
- [82] S. Berry, “Practical wavelet signal processing for automated testing”, in *1999 IEEE AUTOTESTCON Proceedings*, San Antonio, TX, USA, Sep. 1999, pp. 653–659.
- [83] A. N. Akansu, W. A. Serdijn, I. W. Selesnick, “Emerging applications of wavelets: A review”, *Physical Communication*, vol. 3, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2010.
- [84] B. Kovačević, Ž. Đurović, S. Stanković, *Signali i sistemi*. Beograd: Akademska misao, 2008.
- [85] R. F. Hoskins, “Fourier Series and Transforms”, in *Delta Functions*, Woodhead, 2009, pp. 128–153.
- [86] O. Rioul, M. Vetterli, “Wavelets and signal processing”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 14–38, Oct. 1991.
- [87] C. Mateo, J. A. Talavera, “Short-time fourier transform with the window size fixed in the frequency domain”, *Digital Signal Processing*, vol. 77, pp. 13–21, Jun. 2018.
- [88] K. M. M. Prabhu, *Window Functions and Their Applications in Signal Processing*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [89] R. Cohen, “Signal Denoising Using Wavelets Project Report”, Technion, Israel Institute of Technology, Israel, Project report, 2012.
- [90] H.-G. Stark, *Wavelets and Signal Processing*. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [91] D. L. Fugal, *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing*. San Diego, California: Space & Signals Technical Publishing, 2009.
- [92] M. van Berkel, “Wavelets for Feature Detection; Theoretical background”, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven, Literature study, Mar. 2010.
- [93] S. Mallat, “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, Jul. 1989.
- [94] M.-J. Lai, “Popular Wavelet Families and Filters and Their Use”, in *Computational Complexity*, New York: Springer, 2012.
- [95] V. V. Vermehren, H. M. de Oliveira, “Close expressions for Meyer Wavelet and Scale Function”, *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicacoes SBrT 2015*, Juiz de Fora, Brazil, Sep. 2015.

- [96] D. L. Donoho, I. M. Johnstone, "Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage", *Biometrika*, vol. 81, pp. 425–455, Dec. 1994.
- [97] J. C. Goswami, A. K. Chan, *Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithms, and Applications*. 2nd Edition. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [98] E. Castillo, D. P. Morales, A. García, F. Martínez-Martí, L. Parrilla, A. J. Palma, "Noise Suppression in ECG Signals through Efficient One-Step Wavelet Processing Techniques", *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, pp. 1–13, 2013.
- [99] L. Jing-yi, L. Hong, Y. Dong, Z. Yan-sheng, "A New Wavelet Threshold Function and Denoising Application", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, pp. 1–8, May 2016.
- [100] The MathWorks, Inc., "Automatic 1-D denoising". [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wden.html>.
- [101] S. Ozaydin, I. K. Alak, "Speech Enhancement using Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform", *Journal of Science*, vol. 5, no. 4, pp. 159–171, 2018.
- [102] A. k. kadhim, "Image De-Noising by using Daubechies Wavelet Threshold", *Iraqi Journal of Information Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 58–72, 2014.
- [103] A. Lundeby, T. E. Vigran, H. Bietz, M. Vorländer, "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics", *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 81, no. 4, pp. 344–355, Jul. 1995.
- [104] N. Xiang and G. M. Sessler, *Acoustics, Information, and Communication*. 1st ed. Switzerland: Springer International, 2015.
- [105] E. A. Lehmann, A. M. Johansson, "Prediction of energy decay in room impulse responses simulated with an image-source model", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. 1, pp. 269–277, Jul. 2008.
- [106] D. Drinčić, P. Pravica, D. Novković, *Osnovi akustike*. Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd: Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF, Beograd, 2018.
- [107] W. C. Sabine, "Architectural Acoustics", in *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, vol. 42, no. 2, pp. 51–84, 1906.
- [108] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, pp. 409–412, 1965.
- [109] M. Guski, M. Vorländer, "The influence of noise on monaural room acoustic parameters utilizing different evaluation methods", in *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Montreal, Canada, vol. 13, Jun. 2013.

- [110] D. G. Ćirić, M. A. Milošević, “Transient noise influence in MLS measurement of room impulse response”, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 91, no. 1, pp. 110–120, 2005.
- [111] W. T. Chu, “Comparison of reverberation measurements using Schroeder’s impulse method and decay-curve averaging method”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 63, no. 5, pp. 1444–1450, 1978.
- [112] D. G. Ćirić, M. Janković, “Correction of room impulse response truncation based on a nonlinear decay model”, *Applied Acoustics*, vol. 132, pp. 210–222, Mar. 2018.
- [113] D. R. Morgan, “A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, no. 5, pp. 2686–2693, May 1997.
- [114] F. Qi-bin, L. Hong, “An overview on wavelet software packages”, *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 593–600, Mar. 2001.
- [115] N. Bogdanovs, E. Grabs, E. Petersons, “Software Implementation of Real-time Discrete Wavelet Transform Algorithm with Filter Banks”, *International Journal of Information Systems in the Service Sector*, vol. 8, no. 2, Apr. 2016.
- [116] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi, “Wavelet Toolbox User’s Guide”, USA, The MathWorks, Inc., Mar. 1996.
- [117] The MathWorks, Inc., “Introduction to Wavelet Families”. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html>.
- [118] The MathWorks, Inc., “Generate pink noise”. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/pinknoise.html>.
- [119] “IEC 61260: Electroacoustics - Octave-band and fractional octave- band filters,” International Electrotechnical Commission, Geneva, 1995.
- [120] D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, *Elektroakustika*. Beograd: Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2017.
- [121] M. Long, *Architectural Acoustics*. Second Edition. Academic Press, 2014.
- [122] G. Tzanetakis, G. Essl, P. Cook, “Audio Analysis using the Discrete Wavelet Transform”, in *Proceedings of the WSES International Conference Acoustics and Music: Theory and Applications (AMTA 2001)*, Skiathos, Greece, Jan. 2001, pp. 318–323.
- [123] M. Zhao, Q. Chai, S. Zhang, “A Method of Image Feature Extraction Using Wavelet Transforms”, in *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2009*, Ulsan, South Korea, Sep. 2009, pp. 187–192.

- [124] R. S. S. Kumari, D. Sugumar, “Wavelet Based Feature Vector Formation for Audio Signal Classification”, in *Proceedings of the ICACC2007 Int. Conference, Madurai, India*, Feb. 2007, pp. 752–755.
- [125] L. N. Thu, A. Win, H. N. Oo, “Acoustics-based Vehicle Classification System Using MFCC and Wavelet-based MFCC”, *8th International Conference on Science and Engineering*, Technological University, Yangon, Myanmar, Jan. 2018, pp. 1–5.
- [126] E. Germen, M. Başaran, M. Fidan, “Sound based induction motor fault diagnosis using Kohonen self-organizing map”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 46, pp. 45–58, 2014.
- [127] The MathWorks, Inc., “1-D wavelet decomposition”. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavedec.html?s_tid=mwa_osa_a.
- [128] M. C. Sezgin, B. Gunsel, G. K. Kurt, “Perceptual audio features for emotion detection”, *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, no. 16, pp. 1–21, 2012.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Ђорђе М. Дамњановић рођен је 17.07.1986. године у Београду. Први разред Основне школе завршио је у Обреновцу, након чега се сели у Чачак, где је завршио Основну школу „Милица Павловић“ као носилац Вукове дипломе. Средњу Техничку школу у Чачку завршио је са одличним успехом, смер Електротехничар аутоматике.

Технички факултет у Чачку уписао је 2005. године, смер Рачунарска техника. Основне студије завршио је 2010. године, чиме стиче стручни назив Дипломирани инжењер електротехнике. Мастер студије завршио је 2011. године, такође на Техничком факултету у Чачку, на студијском програму Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Рачунарско инжењерство, чиме стиче стручни назив Мастер инжењер електротехнике и рачунарства. Мастер рад под називом „Мерење и обрада сигнала електромиограма у детекцији говора“ одбранио је под менторством проф. др Александра Пеулића, редовног професора.

На Електронском факултету у Нишу 2011. године уписао је докторске студије на смеру Електротехника и рачунарство.

По завршетку Основних студија, засновао је радни однос на Техничком факултету у Чачку (садашњи Факултет техничких наука) прво као сарадник у настави, а након тога као асистент на Катедри за рачунарско и софтверско инжењерство. Аутор је многих публикација у иностраним и домаћим стручним часописима и конференцијама, као и коаутор неколицине приручника за наставу на факултету. Учесник је на више домаћих и међународних пројеката.

ИЗЈАВЕ АУТОРА

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

ПРИМЕНА ТАЛАСИЋА НА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈУ АУДИО СИГНАЛА

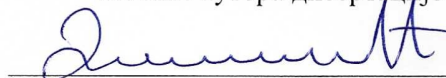
која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Ђорђе Дамњановић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

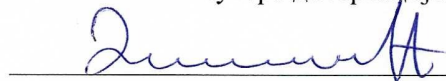
Наслов дисертације:

**ПРИМЕНА ТАЛАСИЋА НА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈУ
АУДИО СИГНАЛА**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Ђорђе Дамњановић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ПРИМЕНА ТАЛАСИЋА НА ОТКЛАЊАЊЕ ШУМА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈУ АУДИО СИГНАЛА

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Ђорђе Дамњановић